



Scientific Electronic Archives

Issue ID: Vol.19 (3), May/June 2026, p. 1-10

DOI: <http://dx.doi.org/10.36560/19320262187>

+ Corresponding author: viviane.codognoto@gmail.com

Influência da pressão e da velocidade de deslocamento na qualidade da pulverização e deposição de gotas em aplicações agrícolas

Influence of pressure and travel speed on spray quality and droplet deposition in agricultural applications

Diego José Bernardo de Oliveira ¹, Viviane Maria Codognoto ²+, Zimbábwe Osório Santos ³, Antônio Cezar Bérnago ², Luiz Vitor Crepaldi Sanches ¹, José Guilherme Lança Rodrigues ¹

¹ Faculdade Galileu

² Faculdades Integradas de Taquai

³ Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo. A eficiência na aplicação de defensivos agrícolas é um dos principais fatores que determinam o sucesso das práticas fitossanitárias e a sustentabilidade da produção agrícola. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da pressão de pulverização e da velocidade de deslocamento sobre a qualidade e a eficiência da pulverização em condições controladas de campo. O experimento foi conduzido na fazenda experimental Luiz Lourenço Lança, em Taquai (SP), utilizando um pulverizador de barras (marca INCOMAGRI, modelo ATTACK) equipado com bicos do tipo leque (Jacto JSF 11003). Adotou-se delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, em arranjo fatorial 4 × 4, combinando quatro níveis de pressão (1, 2, 3 e 4 bar) e quatro velocidades de deslocamento (3, 5, 7 e 9 km h⁻¹). As avaliações foram realizadas por meio da análise de cartões hidrossensíveis e processadas com o software Gotas (EMBRAPA), obtendo-se variáveis como vazão, cobertura, densidade, fator de dispersão e diâmetro volumétrico médio (D50). Os dados foram submetidos a modelos lineares generalizados para análise dos efeitos principais e de interação entre pressão e velocidade. Os resultados indicaram que o aumento da pressão elevou significativamente a vazão ($p < 0,001$) e a cobertura ($p < 0,001$), porém reduziu a densidade de gotas ($p = 0,048$), demonstrando um equilíbrio delicado entre volume aplicado e deposição efetiva. A velocidade exerceu efeito negativo sobre a vazão, mas contribuiu positivamente para a cobertura quando combinada a pressões moderadas. Houve interação significativa entre pressão e velocidade para as variáveis de densidade e cobertura, evidenciando que o ajuste isolado de um único parâmetro pode comprometer a eficiência da aplicação. A análise do D50 mostrou que pressões elevadas aumentaram o tamanho médio das gotas, enquanto velocidades maiores intensificaram sua fragmentação. De modo geral, pressões intermediárias (2–3 bar) associadas a velocidades médias (5–7 km h⁻¹) proporcionaram o melhor equilíbrio entre uniformidade, densidade e cobertura, favorecendo a eficiência e reduzindo riscos de deriva e escorrimento. Conclui-se que o manejo integrado da pressão e da velocidade é essencial para a calibração de pulverizadores, otimizando a deposição e contribuindo para o uso racional de defensivos agrícolas e a sustentabilidade das práticas fitossanitárias.

Palavras-chave: Tecnologia de aplicação, Deposição de gotas, Pressão de trabalho, Velocidade de deslocamento, Defensivos agrícolas.

Abstract. The efficiency of pesticide application is one of the key factors determining the success of crop protection practices and the sustainability of agricultural production. This study aimed to evaluate the effects of spray pressure and travel speed on spray quality under controlled field conditions. The experiment was carried out at the Luiz Lourenço Lança Experimental Farm, in Taquai, São Paulo, using a boom sprayer (brand INCOMAGRI, model ATTACK) equipped with flat-fan nozzles (Jacto JSF 11003). A randomized block design was adopted, with four replications, in a 4 × 4 factorial arrangement combining four pressure levels (1, 2, 3, and 4 bar) and four travel speeds (3, 5, 7, and 9 km h⁻¹). Evaluations were performed using water-sensitive papers, analyzed with the Gotas software (EMBRAPA), generating variables such as flow rate, coverage, droplet density, droplet size dispersion factor, and volumetric median diameter (D50). Data were analyzed using generalized linear models to assess main and interaction effects between

pressure and speed. Results showed that increasing spray pressure significantly raised flow rate ($p < 0.001$) and coverage ($p < 0.001$), but reduced droplet density ($p = 0.048$), highlighting a delicate balance between applied volume and effective deposition. Travel speed had a negative effect on flow rate but positively influenced coverage when combined with moderate pressures. A significant interaction between pressure and speed was observed for droplet density and coverage, indicating that adjusting a single parameter in isolation may compromise application efficiency. The analysis of D50 revealed that higher pressures produced larger droplets, whereas higher speeds enhanced droplet fragmentation. Overall, intermediate pressures (2–3 bar) combined with medium travel speeds (5–7 km h⁻¹) provided the best balance between uniformity, density, and coverage, enhancing application efficiency and reducing drift and runoff risks. It is concluded that the integrated management of spray pressure and travel speed is essential for accurate sprayer calibration, promoting efficient droplet deposition and contributing to the rational use of pesticides and sustainable crop protection practices.

Keywords: Application technology, Droplet deposition, Spray pressure, Travel speed, Pesticides.

Introdução

A interação entre condições de solo, clima e relevo, aliada aos avanços científicos e tecnológicos, às políticas públicas e ao empreendedorismo dos produtores rurais, permitiu que o Brasil se destacasse como um dos líderes mundiais na produção e exportação de alimentos (MASSRUHÁ et al., 2020). Apesar dos desafios impostos pela presença de organismos patogênicos nas lavouras, a agropecuária nacional se destaca entre as maiores do mundo e exerce papel estratégico na economia do país. Em 2023, o setor registrou crescimento de 15,1%, contribuindo para a elevação de 2,9% no Produto Interno Bruto brasileiro em comparação ao ano anterior, totalizando R\$ 10,9 trilhões (IBGE, 2024).

