

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

LAYANARA OLIVEIRA FARIA

**Otimização do depósito de pulverização no cafeeiro sob diferentes
condições operacionais**

Uberlândia-Minas Gerais-Brasil
2026

LAYANARA OLIVEIRA FARIA

Otimização do depósito de pulverização no cafeeiro sob diferentes condições operacionais

Tese apresentada ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial do Programa de Pós-graduação em Agronomia para obtenção do título de doutor em Agronomia.

Área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Cleyton Batista de Alvarenga

Coorientadora: Profa. Dra. Paula Cristina Natalino Rinaldi

Uberlândia-Minas Gerais-Brasil
2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F224 2026	Faria, Layanara Oliveira, 1994- Otimização do depósito de pulverização no cafeeiro sob diferentes condições operacionais [recurso eletrônico] / Layanara Oliveira Faria. - 2026. Orientador: Cleyton Batista de Alvarenga Alvarenga. Coorientadora: Paula Cristina Natalino Rinaldi Rinaldi . Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós- graduação em Agronomia. Modo de acesso: Internet. DOI http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.399 Inclui bibliografia. 1. Agronomia. I. Alvarenga, Cleyton Batista de Alvarenga, 1981-, (Orient.). II. , Paula Cristina Natalino Rinaldi Rinaldi, 1981-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Agronomia. IV. Título. CDU: 631
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Secretaria da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em
Agronomia

Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP
38400-902

Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppgagro.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Tese, 010/2026, PPGAGRO				
Data:	Trinta de abril de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	12123AGR010				
Nome do Discente:	Layanara Oliveira Faria				
Título do Trabalho:	Otimização do depósito de pulverização no cafeeiro sob diferentes condições operacionais				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: João Paulo Arantes Rodrigues da Cunha - UFU; Paula Cristina Natalino Rinaldi - UFU; Marconi Ribeiro Furtado Júnior - UFV, Charles Cardoso Santana - EPAMIG ITAP; Cleyton Batista de Alvarenga - UFU orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Cleyton Batista de Alvarenga, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada.

Essa tese possui mérito para ser indicada como destaque do Programa? (x) SIM
NÃO ()

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação

interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Cleyton Batista de Alvarenga, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2026, às 12:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paula Cristina Natalino Rinaldi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2026, às 12:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Paulo Arantes Rodrigues da Cunha, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2026, às 12:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marconi Ribeiro Furtado Júnior, Usuário Externo**, em 30/04/2026, às 19:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Charles Cardoso Santana, Usuário Externo**, em 30/04/2026, às 19:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7269211** e o código CRC **AB9BD07E**.

**Dedico este trabalho à Aurora Faria Mello,
minha querida e amada filha, minha luz.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu grande Deus, por toda força, saúde, sabedoria, paciência e bençãos concedidas ao longo dessa jornada. Por fortalecer minha fé e me amparar em cada desafio.

Ao meu querido esposo, Matheus Correa de Mello, por todo incentivo e paciência. Obrigada por dedicar suas férias para me ajudar na condução do experimento, por me fazer sorrir e me motivar quando eu estive cansada.

À minha filha, melhor amiga e companheira, Aurora Faria Mello. Obrigada por me presentear todos os dias com seus sorrisos, com seu carinho e com o amor mais puro do mundo. Cada momento que passamos juntas foi o combustível das minhas madrugadas em claro. Agradeço também por sua paciência em ficar algumas vezes ao redor dos meus pés, folheando fotografias enquanto eu escrevia. Paciência, que na verdade é um disfarce de toda sua curiosidade.

Ao meu orientador, prof. Dr. Cleyton Batista Alvarenga, pela dedicação e compromisso na orientação deste trabalho. Pelas correções, pelos ensinamentos, pela disposição de ajudar em campo, pelo apoio ao longo da jornada e por toda paciência.

Aos profs. Drs. membros da banca João Paulo Arantes Rodrigues da Cunha, Marconi Ribeiro Furtado Júnior, Charles Cardoso Santana e à coorientadora Paula Cristina Natalino Rinaldi pelas correções e contribuições.

Ao Dr. Fábio Janoni Carvalho, pela disponibilidade e paciência em auxiliar nas análises estatísticas.

Aos colegas Gustavo Ribeiro, Daniel Barbosa, Luana Lopes e, especialmente, ao técnico do Laboratório de Máquinas e Mecanização do campus Monte Carmelo, Dr. Renan Zampiroli, pela imensa contribuição na execução, nas avaliações e na construção de ideias deste trabalho. Obrigada por todo apoio e por tornarem os dias de campo e de laboratório mais leves.

Ao proprietário da Fazenda Jataí em Monte Carmelo-MG Gustavo Mundim e aos funcionários, que disponibilizaram a área, o maquinário e materiais necessários para a realização deste trabalho.

A todos meus professores e colegas de pós-graduação que caminharam comigo durante esse período, agregando conhecimentos e contribuindo para a minha formação profissional.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia, ao colegiado e às secretárias, pela disponibilidade, pelos esclarecimentos e pela compreensão ao longo do meu doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação e para a execução deste trabalho, deixo meu sincero agradecimento.

Muito obrigada!

"Seja forte e corajoso!" (JOSUÉ, 1:9)

RESUMO GERAL

FARIA, LAYANARA OLIVEIRA. **Otimização do depósito de pulverização no cafeeiro sob diferentes condições operacionais.** 2026. 113f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2026.

A pulverização assistida por ar é amplamente utilizada no manejo fitossanitário do café (*Coffea arabica* L.), porém enfrenta limitações importantes. A arquitetura complexa da planta, a variabilidade da orientação de ramos e folhas e a dependência do fluxo de ar dificultam a distribuição precisa e uniforme das gotas, podendo comprometer a eficácia do controle fitossanitário e gerar impactos ambientais. A pulverização assistida por ar deposita parte das gotas na área alvo de aplicação (fração referência), enquanto outra parte atravessa a copa, impulsionada pelo fluxo de ar (fração transpasse). Nesse contexto, aprofundar o conhecimento sobre a deposição de gotas em culturas arbóreas, por meio da análise da produção científica, e compreender como os parâmetros operacionais influenciam o depósito em frações da área pulverizada e ao longo do dossel, torna-se essencial para subsidiar estudos futuros e o desenvolvimento de estratégias de pulverização mais eficazes e sustentáveis. Portanto, o presente trabalho objetivou: (i) analisar a produção científica sobre o depósito de calda em culturas perenes por meio da cienciometria; (ii) determinar o depósito, nas frações da área pulverizada, utilizando pulverizador assistido por ar, considerando diferentes taxas de aplicação e tipos de pontas; e (iii) determinar o depósito, nas frações da área pulverizada, especialmente em superfícies foliares (adaxial e abaxial) do cafeeiro, sob diferentes ângulos de pulverização em lados da rua de aplicação. A análise da produção científica foi conduzida por meio de cienciometria, com auxílio dos softwares Bibliometrix e VOSviewer. Utilizou-se a base de dados Web of Science para busca de documentos, com definição prévia de termos-chave e aplicação de filtros. Os registros recuperados foram exportados com informações completas e submetidos a análises quantitativas, como número de publicações por ano, periódicos mais produtivos, autores e instituições mais frequentes, número de citações, além de palavras-chave e redes de coautoria. Para determinar o depósito ambos os experimentos de campo, adotaram o esquema fatorial 3 x 2. No primeiro ensaio, os fatores foram três taxas de aplicação (200, 400, 600 L ha⁻¹) e dois tipos de ponta de pulverização (cônico vazio e leque plano), com quatro repetições. O depósito foi quantificado em dois lados de aplicação (esquerdo e direito da rua de aplicação), três terços da planta (superior, mediano e inferior) e duas posições do ramo plagiotrópico (interno e externo). No segundo ensaio, os fatores foram três diferentes ângulos de jato de pulverização (ângulos variados ao longo do ramal (40°-60°-90°), ângulos fixos de 80° e 90°) e dois lados de aplicação (esquerdo e direito da rua de aplicação). A deposição foi quantificada nos três terços da planta (superior, mediano e inferior) e nas superfícies foliares abaxial e adaxial. O depósito foi determinado por meio de traçador adicionado à calda de pulverização, sendo a leitura realizada por espectrofotometria. As medidas em lados de aplicação, terços da planta e posições do ramo foram aninhadas. Devido à complexidade experimental, os dados foram analisados por modelos lineares mistos, com comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), em software RStudio. A análise cienciométrica evidenciou crescimento de estudos sobre deposição em culturas arbóreas, porém ainda existem lacunas quanto à avaliação em alvos naturais e em superfícies foliares, além da necessidade de tecnologias inteligentes para a otimização da pulverização nessas culturas. Os ensaios de depósito em frações da área pulverizada evidenciaram que, na taxa de aplicação de 200 L ha⁻¹, a ponta de jato cônico vazio proporcionou maior depósito na fração referência e reduziu o depósito na fração transpasse, enquanto a ponta de jato plano promoveu incremento do depósito na fração transpasse, indicando maior passagem de calda através do dossel. O ângulo de jato 90° proporcionou maior deposição e melhor uniformidade, porém aumentou as perdas por