Diante desse cenário de elevada produtividade e expansão agrícola, a eficiência no uso de tecnologias aplicadas à proteção das plantas torna-se essencial para manter os níveis de produção e assegurar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Nesse contexto, a eficiência na aplicação de defensivos agrícolas desponta como um fator determinante para o sucesso das práticas fitossanitárias, garantindo o controle eficaz de pragas, doenças e plantas daninhas, além de reduzir perdas e minimizar riscos de contaminação ambiental (SANTOS; SANTOS, 2023; VERMELHO et al., 2024). A qualidade da pulverização, por sua vez, depende diretamente da interação entre variáveis operacionais e ambientais, como o tipo de bico, a pressão de trabalho, a velocidade de deslocamento e as condições meteorológicas durante a aplicação (MOURA; STRYHALSKI; PAHOLSKI, 2020).

A pressão de serviço dos pulverizadores exerce papel fundamental na formação das gotas, influenciando o diâmetro médio, a cobertura e o potencial de deriva; pressões elevadas produzem gotas finas, mais suscetíveis à evaporação e ao desvio pelo vento (deriva), enquanto pressões baixas geram gotas grandes, com maior tendência ao escorrimento, exigindo ajustes que considerem o tipo de bico, o defensivo e as condições climáticas (CUNHA et al., 2003; PEREIRA et al., 2022; QUIRINO et al., 2013; SCHNEIDER et al., 2013; SOUZA; CASTRO; PALLADINI, 2007). A velocidade de deslocamento também influencia a eficiência da aplicação, afetando o padrão de deposição e a uniformidade da cobertura foliar, de modo que a

seleção da velocidade ideal deve considerar o tipo de cultura, a densidade do dossel e o sistema de aplicação (BENASSI et al., 2019; DIERINGS, 2020; RAETANO; BAUER, 2003). Além disso, a interação entre pressão e velocidade afeta diretamente a deriva, definida como a fração da calda que não atinge o alvo, sendo influenciada por fatores como tipo de bico, intensidade do vento e regulagens inadequadas; bicos de indução de ar reduzem o potencial de deriva, ao passo que bicos de jato cônico vazio tendem a gerar maiores perdas fora do alvo (BUOSI et al., 2024; COSTA et al., 2007; CUNHA et al., 2003; DA CUNHA, 2008; MASCARA, 2017; VARGAS et al., 2025).

Portanto, compreender e manejar adequadamente as variáveis operacionais da pulverização, especialmente a pressão e a velocidade, é essencial para aprimorar a eficiência de aplicação de defensivos agrícolas. O ajuste preciso desses parâmetros permite maximizar a deposição no alvo, reduzir perdas por deriva e aumentar a eficácia do controle de pragas e doenças, promovendo aplicações mais seguras e sustentáveis (COSTA et al., 2007; QUIRINO et al., 2013; BENASSI et al., 2019).

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência de variáveis operacionais, como pressão de pulverização e velocidade de deslocamento, sobre as características da pulverização e a eficiência de deposição de gotas, visando otimizar a aplicação de defensivos agrícolas. Buscou-se, assim, identificar parâmetros que promovam maior uniformidade de cobertura, redução de perdas e incremento na sustentabilidade das práticas fitossanitárias, contribuindo para o uso racional de insumos e o fortalecimento da produtividade agrícola. Especificamente, o estudo visou quantificar os efeitos das diferentes pressões e velocidades de deslocamento na formação e deposição das gotas, analisar a interação entre esses fatores, determinar o potencial de deriva associado às condições operacionais avaliadas e identificar combinações que resultem em maior eficiência de aplicação.

Material e Métodos

Local do estudo e equipamentos utilizados

O experimento foi instalado e conduzido na fazenda experimental Luiz Lourenço Lança, no

município de Tauguá/SP, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 23°27'13,32 "S", longitude 49°23'9,88 "O" e altitude de 595 metros.

Foi empregado um trator Massey Ferguson, modelo 4410, com 105 cv de potência, juntamente com um pulverizador de barras da marca INCOMAGRI, modelo ATTACK, que possui capacidade para 600 litros. O equipamento conta com barras de 12 metros de comprimento e bicos do tipo leque da marca Jacto, modelo JSF 11003, dispostos a cada 50 cm, totalizando 24 bicos. A cultura presente no local de aplicação foi a cultura de milho.

Delineamento experimental

O experimento foi conduzido com o objetivo de avaliar os efeitos da pressão de pulverização e da velocidade de deslocamento sobre as características da pulverização e a eficiência de deposição de gotas. Para determinar o tempo necessário para percorrer uma distância de 50 metros, o solo foi previamente demarcado com estacas, possibilitando o cálculo da velocidade de trabalho a partir do tempo gasto no trajeto. Antes do início das medições, o trator foi posicionado a 8 metros da primeira estaca, garantindo que atingisse a velocidade constante estipulada no momento em que cruzasse o ponto inicial. A velocidade foi determinada com o auxílio de um cronômetro digital.

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, com tratamentos definidos pelas combinações entre pressão e velocidade de aplicação. Cada tratamento foi repetido quatro vezes, assegurando representatividade estatística e controle das variações experimentais.

As variáveis operacionais e de desempenho avaliadas foram:

- Pressão de trabalho (bar): 1, 2, 3 e 4 bar;
- Velocidade de deslocamento (km h^{-1}): 3, 5, 7 e 9 km h^{-1} ;
- Volume (de calda) aplicado (ml): calculado a partir da vazão e da velocidade de deslocamento.

A avaliação da qualidade da pulverização foi realizada por meio da deposição das gotas sobre cartões hidrossensíveis posicionados na área de interesse (região foliar do milho). Foram utilizados papéis hidrossensíveis (Water Sensitive Paper – WSPAPER®, 26 x 76 mm, São Paulo, Brasil), fixados horizontal e verticalmente em diferentes posições no dossel. Após a pulverização, os cartões foram coletados, digitalizados e analisados para determinação das características das gotas (densidade, diâmetro e cobertura) (Figura 1).