transpasse. Em contraste, o ângulo de 80° demonstrou maior retenção da calda na área alvo, embora com redução da uniformidade. A combinação de ângulos (40°-90°-60°), apesar de mais heterogênea, mostrou alternativa para aplicações verticalmente direcionadas. A face abaxial da folha recebe maior deposição de gotas no terço superior da planta, enquanto na face adaxial apresenta maior depósito no terço inferior. O maior acúmulo de gotas em posições internas e as diferenças entre lados de aplicação evidenciam a influência da arquitetura da planta e da assimetria do fluxo de ar sobre a distribuição espacial das gotas. Estima-se que entre 20 e 30% do traçador ultrapassou a área alvo, caracterizando perdas por transpasse. Esses resultados indicam a necessidade de otimizar parâmetros operacionais e do direcionamento da pulverização, a fim de aumentar a eficiência e reduzir perdas de produto no manejo fitossanitário do café.

Palavras-chave: Tecnologia de aplicação; turbo atomizadores; deposição uniforme; deriva.

GENERAL ABSTRACT

FARIA, LAYANARA OLIVEIRA. **Optimization of spray deposition in coffee crops under different operational conditions.** 2026. 113f. Thesis (Doctorate in Agronomy) – Institute of Agricultural Sciences, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2026.

Air-assisted spraying is widely used in the phytosanitary management of coffee (*Coffea arabica* L.), but it faces significant limitations. The complex architecture of the plant, the variability in the orientation of branches and leaves, and the dependence on airflow make precise and uniform droplet distribution difficult, potentially compromising the effectiveness of phytosanitary control and generating environmental impacts. Air-assisted spraying deposits part of the droplets in the target application area (reference fraction), while another part passes through the canopy, propelled by the airflow (pass-through fraction). In this context, deepening the knowledge about droplet deposition in tree crops, through the analysis of scientific production and understanding how operational parameters influence deposition, in fractions of the sprayed area and along the canopy, becomes essential to support future studies and the development of more effective and sustainable spraying strategies. Therefore, this work aimed to: (i) to analyze the scientific production on spray deposition in perennial crops using scientometrics; (ii) to determine the deposit in the fractions of the sprayed area using an air-assisted sprayer, considering different application rates and nozzle types; and (iii) to determine the deposit in the fractions of the sprayed area, especially on leaf surfaces (adaxial and abaxial) of coffee plants, under different spray angles on different sides of the application row. The analysis of scientific production was conducted using scientometrics, with the aid of Bibliometrix and VOSviewer software. The Web of Science database was used to search for documents, with prior definition of keywords and application of filters. The retrieved records were exported with complete information and subjected to quantitative analyses, such as number of publications per year, most productive journals, most frequent authors and institutions, number of citations, as well as keywords and co-authorship networks. To determine the deposition in fractions of the sprayed area, both field experiments adopted a 3 x 2 factorial design. In the first trial, the factors were three application rates (200, 400, 600 L ha⁻¹) and two spray nozzle types (hollow cone and flat fan), with four replications. The deposition was quantified on two application sides (left and right of the application row), three thirds of the plant (upper, middle, and lower), and two positions of the plagiotropic branch (inner and outer). In the second trial, the factors were three different spray jet angles (varying angles along the branch 40°-60°-90°, fixed angles of 80° and 90°) and two application sides (left and right of the application row). Deposition was quantified on the three thirds of the plant (upper, middle, and lower) and on the abaxial and adaxial leaf surfaces. The deposition was determined by adding a tracer to the spray solution, with readings taken by spectrophotometry. Measurements on application sides, plant thirds, and branch positions were nested. Due to the experimental complexity, the data were analyzed using linear mixed models, with mean comparisons using Tukey's test ($p < 0.05$) in RStudio software. The scientometric analysis revealed a growth in studies on deposition in tree crops; however, gaps remain regarding evaluation on natural targets and leaf surfaces, as well as the need for intelligent technologies to optimize spraying in these crops. Deposition tests in fractions of the sprayed area showed that, at an application rate of 200 L ha⁻¹, the hollow cone nozzle provided greater deposition in the reference fraction and reduced deposition in the overlap fraction, while the flat fan nozzle increased deposition in the overlap fraction, indicating greater spray passage through the canopy. A 90° spray angle provided greater deposition and better uniformity, but increased losses due to overlap. In contrast, an 80° angle demonstrated greater retention of the spray solution in the target area, although with reduced uniformity. The combination of angles (40°-90°-60°), although more heterogeneous, showed an alternative for vertically directed

applications. The abaxial surface of the leaf receives greater droplet deposition in the upper third of the plant, while on the adaxial surface greater deposition occurs in the lower third. The greater accumulation of droplets in internal positions and the differences between application sides highlight the influence of plant architecture and airflow asymmetry on the spatial distribution of droplets. It is estimated that between 20 and 30% of the tracer exceeded the target area, resulting in losses due to overlap. These results indicate the need to optimize operational parameters and spray direction to increase efficiency and reduce product losses in phytosanitary management.

Keywords: Application technology; air-assisted sprayers; uniform deposition; drift.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo II - Análise cienciométrica da deposição de gotas de pulverização assistida por ar em culturas arbóreas: tendências, lacunas e perspectivas de pesquisa

Figura 1. Publicações anuais sobre depósito de pulverização em culturas perenes em periódicos indexados à base Web of Science.....	35
Figura 2. Principais periódicos e número de publicações sobre depósito de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science.	36
Figura 3. Autores mais produtivos em publicação sobre depósito de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science.....	37
Figura 4. Frequência de afiliações por país de em estudos sobre depósito de gotas pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science..	38
Figura 5. Rede de coocorrência de palavras-chave sobre depósito de gotas de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science.	41
Figura 6. Rede de coautoria em publicações sobre depósito de pulverização em culturas perenes.	40
Figura 7. Tendência anual de publicações e países que pesquisam sobre depósito de pulverização em face abaxial de culturas perenes.....	43
Figura 8. Palavras mais frequentes sobre deposição de gotas de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science.....	44

Capítulo III - Deposição e transpasse de gotas no cafeeiro: interação entre taxa de aplicação e pontas de pulverização

Figura 1. Experimento em campo, destacando as áreas de cada tratamento, área útil central, as bordaduras utilizadas para o controle de contaminação entre tratamentos e direção de aplicação e do vento.....	58
Figura 2. Ilustração da pulverização usando um turbo atomizador.....	59
Figura 3. Representação detalhada dos alvos de amostragem na cultura do café, definindo o depósito referência (coletado na rua de aplicação) e o depósito transpasse (coletado em parte da rua adjacente, correspondendo à fração $\frac{1}{2}$ da área pulverizada)..	59
Figura 4. Procedimento de alinhamento vertical das pontas de pulverização em relação à arquitetura da planta de café, utilizando a altura da planta (A) e a distância do arco ao centro do dossel (D) como referências..	62

Figura 5. Otimização do padrão de deposição para pontas de jato plano: ajuste angular de 15° para prevenir a distorção do jato e assegurar a uniformidade da distribuição ao longo do arco de pulverização.....	62
Figura 6. Representação esquemática da aplicação em passada única do turbo atomizador em cafeeiro, método utilizado para avaliar o depósito de gotas em frações da área pulverizada....	63
Figura 7. Estrutura de amostragem hierárquica na planta de café, ilustrando os pontos de coleta nos terços do dossel (superior, mediano, inferior) e nas posições do ramo (interno, externo) em ambas as frações da área pulverizada.	64
Gráfico 1. Calibração espectrofotométrica do traçador utilizada para determinar a concentração das amostras.....	65
Figura 8. Depósito de traçador em fração referência sob taxa de aplicação e tipo de ponta no cafeeiro.	67
Figura 9. Depósito de traçador em fração referência em posições do ramo plagiotrópico do cafeeiro..	68
Figura 10. Distribuição espacial do depósito de traçador em fração referência, nos diferentes terços do cafeeiro e em lados de aplicação, em função das taxas de aplicação.....	708
Figura 11. Depósito de traçador em fração transpasse, utilizando diferentes tipos de pontas e taxas de aplicação em cafeeiro, em lados de aplicação.	72
Figura 12. Depósito em fração transpasse em função dos tipos de pontas e taxas de aplicação nas posições interna e externa do ramo plagiotrópico do cafeeiro.	74

Capítulo IV- Distribuição e eficiência da deposição no cafeeiro sob diferentes ângulos de jato de pulverização em lados de aplicação

Figura 1. Representação esquemática do tratamento de ângulos combinados (40°-90°-60°) detalhando a disposição espacial das pontas de pulverização ao longo do ramal vertical do pulverizador.	892
Figura 2. Esquema da parcela experimental, indicando a área útil de amostragem e as bordaduras utilizadas para o controle de contaminação entre tratamentos.....	92
Figura 3. Representação esquemática, em uma vista de seção transversal da linha do cafeeiro, definindo as frações referência e transpasse	91
Figura 4. Ilustração da área de aplicação para avaliação do depósito em frações da área pulverizada em cafeeiro.....	92

Figura 5. Representação esquemática da estratificação espacial da amostragem foliar, indicando os pontos de amostragem: terços do dossel, posições no ramo plagiotrópico e frações de deposição.	93
Foto 1 - Imagem da fita aderida em faces foliares do cafeeiro.....	94
Figura 6. Variação do depósito na fração referência em função dos diferentes ângulos de pulverização nos lados de aplicação, em diferentes terços do cafeeiro.....	97
Figura 7. Distribuição do depósito na fração referência em função dos diferentes ângulos de pulverização, nos diferentes terços do cafeeiro e em posições do ramo plagiotrópico do cafeeiro.	99
Figura 8. Depósito na fração transpasse em função dos diferentes ângulos de pulverização em lados de aplicação.....	101
Figura 9. Variação do depósito em superfície adaxial da folha, na fração referência, sob dos diferentes ângulos de pulverização e lados de aplicação, nos diferentes terços do cafeeiro ..	103
Figura 10. Depósito em superfície abaxial da folha, na fração referência, sob diferentes ângulos de pulverização e lados de aplicação, nos diferentes terços do cafeeiro.	104
Figura 11. Análise da distribuição do depósito entre as superfícies foliares na fração transpasse.	106

LISTA DE TABELAS

Capítulo II - Análise cienciométrica da deposição de gotas de pulverização assistida por ar em culturas arbóreas: tendências, lacunas e perspectivas de pesquisa

Tabela 1. Critérios para seleção de documentos usados no estudo cienciométrico.	34
Tabela 2. Documentos mais citados sobre depósito de pulverização em culturas perenes, com base em dados da base Web of Science.....	40
Tabela 3. Documentos sobre depósito de pulverização em faces foliares e o total de citações.	45

Capítulo III - Deposição e transpasse de gotas no cafeeiro: interação entre taxa de aplicação e pontas de pulverização

Tabela 1. Descrição dos tratamentos com respectiva condição operacional.....	61
--	----

Capítulo IV - Distribuição e eficiência da deposição no cafeeiro sob diferentes ângulos de jato de pulverização em lados de aplicação

Tabela 1. Especificações das pontas usadas de acordo com fabricante, configurações e aplicação prática.....	89
---	----

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	19
1 INTRODUÇÃO GERAL	19
2 OBJETIVO	23
2.1 OBJETIVO GERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
CAPÍTULO II.....	28
RESUMO.....	29
ABSTRACT	30
1 INTRODUÇÃO	31
2 MATERIAL E MÉTODOS	33
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1 Depósito de gotas de pulverização em culturas perenes.....	35
3.2 Depósito de gotas de pulverização em face foliar abaxial de culturas perenes ...	42
4 CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
CAPÍTULO III	51
RESUMO.....	52
1 INTRODUÇÃO	54
2 MATERIAL E MÉTODOS	57
2.1 Local experimental	57
2.2 Caracterização da lavoura.....	57
2.3 Arranjo experimental	57
2.4 Variáveis de estudo	58
2.5 Composição da calda e condições de aplicação.....	59
2.6 Maquinário utilizado, regulagem e calibração.....	60
2.7 Esquema de aplicação e coleta das amostras	63
2.8 Determinação da deposição do traçador	64
2.9 Análises estatísticas	65
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
3.1 Depósito na fração referência	67
3.2 Depósito na fração transpasse.....	72
4 CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

CAPÍTULO IV.....	83
1 INTRODUÇÃO	86
2 MATERIAL E MÉTODOS	88
2.1 Local experimental	88
2.2 Caracterização da lavoura	88
2.3 Arranjo experimental	88
2.4 Variáveis de estudo	90
2.5 Composição da calda e condições de aplicação.....	91
2.6 Maquinário utilizado, regulagem e calibração.....	91
2.7 Esquema de aplicação e coleta das amostras	92
2.8 Determinação do depósito do traçador	94
2.9 Análises estatísticas	95
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
3.1 Depósito total de fração referência	97
3.2 Depósito total de fração transpasse.....	100
3.3 Depósito de fração referência em faces foliares	102
3.4 Depósito de fração transpasse em faces foliares.....	105
4 CONCLUSÕES.....	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO GERAL

O café (*Coffea arabica* L.) é uma *commodity* global de grande relevância comercial, cultural e histórica para o Brasil, que se mantém como o maior produtor e exportador mundial (Bobato, 2025). Para a safra 2025, a produção nacional foi estimada em 56,5 milhões de sacas, e em 2024 o país registrou volume recorde de exportações, com 50,5 milhões de sacas destinadas ao mercado externo. Em 2025, a área total cultivada alcançou 2,26 milhões de hectares, dos quais 1,4 milhão se concentra em Minas Gerais, principal estado produtor (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2025).

A cadeia produtiva do café é complexa e está em constante expansão. Além de ser a segunda bebida mais consumida no mundo, seus subprodutos apresentam elevado potencial para a bioeconomia, com aplicações na produção de biogás, biocombustíveis, bioenergia, filtros orgânicos, biochars e diversos produtos de alto valor agregado (Foresti Junior *et al.*, 2023; Mahmoud; Atabani; Badruddin, 2022). Nesse cenário, o manejo eficiente da cultura é essencial para manter a produtividade, a qualidade do produto e a competitividade do país no mercado internacional.

Apesar de o Brasil apresentar a maior área cultivada e a melhor estrutura entre os países produtores, sua eficiência técnica ainda se mantém abaixo do esperado (Bozzola *et al.*, 2021; Marcomini, 2023). Cerca de 80% da produção mundial é realizada por agricultores familiares, o que contribui para a adoção mais lenta de tecnologias em comparação com outras culturas (Santana *et al.*, 2022). Mesmo com o avanço de técnicas de pulverização para culturas perenes (Wei *et al.*, 2023), grande parte da cafeicultura brasileira ainda utiliza equipamentos de baixa tecnologia. Essa realidade é influenciada por fatores como o alto custo de aquisição, a necessidade de mão de obra qualificada, a predominância de pequenas e médias propriedades, a topografia desafiadora e a ausência de incentivos específicos (Silva; Pinto, 2024).

Em culturas arbóreas de alta densidade foliar, como o cafeeiro, a aplicação eficaz de produtos fitossanitários é complexa. Assim, pulverizadores de jato de ar são amplamente utilizados, pois o ventilador axial fornece alta velocidade de ar, promovendo movimentação foliar e atuando como um transportador das gotas de pulverização, melhorando a penetração, cobertura e deposição em diferentes regiões da copa (Garcera *et al.*, 2022; Ru *et al.*, 2023; Warneke; Nackley; Pscheidt, 2024; Womac *et al.*, 2022). Entretanto, muitos pulverizadores

comercializados apresentam capacidade limitada de ajuste do fluxo de ar, levando produtores a utilizarem configuração padrão com maior volume de ar na tentativa de alcançar partes internas e melhorar a uniformidade de deposição (Carvalho *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2023). Assim, o ajuste adequado do fluxo de ar de acordo com as características da copa nem sempre é realizado, resultando em pulverizações que derivam para fora da faixa desejada.