As imagens dos papéis hidrossensíveis foram digitalizadas e analisadas com o software Gotas (EMBRAPA, versão 1.0, São Carlos, SP, Brasil) (Figura 2), que permite calcular o diâmetro e a densidade de gotas, bem como a cobertura e o fator de dispersão, obtendo-se as seguintes variáveis de resposta:

- ✓ Número de gotas (gotas cm^{-2});

- ✓ Densidade de gotas (gotas cm^{-2});
- ✓ Cobertura da superfície (%);
- ✓ Diâmetros médios volumétricos (D10, D50 e D90, μm);
- ✓ Fator de dispersão do tamanho de gotas (FDTG), indicador da uniformidade da pulverização e é calculado como $(D90 - D10) / D50$

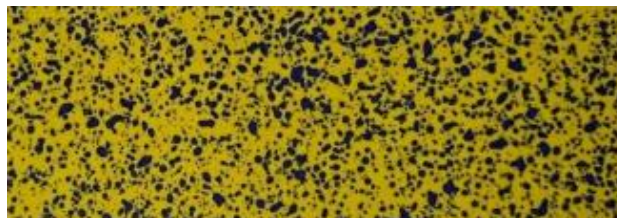


Figura 1. Imagem obtida do cartão hidrossensível após a pulverização na pressão de 1 BAR a 3 km/hora.

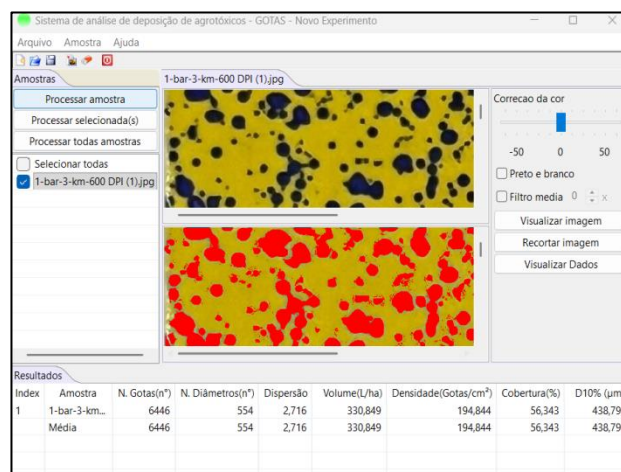


Figura 2. Imagem do software Gotas (EMBRAPA, versão 1.0, São Carlos, SP, Brasil) demonstrando como os dados são gerados pelo programa.

Os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos à análise estatística, considerando os efeitos principais e de interação entre a pressão e a velocidade de deslocamento sobre as variáveis de pulverização e deposição.

Análise de dados

A análise da variação do tamanho das gotas foi realizada pelo uso de papel hidrossensível Syngenta e pelo uso do programa computacional Gotas (EMBRAPA, 2015). Antes da modelagem, foi realizada uma verificação da normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk para as variáveis contínuas analisadas: volume aplicado, porcentagem de cobertura, fator de dispersão de tamanho de gotas, densidade de gotas e diâmetro volumétrico D50. Os resultados indicaram que a maioria das variáveis não seguia uma distribuição normal ($p < 0,05$), o que motivou o uso de um modelo linear generalizado (GLM) para avaliar os efeitos da pressão de trabalho e da velocidade de

aplicação, bem como sua interação, sobre as diferentes variáveis de resposta. Em todos os modelos pressão de trabalho e a velocidade de deslocamento foram tratadas como variáveis contínuas.

Para as variáveis volume aplicado, porcentagem de cobertura, fator de dispersão de tamanho de gotas e diâmetro volumétrico D50, foi utilizado um modelo GLM com distribuição Gama e função de ligação logarítmica (link = "log") devido à natureza positiva e assimétrica dessas variáveis. Para a variável Densidade de gotas, foi aplicado um modelo com distribuição normal (gaussian) após transformação por raiz quadrada.

A significância dos efeitos principais (pressão e velocidade) e da interação foi avaliada por meio do valor de p associado ao teste t, considerando-se um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). A avaliação final dos modelos foi conduzida por meio da inspeção gráfica dos resíduos e no critério de informação de Akaike (AIC). Os resultados dos modelos foram reportados por meio dos coeficientes estimados (β), erros-padrão, valores de p.

Curvas preditivas de volume aplicado foram geradas para serem utilizadas em futuras aplicações. Com este objetivo, a equação obtida através do GLM foi utilizada para gerar previsões da volume real ao longo de uma faixa contínua de valores de velocidade, variando entre os limites observados no experimento (3 a 9 kmh⁻¹), com

incrementos regulares de 0,06 kmh⁻¹. Essas previsões foram calculadas para cada nível de pressão testado (1, 2, 3 e 4 bar). As estimativas foram inicialmente obtidas na escala logarítmica do modelo e, posteriormente, transformadas de volta à escala original da variável por meio da função exponencial (exp). Além disso, foram calculados intervalos de confiança de 95% para cada valor predito.

Resultados e discussão

Os valores reais devolume aplicados são apresentados na Figura 3, enquanto as curvas de previsão geradas a partir da equação do modelo de regressão estão na Figura 4. A análise de regressão, revelou que o aumento da pressão de trabalho no bico esteve associado a um incremento significativo do volume aplicada ($\beta = 0,198 \pm 0.019$ log mL; $p < 0,001$). Por outro lado, o aumento da velocidade de deslocamento teve um efeito negativo e significativo sobre o volume ($\beta = -0,189 \pm 0.008$ log mL; $p < 0,001$). A interação entre pressão e velocidade não foi estatisticamente significativa ($\beta = 0,0007 \pm 0.0029$ log mL; $p = 0,819$), indicando que os efeitos principais dessas variáveis atuam de forma independente. Esses resultados sugerem que ajustes em pressão e velocidade influenciam o volume aplicada de maneira direta e oposta, devendo, portanto, ser considerados com atenção para garantir o desempenho desejado na aplicação.