A ausência de orientações precisas para o ajuste dos parâmetros de pulverização contribui para o desperdício de produtos e impactos ambientais. Quando a energia do ar é insuficiente, o fluxo não transpõe a barreira foliar e as gotas não atingem adequadamente o alvo, resultando em um controle ineficaz. Por outro lado, o excesso de energia lança gotas para além da faixa desejada, aumentando perdas e risco de deriva, que embora não possa ser eliminada, pode ser mitigada por meio de técnicas adequadas. Assim, ajustar corretamente os parâmetros operacionais é fundamental para otimizar as aplicações (Deveau; Ledebuhr; Maketelow, 2021; Gu *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2023). Entre esses parâmetros, a taxa de aplicação e a seleção de pontas continuam sendo estratégias essenciais para maximizar a eficácia dos tratamentos e melhorar a relação custo-benefício (Warneke; Nackley; Pscheidt, 2024). No cafeeiro, entretanto, informações sobre a taxa de aplicação ainda são imprecisas, levando muitos produtores a utilizarem taxas elevadas na tentativa de garantir um controle considerado eficiente (Fessler *et al.*, 2020).

A taxa de aplicação é um dos principais pontos de atenção na tecnologia de aplicação para culturas arbóreas, pois influencia diretamente a cobertura do dossel e o potencial de redução de perdas (Cunha; Sirqueira; Hurtado, 2019; Virk; Prostko, 2022). Embora o aumento do volume seja frequentemente adotado como estratégia para melhorar a deposição em partes internas e superiores da planta, essa prática pode resultar em acúmulo excessivo de gotículas em regiões mais externas e/ou inferiores do dossel (Appah *et al.*, 2019; Godoy-Nieto *et al.*, 2022). Como consequência, ocorre uma distribuição espacial heterogênea da calda, com áreas simultaneamente sobredosadas e subdosadas, comprometendo a uniformidade e a qualidade da aplicação (Lipiński *et al.*, 2022). Essa imprecisão na dose tem implicações diretas no manejo fitossanitário, uma vez que volumes excessivos favorecem a seleção de indivíduos resistentes, enquanto exposições subletais estimulam ressurgimento de pragas por hormólise, intensificando o problema ao longo do tempo (Balci, 2023; Carreira; Silva, 2022).

Outro fator relevante na tecnologia de aplicação refere-se à seleção de pontas de pulverização. Embora esse parâmetro exerça influência sobre a qualidade da aplicação, ajustes e alterações de pontas ainda não constituem prática comum em culturas perenes, evidenciando

a necessidade de maior aprofundamento científico (Virk; Prostko, 2022). As pontas são responsáveis pelo processo de atomização do líquido, determinando características fundamentais da pulverização, como vazão, ângulo de abertura do jato e espectro de gotas. Essas variáveis, por sua vez, influenciam o transporte, a penetração e a deposição das gotas no dossel. Assim, a seleção adequada de pontas contribui para otimizar a distribuição da calda e a aumentar a taxa de utilização efetiva de pesticidas (Choudhary, 2023; Li *et al.*, 2023).

A otimização de parâmetros operacionais permanece um dos principais determinantes para a eficiência da proteção fitossanitária no cafeeiro, visto que diferentes condições influenciam significativamente a deposição das gotas, variável de grande importância no controle de pragas e doenças (Yuan *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2023). Como exposto, as culturas perenes enfrentam inconsistência de deposição ao longo do dossel (Cui *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2022). No cafeeiro, essa limitação é agravada pela presença de pragas que apresentam preferência pela superfície abaxial das folhas, região que normalmente recebe menor deposição. Dessa forma, estudos que busquem compreender a pulverização assistida por ar e sua influência na deposição ao longo da copa e em ambas as superfícies foliares são essenciais para garantir uniformidade, reduzir as perdas por deriva e promover um controle efetivo (Li *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2025).

Embora haja avanços nas pesquisas sobre tecnologias de aplicação, o conhecimento sobre pulverização em culturas perenes ainda é limitado e apresenta lacunas importantes (Li *et al.*, 2023; Privitera *et al.*, 2023), especialmente no cafeeiro. Li *et al.* (2022) ressaltam a necessidade de aprofundar estudos sobre deposição no dossel de culturas arbóreas e Wang *et al.* (2025) destacam a importância de compreender as relações entre parâmetros de aplicação e a distribuição do depósito, principalmente na superfície abaxial. Nesse sentido, torna-se fundamental identificar tendências, lacunas científicas e mapear a evolução dos estudos, de modo a subsidiar e orientar o desenvolvimento de experimentos voltados à otimização da deposição.

Na cafeicultura, a pulverização assistida por ar frequentemente promove a deposição de parte das gotas no lado da planta voltado para a aplicação (área alvo), enquanto outra parte, impulsionada pelo fluxo de ar do ventilador, atravessa a copa, atingindo o lado oposto da planta e até mesmo linhas adjacentes. Esse deslocamento pode ser potencializado por diferentes condições operacionais, afetando de forma significativa o depósito em diferentes regiões da copa e resultando em áreas com déficit de produto ou sobredose. Apesar da relevância desse processo para a uniformidade e eficiência da aplicação, estudos que quantificam o depósito

excedente à faixa de aplicação no cafeeiro (fração denominada neste trabalho como transpasse), bem como a deposição na face abaxial das folhas, ainda são escassos.

Compreender a distribuição do depósito e quantificá-lo em frações da área pulverizada e em superfícies foliares, sob diferentes condições operacionais, como taxa de aplicação, tipo de ponta e ângulo do jato de pulverização, é fundamental para orientar ajustes técnicos que promovam maior eficiência no controle fitossanitário, uso racional de produtos, redução de custos e mitigação de riscos ambientais. Assim, parte-se da hipótese de que a dinâmica de deposição em pulverizações assistidas por ar no cafeeiro é determinada pela interação entre parâmetros operacionais e arquitetura da planta. Especificamente, supõe-se que variações na taxa de aplicação, na seleção de pontas e nos ângulos de jato de pulverização alteram o transporte, a penetração e a distribuição das gotas, resultando em variabilidade espacial do depósito entre frações da área pulverizada, superfícies foliares e posições do dossel.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Quantificar e analisar a distribuição espacial do depósito de gotas da pulverização assistida por ar no cafeeiro, em frações da área pulverizada, sob diferentes condições operacionais, visando à otimização da eficiência de deposição e à redução de perdas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a produção científica sobre o depósito de gotas de pulverização em culturas perenes e em superfícies foliares, por meio da cienciometria, visando identificar tendências e lacunas de pesquisa;
- Determinar o depósito de gotas em frações da área pulverizada no cafeeiro, utilizando pulverização assistida por ar, sob diferentes taxas de aplicação e tipos de ponta de pulverização;
- Determinar o depósito de gotas em frações da área pulverizada, nas superfícies foliares (adaxial e abaxial) do cafeeiro, sob diferentes ângulos de pulverização, considerando os lados da rua de aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPAH, S.; WANG, P.; OU, M.; GONG, C.; JIA, W. Review of electrostatic system parameters, charged droplets characteristics and substrate impact behavior from pesticides spraying. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 12, n. 2, p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191202.4673>
- BALCI, M. H; AY, R. Effects of some insecticides on the biological parameters of *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae). **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 43, n. 2, p. 485-493, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42690-023-00959-y>
- BOBATO, Z. L. Do território à commodity: a reestruturação da cafeicultura brasileira e a geografia dos preços (1950-2025). **Geographia Opportuno Tempore**, v. 11, n. 1, p. e53349, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5433/got.2025.v11.53349>
- BOZZOLA, M.; CHARLES, S.; FERRETTI, T.; GERAKARI, E.; MANSON, H.; ROSSER, N.; GOLTZ, P. **The coffee guide**. 4. ed. Geneva: International Trade Centre, 2021. 343 p. Disponível em: <https://www.intracen.org/file/itccoffeeupdated301122-webpdf> Acesso em: 23 nov. 2025.
- CARREIRA, V. S.; SILVA, R. P. Rate errors in sprayer turning and circular movements: PWM valve as compensation system and why spray boom size matters. **Crop Protection**, v. 151, p. 105835, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105835>
- CARVALHO, F. K; MOTA, A. A. B; CHECHETTO, R.G.; ANTUNIASSI, U. R. **Entendendo a tecnologia de aplicação: turbo pulverizadores**. Botucatu: FEPAF, 2023. 92 p.
- CHOUDHARY, M. K.; KUMAR, M.; CARPENTER, G.; RANI, A.; JATAV, M. S.; THOMAS, E. V. Investigation of Nozzle Characteristics for a Hollow Cone Nozzle in Spray Patternator. **An International Journal**, v. 15, n. 1, p. 638-642, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net> Acesso em: 15 out. 2025.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de café**. Brasília, DF, v. 12, n. 4, 4º levantamento, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br> Acesso em: 15 out. 2025.
- CUI, H.; WANG, C.; YU, S.; XIN, Z.; LIU, X.; YUAN, J. Two-stage CFD simulation of droplet deposition on deformed leaves of cotton canopy in air-assisted spraying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 224, p. 109228, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109228>
- CUNHA, J. P. A. R.; SIRQUEIRA, M. A.; HURTADO, S. Estimating vegetation volume of coffee crops using images from unmanned aerial vehicles. **Engenharia Agrícola**, v. 39, p. 41-47, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep41-47/2019>
- DEVEAU, J.; LEDEBUHR, M.; MAKETELow, D. **Airblast 101: your guide to effective and efficient spraying**. 2. ed. Ontário, 2021. 305 p.