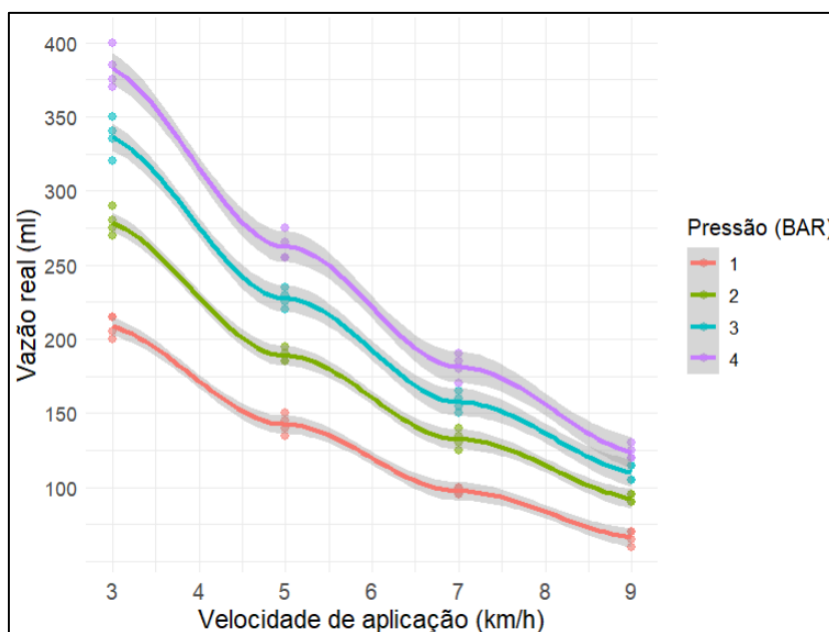


Figura 3. Volume aplicado (mL) observada em função da velocidade de deslocamento (kmh⁻¹) para diferentes pressões de trabalho (1, 2, 3 e 4 bar), representadas pelas cores. Os pontos indicam os dados brutos coletados durante o experimento, enquanto as linhas foram ajustadas por meio de regressão local (LOESS) com parâmetro de suavidade (span) de 0,75. As faixas sombreadas representam os intervalos de confiança de 95%.

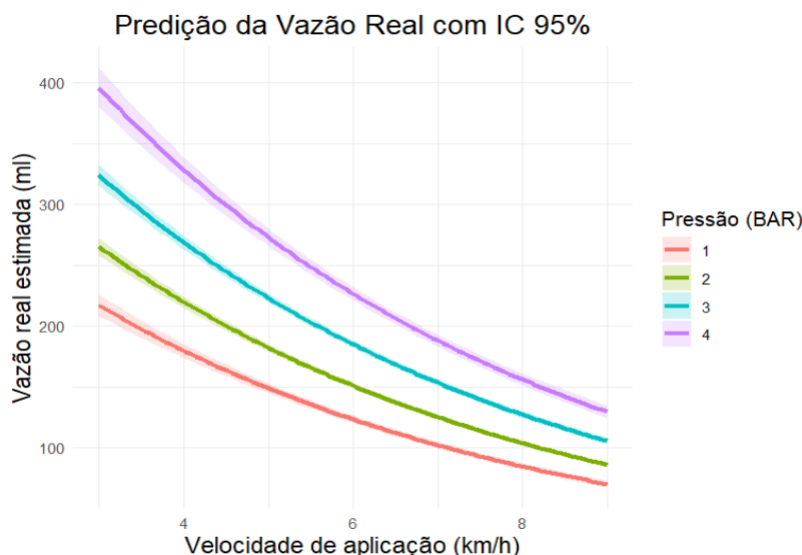


Figura 4. Volume aplicado estimado (mL) predita em função da velocidade de deslocamento (kmh^{-1}), sob diferentes pressões de trabalho (1, 2, 3 e 4 bar), conforme indicado pelas cores. As linhas representam as predições obtidas por meio de um modelo linear generalizado (GLM) com distribuição Gamma e função de ligação logarítmica. A equação ajustada foi: $\log(\text{Volume_real}) = 5,745 + 0,198 \cdot \text{Pressão} - 0,188 \cdot \text{Velocidade} + 0,0006 \cdot \text{Pressão} \cdot \text{Velocidade}$. Sendo os valores convertidos de volta para a escala original por meio da função exponencial (exp). As faixas ao redor das linhas representam os intervalos de confiança de 95% para as predições.

O aumento da pressão resultou em maior volume, o que está em concordância com estudos sobre pulverização agrícola e outros sistemas hidráulicos, nos quais a vazão ou taxa de descarga aumentam com a pressão operante (JADAV; JAIN; KHODIFAD, 2019). Por outro lado, a redução do volume com o aumento da velocidade de avanço reforça a lógica operacional de que maior deslocamento reduz o tempo durante o qual o bico aplica líquido sobre a área-alvo, e também encontra respaldo em estudos que observam correlações entre velocidade, fluxo e pressão em equipamentos com controle variável de aplicação (KARADOL et al., 2024).

A não detecção de interação significativa sugere que, no intervalo de pressões (e velocidades) estudado, os efeitos da pressão e da velocidade sobre o volume atuam de forma aditiva e independente, o que simplifica a calibração e o ajuste operacional. Isto significa que o operador pode ajustar pressão ou velocidade isoladamente e prever o efeito no volume aplicado sem necessidade de tabela de ajuste cruzado.

No entanto, França et al (2018) adverte que o aumento indiscriminado da pressão pode alterar outras características de pulverização (como tamanho de gotícula, largura de jato e deriva), o que implica em contraposições que vão além da simples vazão. Igualmente, em sistemas mais extremos (pressões muito altas, velocidades muito elevadas, bicos de diferentes tipos ou grandes larguras de barra) a independência dos efeitos pode não se manter, sendo necessário cuidado na extrapolação dos resultados, visto que a variabilidade no fluxo entre bicos pode tornar-se significativa em pressões baixas ou velocidades elevadas (MARTIN, 2013).

Em termos práticos, os resultados obtidos permitem construir tabelas de calibração em que,

para uma pressão dada, se pode prever o volume aplicado conforme a velocidade de deslocamento, e vice-versa, o que facilita o planejamento de pulverização em campo. Recomenda-se que, para manter a vazão desejada, se evite operar com velocidades mais altas sem aumento compensatório de pressão ou ajuste dos bicos, e se monitore eventuais efeitos colaterais relacionados ao tamanho de gotícula ou cobertura.

A relação entre a velocidade de deslocamento, pressão de pulverização do bico e o fator de dispersão do tamanho de gotas (FDTG) é apresentada na figura 5. A análise do fator de dispersão das gotas revelou que a pressão de pulverização teve efeito significativo sobre a uniformidade do tamanho das gotas. O aumento da pressão resultou em redução significativa do fator de dispersão ($\beta = -0,264 \pm 0,094 \log \text{FDTG}$; $p = 0,007$), indicando maior uniformidade entre as gotas geradas. Por outro lado, nem a velocidade de aplicação ($\beta = -0,005 \pm 0,040 \log \text{FDTG}$; $p = 0,903$) nem a interação deste com a pressão ($\beta = 0,017 \pm 0,015 \log \text{FDTG}$; $p = 0,264$) apresentaram efeito significativo sobre a uniformidade do tamanho das gotas.

No nosso estudo o aumento da pressão reduziu o FDTG e, conseqüentemente, aumentou a uniformidade da pulverização. Esses resultados divergem de estudos anteriores, que reportaram aumento da variabilidade das gotas sob pressões mais elevadas, atribuindo esse efeito à intensificação da fragmentação do jato líquido e à maior proporção de gotas finas geradas (CERRUTO et al., 2021; CUNHA; TEIXEIRA; FERNANDES, 2007; MCGINTY et al., 2019; NUYTENS et al., 2007)

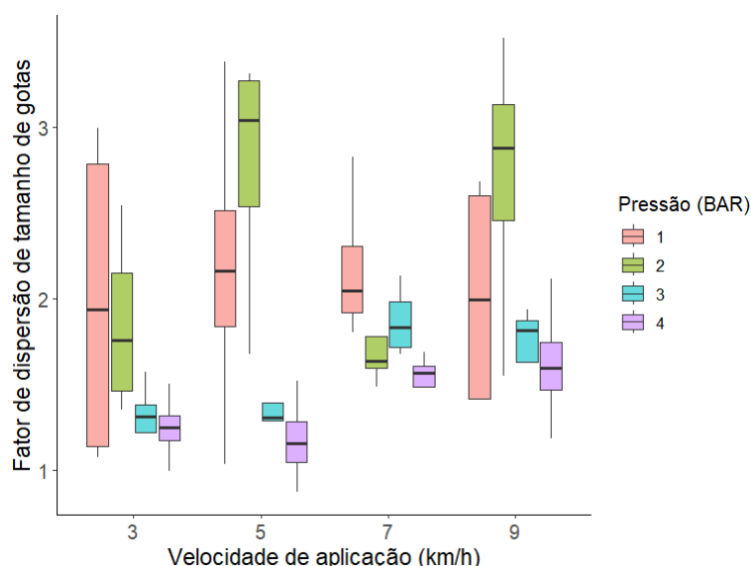


Figura 5. Fator de dispersão do tamanho das gotas em diferentes velocidades de aplicação (kmh^{-1}) e pressões de trabalho (bar). Os boxplots representam a variação do fator de dispersão para cada combinação de pressão e velocidade. Valores mais baixos indicam maior uniformidade, enquanto valores mais altos indicam maior variabilidade no diâmetro das gotas. A cor das caixas indica a pressão aplicada no bico pulverizador.

Uma possível explicação é que, nas condições experimentais deste estudo, levando em consideração o tipo de bico, a faixa de pressão e as propriedades físico-químicas da calda, a elevação da pressão tenha favorecido um regime de atomização mais estável, com quebra mais controlada do jato líquido. Esse comportamento sugere que a relação entre pressão e uniformidade de gotas pode não ser linear, dependendo do design do bico e do fluido utilizado (MCGINTY et al., 2019; NUYTENS et al., 2007).

A ausência de efeito significativo da velocidade e da interação pressão \times velocidade reforça a ideia de que a uniformidade do espectro de gotas é determinada principalmente pela energia de atomização e não pela dinâmica do deslocamento do equipamento. Esses achados indicam que, sob determinadas condições, é possível operar com pressões mais altas sem comprometer a uniformidade das gotas, embora seja necessário avaliar os riscos de deriva e evaporação associados (KRUGER et al., 2019).

O aumento da pressão de pulverização resultou em uma redução significativa da densidade de gotas ($\beta = -3,55 \pm 1,76 \sqrt{\text{n}^\circ/\text{cm}^{-2}}$; $p = 0,048$, figura 6). A velocidade de deslocamento, por si só, não apresentou efeito significativo sobre a densidade ($\beta = -0,93 \pm 0,75 \sqrt{\text{n}^\circ/\text{cm}^{-2}}$; $p = 0,221$). No entanto, observou-se uma interação significativa entre pressão e velocidade ($\beta = 0,74 \pm 0,27 \sqrt{\text{n}^\circ/\text{cm}^{-2}}$; $p = 0,009$), indicando que o efeito da pressão sobre a densidade de gotas varia de acordo com a velocidade de deslocamento. Essa interação pode ser visualizada na Figura 6: enquanto os bicos operando a 1 e 2 bar mantêm uma densidade de gotas relativamente constante entre diferentes velocidades, os bicos com 3 e 4 bar apresentam aumento expressivo na densidade

quando a velocidade aumenta de 3 para 5 e 7 kmh^{-1} .

Os resultados experimentais indicam que o aumento da pressão de pulverização reduziu significativamente a densidade de gotas, enquanto a velocidade de aplicação isoladamente não teve efeito significativo. No entanto, observou-se uma interação significativa entre pressão e velocidade, sugerindo que o efeito da pressão sobre a densidade de gotas varia conforme a velocidade de deslocamento. Esse achado é consistente com o conhecimento estabelecido na Tecnologia de Aplicação, uma vez que o aumento da pressão geralmente está associado à produção de gotas mais finas, que são mais suscetíveis à deriva e/ou evaporação antes de atingir o alvo, resultando em menor densidade de gotas efetivamente depositadas (ANTUNIASSI; BOLLER, 2019; CUNHA; TEIXEIRA; FERNANDES, 2007). Portanto, ao ajustar a pressão, é necessário considerar a velocidade de aplicação para otimizar a densidade de gotas e a eficácia do tratamento.