- FESSLER, L.; FULCHER, A.; LOCKWOOD, D.; WRIGHT, W.; ZHU, H. Advancing sustainability in tree crop pest management: Refining spray application rate with a laser-guided variable-rate sprayer in apple orchards. **HortScience**, v. 55, n. 9, p. 1522-1530, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15056-20>
- FORESTI JUNIOR, M. P.; SIQUEIRA, J. C.; SOUZA, A. R.; MATOS, M. P.; FIA, R. Use of by-products generated in the processing of coffee berries: A review. **Coffee Science**, v. 18, p. e182101, 2023. DOI: <https://doi.org/10.25186/v18i.2101>
- GARCERA, C.; MOLTÓ, E.; IZQUIERDO, H.; BALSARI, P.; MARUCCO, P.; GRELLA, M.; GIOELLI, F.; CHUECA, P. Effect of the airblast settings on the vertical spray profile: implementation on an on-line decision aid for citrus treatments. **Agronomy**, v. 12, n. 6, p. 1462, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061462>
- GODOY-NIETO, A.; MIRANDA-FUENTES, A.; GRELLA, M.; BLANCO-ROLDÁN, G. L.; RODRÍGUEZ-LIZANA, A.; GIL-RIBES, J. A. Assessment of spray deposit and loss in traditional and intensive olive orchards with conventional and crop-adapted sprayers. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1764, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081764>
- GU, C.; ZOU, W.; WANG, X.; CHEN, L.; ZHAI, C. Wind loss model for the thick canopies of orchard trees based on accurate variable spraying. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1010540, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1010540>
- LI, S.; LI, J.; YU, S.; WANG, P.; LIU, H.; YANG, X. Anti-drift technology Progress of plant protection applied to orchards: A review. **Agronomy**, v. 13, n. 11, p. 2679, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13112679>
- LI, T.; QI, P.; WANG, Z.; XU, S.; HUANG, Z.; HAN, L.; HE, X. Evaluation of the Effects of Airflow Distribution Patterns on Deposit Coverage and Spray Penetration in Multi-Unit Air-Assisted Sprayer. **Agronomy**, v. 12, n. 4, p. 944, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12040944>
- LIPÍŃSKI, A. J.; LIPÍŃSKI, S.; BURG, P.; SOBOTKA, S. M. Influence of the instability of the field crop sprayer boom on the spraying uniformity. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, p. 100432, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100432>
- LIU, Z.; CHEN, J.; GUO, J.; QIU, B. Numerical simulation and validation of droplet deposition on tomato leaf surface under air-assisted spraying. **Agronomy**, v. 14, n. 8, p. 1661, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14081661>
- MAHMOUD, E.; ATABANI, A. E.; BADRUDDIN, I. A. Valorization of spent coffee grounds for biogas production: A circular bioeconomy approach for a biorefinery. **Fuel**, v. 328, e125296, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125296>
- MARCOMINI, G. R. Eficiência técnica da cafeicultura no sul de Minas Gerais. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 40, p. e27213, 2023. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2023.v40.27213>
- MICHAEL, C.; GIL, E.; GALLART, M.; STAVRINIDES, M. C. Influence of Spray Technology and Application Rate on Leaf Deposit and Ground Losses in Mountain

Viticulture. **Agriculture**, v. 10, n. 12, p. 615, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10120615>

PRIVITERA, S.; MANETTO, G.; PASCUZZI, S.; PESSINA, D.; CERRUTO, E. Drop size measurement techniques for agricultural sprays: A state-of-the-art review. **Agronomy**, v. 13, n. 3, p. 678, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030678>

RU, Y.; HU, C.; CHEN, X.; YANG, F.; ZHANG, C.; LI, J.; FANG, S. Droplet penetration model based on canopy porosity for spraying applications. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 339, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020339>

SANTANA, L. S.; FERRAZ, G. A. S.; SANTOS, S. A.; DIAS, J. E. L. Precision coffee growing: A review. **Coffee Science**, v. 17, p. e172007, 2022. DOI: 10.25186/v17i.2007. Disponível em: <https://coffeescience.ufla.br>. Acesso em: 23 nov. 2023.

SILVA, J. B. C.; PINTO, P. A. L. A. Impactos socioeconômicos das mudanças climáticas na produção do café: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 35, n. 20, p. 155–178, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v35i20.17626>

VIRK, S. S.; PROSTKO, E. P. Survey of pesticide application practices and technologies in Georgia agronomic crops. **Weed Technology**, v. 36, n. 5, p. 616-628, 2022. DOI: <https://10.1017/wet.2022.69>

WANG, X.; FENG, Y.; FU, W.; QI, J.; SONG, J. Simple decision-making model for orchard air-assisted spraying airflow. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 16, n. 2, p. 23-29, 2023. DOI: <https://10.25165/j.ijabe.20231602.6849>

WANG, G.; LI, Z.; JIA, W.; OU, M.; DONG, X.; ZHANG, Z. A Review on the Evolution of Air-Assisted Spraying in Orchards and the Associated Leaf Motion During Spraying. **Agriculture**, v. 15, n. 9, p. 964, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15090964>

WARNEKE, B. W.; NACKLEY, L. L.; PSCHIEDT, J. W. Can a LiDAR-enhanced Air-blast Sprayer Improve Coverage on Tough Targets like Tree Trunks and Emerging Shoots? **HortTechnology**, v. 34, n. 6, p. 677–686, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTTECH05494-24>

WEI, Z.; LI, R.; XUE, X.; SOL, Y.; ZHANG, S.; LI, Q.; CHANG, C.; ZHANG, Z.; DOU, Q. Research Status, Methods and Prospects of Air-Assisted Spray Technology. **Agronomy**, v. 13, n. 5, p. 1407, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051407>

WOMAC, A. R.; OZKAN, E.; ZHU, H.; KOCHENDORFER, J.; JEON, H. Status of spray penetration and deposition in dense field crop canopies. **Journal of the ASABE**, v. 65, p. 1107–1117, 2022. DOI: <https://doi.org/10.13031/ja.15091>

XU, S.; WANG, X.; LI, C.; RAN, X.; ZHONG, Y.; JIN, Y.; SONG, J. Effect of airflow angle on abaxial surface deposition in air-assisted spraying. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1211104, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1211104>

YUAN, F.; GU, C.; YI, K.; DOU, H.; LI, S.; YANG, S.; ZOU, W.; ZHAI, C. Atomization characteristics of a hollow cone nozzle for air-assisted variable-rate spraying. **Agriculture**, v. 13, n. 10, p. 1992, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture1310>

ZHOU, Q. Q.; XUE, X. Y.; CHEN, C.; CAI, C.; JIAO, Y. X. Canopy deposition characteristics of different orchard pesticide dose models. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 16, n. 3, p. 1-6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231603.7665>

CAPÍTULO II

Análise cienciométrica da deposição de gotas de pulverização assistida por ar em culturas arbóreas: tendências, lacunas e perspectivas de pesquisa

Análise cienciométrica da deposição de gotas de pulverização assistida por ar em culturas arbóreas: tendências, lacunas e perspectivas de pesquisa

RESUMO

A pulverização assistida por ar constitui um dos principais métodos de proteção de plantas em pomares, por proporcionar melhor penetração na copa das árvores. Contudo, persistem limitações significativas relacionadas ao ajuste do fluxo de ar, resultando em deposição desuniforme, inadequada e desperdício de produtos fitossanitários. A maioria dos pulverizadores atua com fluxo de ar constante, sem adaptação às características da copa ou ao estágio fenológico da cultura, o que compromete a eficiência da aplicação. Este estudo foi conduzido com o objetivo de realizar uma análise da produção científica sobre a deposição da pulverização assistida por ar em culturas arbóreas, com foco em superfícies foliares. Foram analisados 50 artigos extraídos da base Web of Science. A análise foi conduzida com auxílio dos softwares Bibliometrix e VOSviewer, permitindo o mapeamento de autores, países, instituições, palavras-chave e redes de colaboração. Os resultados revelaram uma tendência de crescimento das publicações nos últimos 15 anos. No entanto, estudos focados na deposição em superfícies foliares, especialmente em alvos naturais, permanecem escassos. A análise também evidenciou que alta frequência de publicação nem sempre se correlaciona com maior impacto científico, ressaltando a importância de métricas baseadas em citações. Este estudo reforça a necessidade de direcionar pesquisas para avaliações em condições reais de campo, aprofundar investigações sobre deposição em faces foliares e o desenvolvimento de métodos e tecnologias inteligentes para otimizar as práticas de pulverização em culturas arbóreas.