Tanto a pressão de aplicação ($\beta = 0,32 \pm 0,09 \log\%$; $p < 0,001$, figura 7) quanto a velocidade de deslocamento ($\beta = 0,09 \pm 0,04 \log\%$; $p = 0,021$, figura 7) exerceram efeitos positivos e estatisticamente significativos sobre a cobertura da pulverização. No entanto, a interação entre essas variáveis foi negativa e também significativa ($\beta = -0,04 \pm 0,01 \log\%$; $p = 0,003$, figura 7), indicando que o efeito da pressão sobre a cobertura não é uniforme ao longo das diferentes velocidades de deslocamento. Por exemplo, a área coberta tende a aumentar conforme a pressão do bico aumenta nas velocidades de 3 e 5 kmh^{-1} (Figura 7); contudo, essa mesma tendência não é observada nas velocidades de 7 e 9 kmh^{-1} .

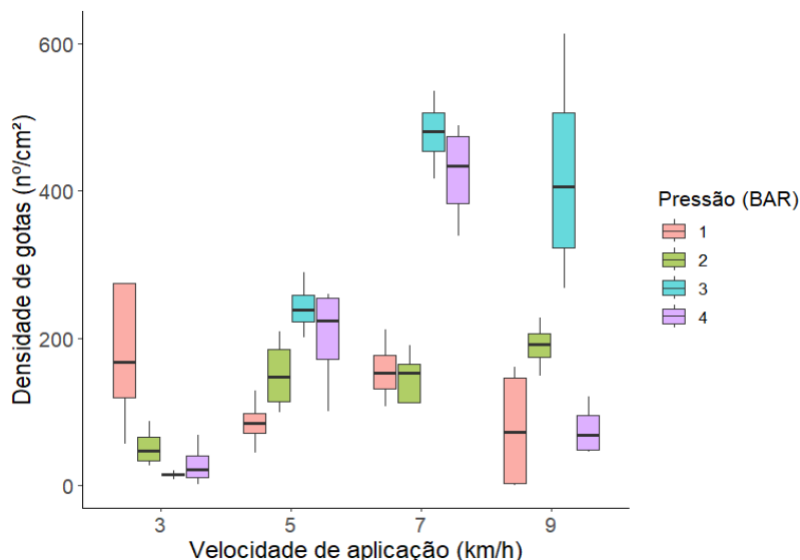


Figura 6. Densidade de gotas (n/cm^2) das gotas em diferentes velocidades de aplicação (kmh^{-1}) e pressões de trabalho (bar). Cada boxplot representa a dispersão dos valores de densidade de gotas para um determinado nível de pressão e velocidade, enquanto a coloração indica a pressão aplicada durante a pulverização.

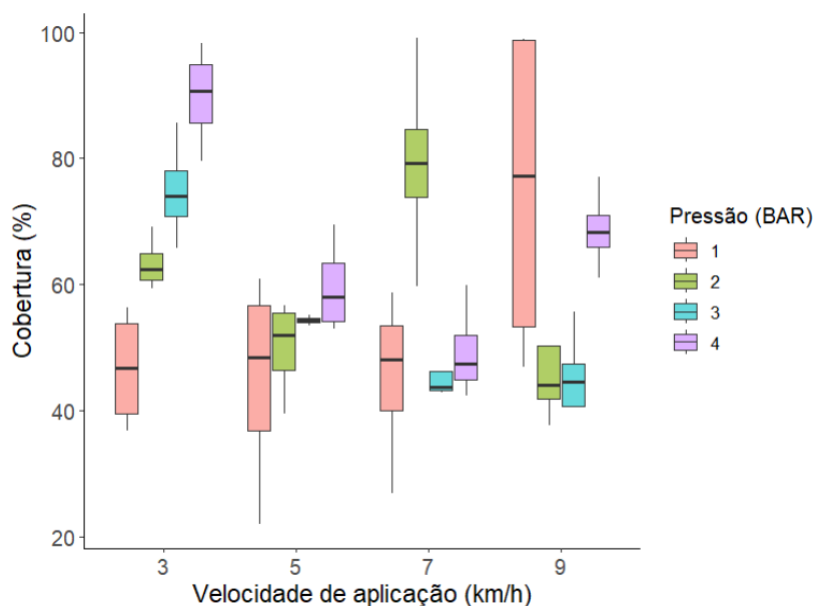


Figura 7. Área coberta (%) pelas gotas em diferentes velocidades de aplicação (kmh^{-1}) e pressões de trabalho (bar). Cada boxplot representa a dispersão dos valores de área coberta para um determinado nível de pressão e velocidade, enquanto a coloração indica a pressão aplicada durante a pulverização.

A cobertura da pulverização é fortemente influenciada pelos parâmetros operacionais, especialmente pela pressão de aplicação e velocidade de deslocamento, que determinam o tamanho, a quantidade e a uniformidade das gotas formadas (CUNHA; TEIXEIRA; VIEIRA, 2005; MOURA; STRYHALSKI; PAHOLSKI, 2020). No presente estudo, ambos os fatores apresentaram efeitos positivos e significativos sobre a cobertura, indicando que o aumento da pressão e da velocidade, até certo ponto, favorece a fragmentação do jato e amplia a distribuição das

gotas sobre o alvo. Resultados semelhantes foram relatados por Boller e Machry (2007) e Nuyttens et al. (2007), que observaram incremento da cobertura foliar em pulverizações realizadas sob pressões mais elevadas, em razão da formação de gotas menores e maior densidade de deposição.

Entretanto, a interação negativa entre pressão e velocidade evidencia que esses fatores não atuam de forma independente, e que o aumento simultâneo de ambos pode comprometer a eficiência da aplicação. Em velocidades mais altas, o tempo de exposição do jato sobre o alvo é

reduzido, o que limita a deposição e pode acentuar a deriva, especialmente quando combinada com pressões elevadas que geram gotas (COSTA et al., 2007; NUYTTENS et al., 2007). Essa tendência foi observada nas velocidades de 7 e 9 km h⁻¹, nas quais o incremento de pressão não resultou em aumento da cobertura, corroborando achados de Baesso et al. (2014), que destacam a necessidade de ajustar a pressão conforme a velocidade para evitar perdas por deriva e escorrimento, aumentando a eficácia do controle e menor contaminação ambiental.

De modo geral, a máxima eficiência na cobertura é obtida quando há equilíbrio entre pressão e velocidade, garantindo a formação de gotas com diâmetro adequado para o alvo e as condições ambientais da aplicação (CUNHA; TEIXEIRA; VIEIRA, 2005). Assim, pressões moderadas associadas a velocidades intermediárias tendem a otimizar a deposição e reduzir perdas, reforçando a importância do manejo integrado das variáveis operacionais para o uso racional dos defensivos agrícolas e a sustentabilidade das

práticas fitossanitárias (SANTOS; SANTOS, 2023; VERMELHO et al., 2024).

A análise de regressão também revelou efeitos significativos da pressão e da interação entre pressão e velocidade sobre o D50 das gotas pulverizadas. O aumento da pressão resultou em um incremento significativo no D50 ($\beta = 0,36 \pm 0,17 \log \mu\text{m}$; $p = 0,032$, figura 8), indicando a formação de gotas maiores. A velocidade de deslocamento apresentou um efeito positivo marginalmente significativo ($\beta = 0,12 \pm 0,07 \log \mu\text{m}$; $p = 0,087$, figura 8), sugerindo uma tendência de aumento no diâmetro médio com velocidades mais elevadas. No entanto, a interação entre pressão e velocidade teve um efeito negativo significativo ($\beta = -0,06 \pm 0,03 \log \mu\text{m}$; $p = 0,032$, figura 8), indicando que o efeito da velocidade sobre o D50 varia conforme a pressão aplicada, visto que enquanto pressões mais altas resultaram em gotas maiores nas velocidades de 3 e 5 kmh⁻¹, esse mesmo efeito não foi observado nas velocidades de 7 e 9 kmh⁻¹ (Figura 8).

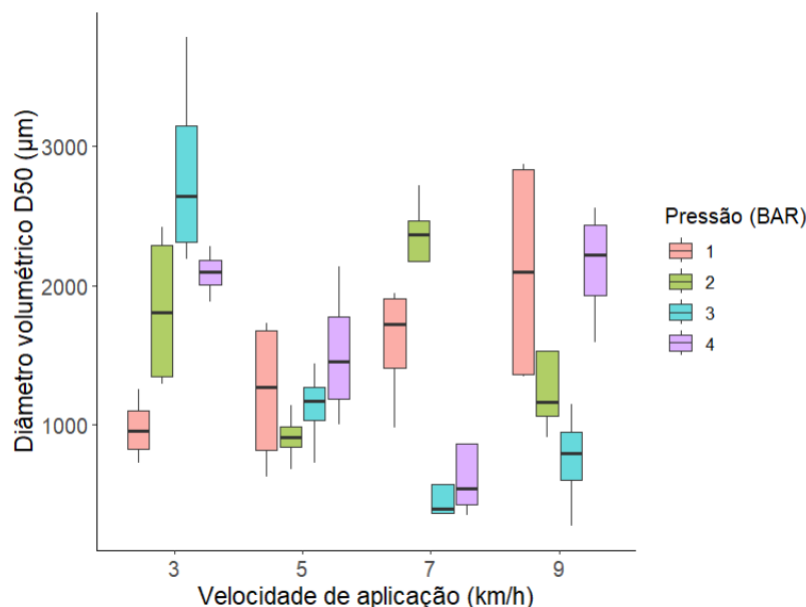


Figura 8. Distribuição do diâmetro volumétrico médio (D50, em μm) das gotas em diferentes velocidades de aplicação (kmh^{-1}) e pressões de trabalho (bar). Cada boxplot representa a dispersão dos valores de D50 para um determinado nível de pressão e velocidade, enquanto a coloração indica a pressão aplicada durante a pulverização.

A análise do D50 em função da velocidade de aplicação e pressão de pulverização revela tendências consistentes com estudos anteriores. Observa-se que, em velocidades mais baixas (3 kmh^{-1}), o aumento da pressão tende a gerar gotas maiores, possivelmente devido ao maior volume de calda e menor efeito de atomização causado pela baixa resistência do ar (NUYTTENS et al., 2007). Em velocidades intermediárias (5–7 kmh^{-1}), há maior variabilidade do D50 entre pressões, sugerindo que pequenas alterações na pressão podem ter efeito pronunciado sobre o tamanho das gotas, dependendo do balanço entre força de saída do bico e velocidade do ar. Já em velocidades mais

altas (9 kmh^{-1}), observa-se uma redução significativa do D50 em pressões mais elevadas, indicando que o aumento da velocidade do ar pode intensificar a quebra das gotas, reduzindo seu tamanho (ANTUNIASSI; BOLLER, 2019; CUNHA; TEIXEIRA, 2001; CUNHA; TEIXEIRA; VIEIRA, 2005).

Esses resultados corroboram a literatura que aponta a importância de equilibrar pressão e velocidade de aplicação para otimizar o tamanho das gotas e garantir eficiência na cobertura, minimizando tanto a deriva quanto o escorrimento (BAESSO et al., 2014). A grande variação observada em algumas combinações sugere que,

na prática, ajustes finos na pressão são necessários para cada velocidade de deslocamento, reforçando a utilidade de tabelas de calibração como ferramenta para o planejamento de pulverizações em campo.

Além disso, os dados indicam que pressões muito altas em velocidades baixas podem gerar gotas excessivamente grandes, reduzindo a cobertura uniforme, enquanto velocidades elevadas com baixa pressão tendem a produzir gotas muito pequenas, aumentando o risco de deriva (ANTUNIASSI; BOLLER, 2019; NUYTSENS et al., 2007). Portanto, a seleção adequada de parâmetros deve considerar não apenas o diâmetro médio das gotas, mas também a dispersão e uniformidade, que influenciam diretamente a eficácia da pulverização.

Conclusão

Os resultados demonstram que a pressão de pulverização e a velocidade de deslocamento influenciam de forma significativa e interdependente a qualidade da aplicação. O aumento da pressão elevou a vazão e a cobertura, mas reduziu a densidade de gotas, enquanto a velocidade afetou negativamente a vazão e modificou o efeito da pressão sobre a deposição. Em faixas moderadas, essas variáveis atuaram de forma aditiva, permitindo ajustes simples de calibração; entretanto, em condições extremas, suas interações alteraram o padrão de distribuição e tamanho das gotas, exigindo controle operacional mais preciso.