Palavras-chave: Deposição em superfícies foliares, culturas arbóreas, tecnologia de aplicação, fluxo de ar.

Scientometric analysis of air-assisted spray droplet deposition in tree crops: trends, gaps, and research perspectives

ABSTRACT

Air-assisted spraying is the primary method used for plant protection in orchards because it enhances droplet penetration into tree canopies. However, significant limitations persist, mainly due to inadequate airflow adjustment, which leads to uneven deposition, insufficient coverage, and waste of plant protection products. Most sprayers operate with a constant airflow that does not adapt to canopy architecture or crop phenology, compromising application efficiency. This study aimed to analyze the scientific production on droplet deposition from air-assisted spraying in tree crops, with an emphasis on foliar surfaces. A total of 50 articles indexed in the Web of Science database were evaluated. The analysis was performed using the Bibliometrix and VOSviewer software, enabling the mapping of authors, countries, institutions, keywords, and collaboration networks. The results revealed a steady increase in publications over the past 15 years; however, studies focusing specifically on foliar surface deposition—particularly on natural targets—remain scarce. The analysis also showed that publication frequency does not necessarily correlate with scientific impact, highlighting the importance of citation-based metrics. Overall, this study underscores the need to expand research to real field conditions, deepen investigations on deposition on leaf surfaces, and develop intelligent methods and technologies to optimize spraying practices in tree crops.

Keywords: foliar surface deposition; tree crops; application technology; airflow.

1 INTRODUÇÃO

A pulverização assistida por ar constitui um dos principais métodos de proteção de plantas em pomares, sendo o fluxo de ar determinante para a penetração das gotas no interior da copa. No entanto, o ajuste adequado desse fluxo é essencial para minimizar a deriva e o desperdício de produtos fitossanitários. Apesar dos avanços tecnológicos, ainda são necessários estudos voltados à otimização do fluxo de ar e à compreensão do comportamento das gotas e do movimento foliar sob diferentes condições operacionais, de modo a garantir uma deposição uniforme ao longo do dossel, especialmente em ambas as superfícies foliares, que tendem a apresentar menor cobertura nas aplicações fitossanitárias. A investigação integrada desses fatores é, portanto, fundamental para o desenvolvimento científico da tecnologia de pulverização em pomares (Lu *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025).

Atualmente, a maioria dos pulverizadores assistidos por ar opera com fluxo constante, com pouco ou nenhum ajuste da velocidade e do volume, o que dificulta uma aplicação precisa. Embora existam sensores que identificam as características da copa, como volume e densidade foliar, o controle do fluxo de ar baseado nessas informações ainda é limitado, pois os sistemas não conseguem ajustar separadamente a velocidade e o volume do fluxo de ar (Wei *et al.*, 2023). Além disso, diferentes árvores e estágios fenológicos exigem adaptações específicas que os sistemas atuais, em muitos casos, não conseguem atender, reduzindo a eficiência das aplicações fitossanitárias (Dou *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2025).

Entre os desafios persistentes na pulverização assistida por ar, destaca-se a deposição irregular nas superfícies foliares, sendo a deposição em face abaxial frequentemente inferior. Para um controle eficaz de pragas em culturas arbóreas, é fundamental garantir a deposição adequada em ambas as superfícies foliares. Nesse contexto, o fluxo de ar desempenha um papel fundamental nesse processo, promovendo a movimentação das folhas e da copa e ampliando a penetração. Sob fluxo de ar devidamente ajustado e condições operacionais adequadas, a pulverização assistida por ar pode contribuir com o aumento da cobertura e da deposição na superfície abaxial das folhas, otimizando as aplicações (Xu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025).

Além da distribuição irregular na copa das árvores, os pulverizadores assistidos por ar apresentam limitações, como o desperdício excessivo de produtos fitossanitários e o potencial de deposição de resíduos fora do alvo. O controle preciso da pulverização pode reduzir o uso de produtos fitossanitários em pomares, mantendo a eficácia do controle de pragas. Nesse contexto, a avaliação da deposição ao longo da copa das plantas é considerada um indicador essencial para análise da eficiência da pulverização (Lu *et al.*, 2025; Zhao *et al.*, 2025).

A necessidade de maior eficiência e sustentabilidade tem impulsionado melhorias nas práticas de pulverização em culturas arbóreas (Wang *et al.*, 2025). No entanto, apesar da expansão dos estudos, poucas revisões cienciométricas avaliam o desenvolvimento científico relacionado à deposição de gotas, especialmente em condições específicas como em culturas arbóreas e em superfícies foliares. A carência de análises limita a identificação dos principais pontos estudados até o momento, das lacunas no conhecimento e direções promissoras para futuras pesquisas. A ciencimetria possibilita análises estratégicas e estruturais das produções científicas. A avaliação do impacto das pesquisas, da evolução e da emergência de temas contribui para o desenvolvimento de novos estudos e colaborações científicas, favorecendo o avanço e otimização de tecnologias.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo realizar uma análise cienciométrica da produção científica sobre deposição de gotas de pulverização assistida por ar em culturas perenes, com ênfase na deposição em superfícies foliares. Por meio de métricas bibliométricas, buscou-se identificar tendências, autores mais produtivos, países e instituições de destaque, temas emergentes e lacunas no conhecimento, permitindo estabelecer bases que auxiliem o desenvolvimento de pesquisas futuras e a evolução da tecnologia de aplicação em pomares.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A base de dados utilizada foi a Web of Science, reconhecida por sua abrangência de periódicos científicos e rigor no processo de indexação, sendo frequentemente empregada em análises cienciométricas e bibliométricas por garantir maior confiabilidade e padronização dos registros bibliográficos (He *et al.*, 2020). A pesquisa foi iniciada em 5 de maio de 2025, empregando a seguinte estratégia de busca com descritores combinados por operadores booleanos: (airblast sprayer OR pneumatic sprayer OR air-assisted sprayer) AND (deposition* on leaf OR deposition* on adaxial surface OR back surfaces OR zone's adaxial and abaxial) AND (orchard canopy OR canopy OR 3D canopy OR fruit tree canopies OR orchard).

A busca inicial retornou 102 documentos. Desses, limitou-se a seleção por tipo de documento, área de pesquisa e ano de publicação, definindo-se apenas artigos científicos nas áreas de agricultura, ciências vegetais e entomologia. O período temporal estabelecido para o estudo foi de 15 anos (maio de 2011 a 2025), com base na observação de um crescimento expressivo nas publicações nesse intervalo, indicando interesse científico recente e crescente no tema.

A filtragem e triagem dos documentos foram realizadas em duas etapas. Inicialmente, com base nos critérios de foco e relevância (Tabela 1) para o tema central, 50 artigos foram selecionados e exportados nos formatos BibTeX e Txt, contendo todas as informações bibliográficas. Posteriormente, foi realizada uma triagem temática detalhada dos artigos, com o objetivo de identificar aqueles que abordavam o depósito em faces foliares (subtema). Nessa etapa, foi realizada leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, buscando especificamente termos relacionados às superfícies foliares, com ênfase na face abaxial.