De modo geral, pressões intermediárias associadas a velocidades médias proporcionaram o melhor equilíbrio entre uniformidade, densidade e cobertura, garantindo maior eficiência e menor risco de deriva ou escorrimento. Esses achados reforçam a importância do manejo conjunto de parâmetros hidráulicos e operacionais na calibração dos pulverizadores, contribuindo para o uso racional de defensivos agrícolas e maior sustentabilidade das práticas fitossanitárias.

Referências

ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. Tecnologia de aplicação de defensivos: fundamentos e práticas. Botucatu: FEPAF, 2019.

BAESSO, M. M.; TEIXEIRA, M. M.; RUAS, R. A. A.; BAESSO, R. C. E. Tecnologias de aplicação de agrotóxicos. Revista Ceres, Viçosa, v. 61, p. 780–785, 2014.

BENASSI, B. J. P. M.; PEREIRA, G. do C.; ALMEIDA, G. R. R.; CUNHA, L. T. da. Influência da velocidade na pulverização foliar de produtos fitossanitários no cafeeiro. [Nome do Periódico], v. 3, n. 8, p. 395–396, 2019.

BOLLER, W.; MACHRY, M. Efeito da pressão de trabalho e de modelos de pontas de pulverização sobre a eficiência de herbicida de contato em soja. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p.

722–727, 2007.

BUOSI, G. G. P. et al. Droplet size and hydraulic spray nozzles in peanut plant spray deposition. Journal of Plant Diseases and Protection, v. 131, n. 1, p. 27–33, 2024. DOI: 10.1007/s41348-023-00796-8.

CERRUTO, E. et al. Modelling spray pressure effects on droplet size distribution from agricultural nozzles. Applied Sciences, v. 11, n. 19, 2021.

COSTA, A. G. F. et al. Efeito da intensidade do vento, da pressão e de pontas de pulverização na deriva de aplicações de herbicidas em pré-emergência. Planta Daninha, v. 25, n. 1, p. 203–210, 2007.

CUNHA, J. P. A. R. da; TEIXEIRA, M. M. Características técnicas de bicos de pulverização hidráulicos de jato plano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 5, n. 2, p. 334–348, 2001.

CUNHA, J. P. A. R.; TEIXEIRA, M. M.; COURRY, J. R.; FERREIRA, L. R. Avaliação de estratégias para redução da deriva de agrotóxicos em pulverizações hidráulicas. Planta Daninha, v. 21, n. 2, p. 325–332, 2003.

CUNHA, J. P. A. R. da; TEIXEIRA, M. M.; VIEIRA, R. F. Avaliação de pontas de pulverização hidráulicas na aplicação de fungicida em feijoeiro. Ciência Rural, v. 35, n. 5, p. 1069–1074, 2005.

CUNHA, J. P. A. R. da; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C. Avaliação do espectro de gotas de pontas de pulverização hidráulicas utilizando a técnica da difração do raio laser. Engenharia Agrícola, v. 27, p. 10–15, 2007.

DA CUNHA, J. P. A. R. Pesticide drift simulation under different spray conditions. Ciência e Agrotecnologia, v. 32, n. 5, p. 1616–1621, 2008.

DIERINGS, C. A. Impactos da velocidade de aplicação na distribuição de gotas em diferentes sistemas de pulverização na cultura da soja (*Glycine max* L.). 2020.

EMBRAPA. Gotas: programa de calibração de pulverização. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/1421/gotas---programa-de-calibracao-de-pulverizacao---gotas>

FRANÇA, J. A. L.; CUNHA, J. P. A. R.; ANTUNIASSI, U. R. Spectrum and velocity of droplets of spray nozzles with and without air induction under different pressures and flow rates. [Nome do Periódico], 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produto Interno Bruto – 2023. Rio de Janeiro, 2024.

JADAV, C. V.; JAIN, K. K.; KHODIFAD, B. C. Spray of chemicals as affected by different parameters of air assisted sprayer: a review. *Current Agriculture Research Journal*, v. 7, n. 3, p. 289–295, 2019.

KARADOL, H. et al. Field sprayer with application rate control using fast response proportional valves under variable speed conditions. *Agriculture*, v. 14, n. 3, 2024.

KRUGER, G. R. et al. Spray drift of pesticides. *Nebraska Extension*, 2019.

MARTIN, D. E. Flow variability of an aerial variable-rate nozzle at constant pressures. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 29, n. 4, p. 483–488, 2013.

MASCARA, I. Avaliação de deriva na pulverização agrícola. 2017.

MASSRUHÁ, S. M. F. et al. Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília: Embrapa, 2020.

MCGINTY, J. A. et al. Effects of spray pressure and nozzle type on droplet size distribution. [Nome do Periódico], 2019.

MOURA, G. S.; STRYHALSKI, J.; PAHOLSKI, A. Tecnologia de aplicação e seus impactos na eficiência da pulverização agrícola. 2020.

NUYTTENS, D. et al. Spray drift and droplet size distribution under different spray conditions. *Biosystems Engineering*, v. 97, n. 3, p. 333–345, 2007.

PEREIRA, G. C. et al. Efeitos da pressão de trabalho no espectro de gotas em pulverização agrícola. [Nome do Periódico], 2022.

QUIRINO, A. L. S. et al. Influência da pressão e do tipo de ponta na qualidade da pulverização. [Nome do Periódico], 2013.

RAETANO, C. G.; BAUER, F. C. Tecnologia de aplicação e eficiência de pulverização. 2003.

SANTOS, R. F.; SANTOS, L. C. Tecnologia de aplicação e sustentabilidade agrícola. 2023.

SCHNEIDER, R. et al. Influência da pressão de pulverização na deriva de gotas. [Nome do Periódico], 2013.

SOUZA, R. T.; CASTRO, V. L. S.; PALLADINI, L. A. Deriva de agrotóxicos: causas e consequências. [Nome do Periódico], 2007.

VARGAS, M. et al. Spray drift and operational parameters in hydraulic spraying systems. [Nome do Periódico], 2025.

VERMELHO, A. B. et al. Eficiência da aplicação de defensivos agrícolas e sustentabilidade. [Nome do Periódico], 2024.