TABELA 1. Critérios para seleção de documentos usados no estudo cienciométrico

Critério	Descrição
Base de dados	Web of Science (Core Collection)
Idioma	Inglês
Restrições	Tipo de documento, área de pesquisa, ano de publicação
Tipo de documento	Artigos originais
Ano de publicação	2011 até maio de 2025
Cultura	Perenes/arbóreas/3d
Tema central	Deposição de calda em culturas perenes
Foco	Deposição, deposição em face abaxial das folhas, pulverizador assistido por ar.
Relevância	Estudos sobre tecnologia de aplicação

Os dados foram importados para o software RStudio (versão 4.3.1), utilizando o pacote Bibliometrix (Aria; Cuccurullo, 2017), por meio da interface gráfica Biblioshiny. Para o tema central, foram analisadas a evolução temporal das publicações, os países e as instituições com maior número de publicações, os periódicos com maior número de artigos e os autores mais produtivos. Para essas análises, foram selecionados para a discussão apenas os dez primeiros resultados de cada métrica, considerando a frequência absoluta. Para o subtema foram realizadas análises de tendência anual, países, pesquisadores, palavras-chave do autor e quantidade de citações, o que também permitiu identificar o autor mais relevante.

As visualizações gráficas foram inicialmente geradas no Biblioshiny e, posteriormente, foi feito ajuste de *layout* para melhor apresentação dos dados, utilizando o Microsoft Excel. Para complementar a análise estrutural, utilizou-se o software VOSviewer (versão 1.6.20). A fim de mapear relações entre pesquisadores e identificar os termos emergentes, foram desenvolvidas redes de coautoria e coocorrência de palavras-chave, com análise temporal e normalização por método de associação (linlog/modularity).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Depósito de gotas de pulverização em culturas perenes

A análise da tendência anual de publicações sobre deposição de calda em culturas perenes (Figura 1) evidencia uma oscilação com baixa produção (0 a 3 artigos por ano) até 2019. A partir de 2020, observa-se um aumento no número de publicações, atingindo um pico em 2024 com 10 artigos, o maior número da série histórica.

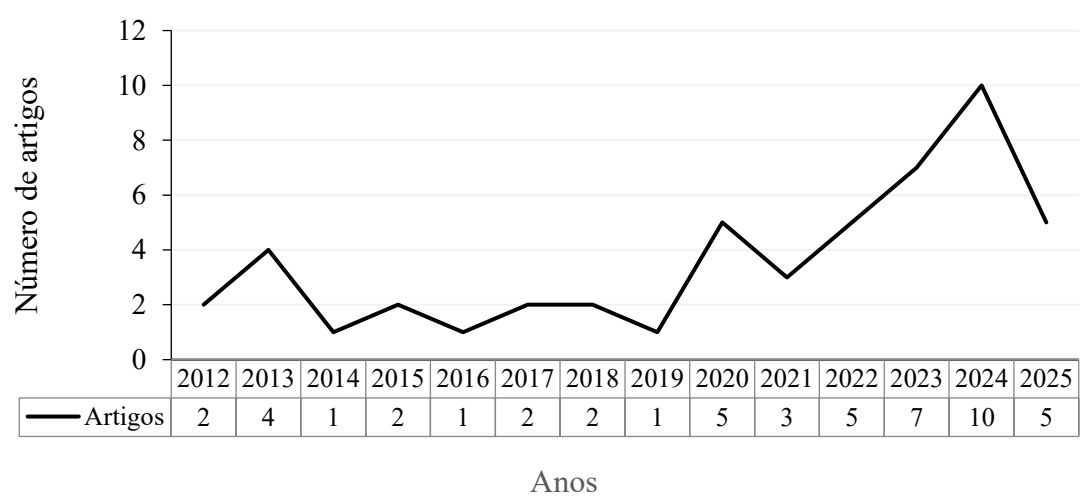


FIGURA 1. Publicações anuais sobre depósito de gotas de pulverização em culturas perenes em periódicos indexados à base Web of Science

O aumento no número de publicações a partir de 2020 (35 artigos no período de 2020-2024, em contraste com 15 artigos nos 8 anos anteriores) demonstra uma mudança de cenário, indicando o crescente interesse pela temática. O avanço de tecnologias que exigem estudos mais detalhados de deposição pode explicar o aumento destas pesquisas, incluindo o uso de aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), o de adjuvantes e novas técnicas de pulverização, bem como a própria preocupação com a maior eficiência de aplicação, redução de deriva e sustentabilidade (Oliveira *et al.*, 2025).

Os principais periódicos utilizados para disseminação do conhecimento sobre deposição de gotas em culturas perenes são Crop Protection com nove artigos, Frontiers in Plant Science e Transactions of the ASABE (International Journal of Agricultural and Biological Engineering (com 6 artigos cada). Seguem-se Pest Management Science (com cinco artigos) e Agriculture-Basel com três artigos. Os demais periódicos, Agronomy-Basel, Computers and Electronics in Agriculture e Journal of Agricultural Engineering apresentam dois artigos cada (Figura 2).

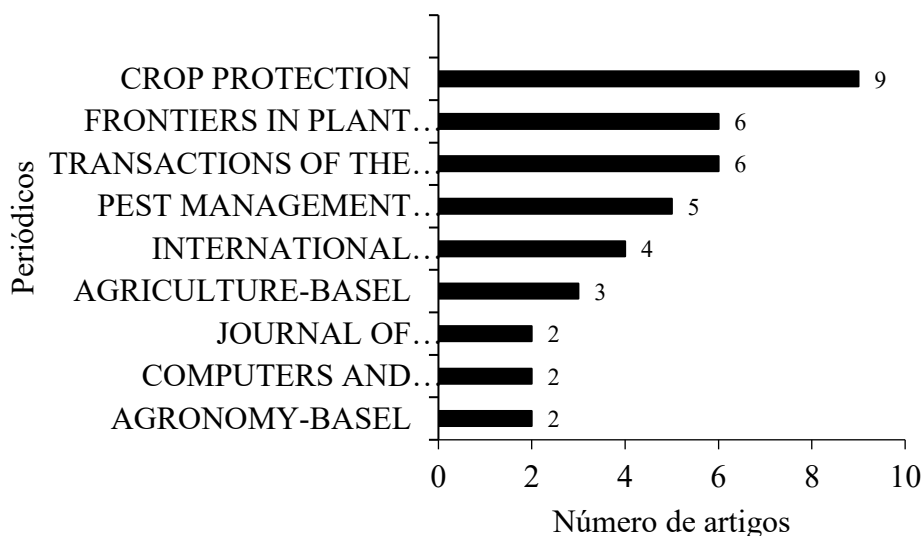


FIGURA 2. Principais periódicos e número de publicações sobre depósito de gotas de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science

Esse resultado evidencia que os estudos são publicados predominantemente em periódicos cujo escopo está alinhado ao tema de depósito de gotas em culturas perenes e que possuem relevância dentro da área de engenharias, indicando os melhores alvos para submissão de artigos e atualizações científicas na área.

O periódico Crop Protection aborda técnicas de controle de pragas, doenças e tecnologias de aplicação, o que justifica sua representatividade. Já Frontiers in Plant Science enfatiza processos fisiológicos, morfológicos e técnicos que afetam o desempenho das plantas, incluindo a interação com técnicas de pulverização. A presença dos periódicos Transactions of the ASABE e Computers and Electronics in Agriculture, com escopo voltado para tecnologias digitais, automação e agricultura de precisão, demonstra o crescente interesse em abordagens modernas para proteção de plantas. Os demais periódicos são relevantes nas áreas de engenharia, eficiência operacional e interação entre praga, planta e tecnologia. Embora o número de publicações sobre o tema seja baixo, observa-se que, quando realizadas, as pesquisas são divulgadas em meios científicos de influência, que atingem o público de interesse e possuem potencial para influenciar a área de estudo.

A análise dos principais autores revelou que Yang S. é o autor mais produtivo, com quatro publicações. Em seguida, aparecem nove autores, cada um com três publicações (Figura 3).

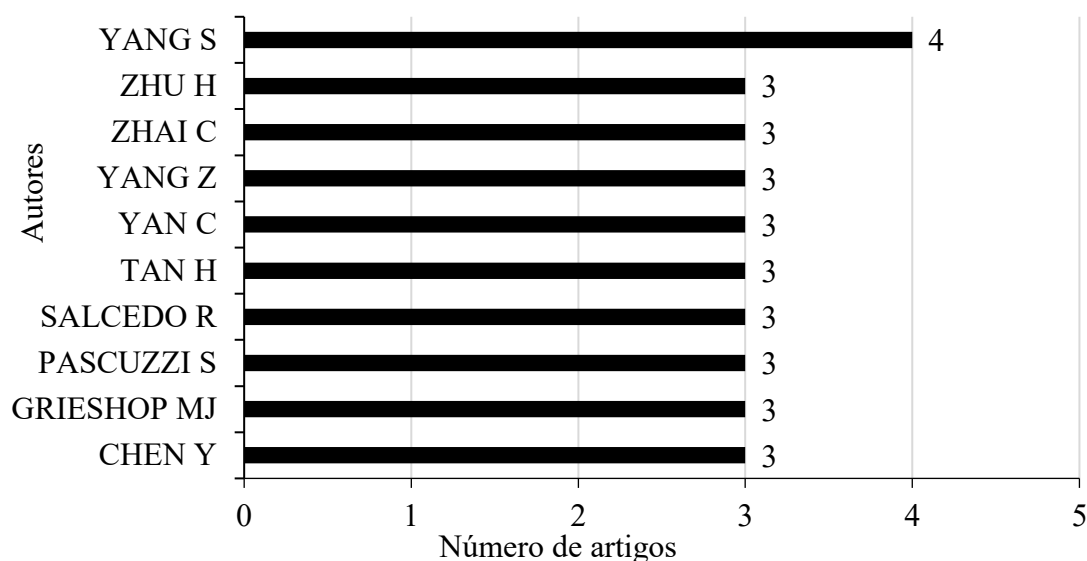


FIGURA 3. Autores mais produtivos em publicação sobre depósito de gotas de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science

Yang S. está vinculado à Universidade Agrícola da China, bem como os autores Zhai C., Yang Z., Yan C., Tan H e Chen Y., que também são de instituições chinesas. A predominância desses pesquisadores reflete um expressivo investimento científico da China no desenvolvimento de tecnologias de aplicação para culturas perenes. Outros autores que apresentam destaque incluem Salcedo R., vinculado a universidades, instituições de pesquisa e ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o que demonstra o papel estratégico da pesquisa governamental no avanço das tecnologias de aplicação. Pascuzzi S. está associado ao Departamento de Ciências Agrícolas e Ambientais na Universidade de Bari Aldo Moro, na Itália, reconhecida em pesquisas de relevância nacional e internacional. Grieshop M. está ligado à Universidade Estadual de Michigan e à Universidade Politécnica Estadual da Califórnia, onde desenvolve pesquisas na área de manejo integrado de pragas, controle biológico e sistemas de pulverização para pomares.

A análise dos países baseou-se na frequência de ocorrência das afiliações institucionais dos autores nos artigos analisados, representando a participação de cada país na produção científica sobre o tema. Dessa forma, um mesmo artigo pode contribuir para mais de um país quando possui autores afiliados a diferentes instituições.

Reforçando o resultado de principais autores, verifica-se que a China apresenta o maior número de ocorrência de afiliação, seguida pelos Estados Unidos, indicando que os autores vinculados a instituições desses países participaram, respectivamente, de 99 e 33 ocorrências

de autoria nos artigos analisados. Em seguida, surgem Itália, Brasil, Espanha, Bélgica e França, com produções moderadas, enquanto Índia, Alemanha, Equador e Chipre apresentam menor frequência de ocorrências (Figura 4).

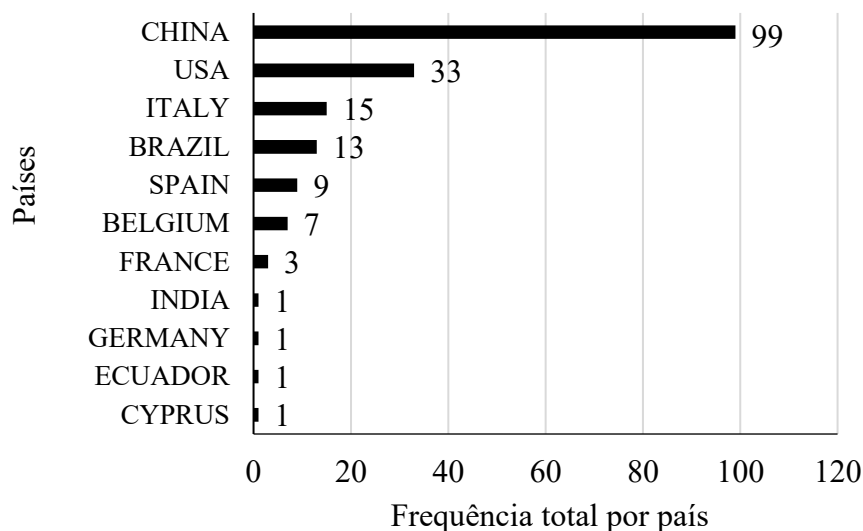


FIGURA 4. Frequência de afiliações por país em estudos sobre depósito de gotas de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science

Estes resultados confirmam a relevante atuação da China em estudos de tecnologia de aplicação em culturas arbóreas, evidenciando um robusto investimento nacional e uma sólida estrutura interna para pesquisas sobre o tema. Esse resultado pode estar relacionado, em parte, ao fato de o país ser o maior produtor de frutas, incluindo maçã, pera, frutas cítricas, pêssego, kiwi e uva. Em 2022, a produção total de frutas no mundo foi de 933 milhões de toneladas, com a China como principal produtora (Qun *et al.*, 2024). Adicionalmente, o governo chinês tem investido em inovações tecnológicas ligadas à agricultura de precisão, irrigação inteligente e manejo de culturas via aeronave remotamente pilotada, com o objetivo de aumentar a eficiência, reduzir desperdícios e otimizar os processos agrícolas (Li, 2025).

Os Estados Unidos aparecem como o segundo país com maior frequência de afiliações de autores, refletindo seu potencial de pesquisas nas áreas de mecanização agrícola e tecnologia de aplicação. Essa produção científica é apoiada por importantes instituições, como o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e a Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas e Biológicos (ASABE).

O Brasil, apesar de apresentar número moderado de ocorrências de afiliação nos artigos analisados, destaca-se também pela expressiva produção de frutas da América do Sul. Essa posição está associada à relevância econômica de culturas como café e citros, além da atuação

de importantes centros de pesquisa, como a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e diversas universidades federais. O país também participa de colaborações internacionais, especialmente com a China e Estados Unidos, o que contribui para ampliar seu impacto científico nessa área.

Apesar dessas contribuições, observa-se uma sub-representação de pesquisadores afiliados a instituições brasileiras em periódicos de alto impacto indexados na Web of Science. Esse padrão sugere que a visibilidade internacional da produção científica brasileira ainda se encontra parcialmente limitada por fatores estruturais e econômicos. Uma possível explicação refere-se às barreiras financeiras associadas às taxas de processamento de artigo (APCs), frequentemente elevadas em periódicos internacionais de acesso aberto. Além disso, embora existam políticas de fomento à pesquisa no Brasil, nem sempre priorizam ou alocam recursos suficientes para cobrir custos de tradução e publicação em periódicos internacionais de alto impacto. Como consequência, uma parcela expressiva da produção científica brasileira pode ser direcionada para periódicos de escopo regional/nacional ou bases alternativas, como a SciELO. Contudo, esse cenário apresenta sinais de mudança a partir dos acordos recentemente firmados pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) com grandes editoras científicas, que preveem a isenção de taxas de processamento de artigos para pesquisadores vinculados a instituições brasileiras. Tais iniciativas têm potencial para reduzir as barreiras econômicas a publicação em acesso aberto, contribuindo para ampliar a inserção internacional e a visibilidade da ciência brasileira em periódicos de alto impacto.

O documento mais citado globalmente avalia a deposição de gotas no interior das copas das árvores a partir de um pulverizador assistido por ar de taxa variável, sendo o autor Chen Y. classificado entre os dez mais produtivos no tema. Embora Duga A.T. não esteja entre os mais produtivos em número de publicações, destaca-se em segundo com o documento mais citado. Esse destaque, possivelmente, deve-se ao fato de ser autor de artigo considerado fundador, ou seja, uma publicação de referência que introduziu conceitos importantes sobre deposição em culturas perenes com pulverização assistida por ar. Publicações desse gênero tendem a ser amplamente citadas, pois oferecem base conceitual e metodológica para diversos estudos subsequentes, demonstrando a relevância e o impacto de sua contribuição para a área ao longo do tempo. Adicionalmente, destaca-se que 50% e 75% dos artigos publicados nos anos iniciais da temática, (2012 e 2013, respectivamente) estão incluídos nos documentos mais citados (Tabela 2).

TABELA 2. Documentos mais citados sobre depósito de gotas de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science

Documentos	DOI	Total de citações
CHEN Y, 2013, TRANS ASABE	10.13031/trans.56.9839	86
DUGA A.T., 2015, CROP PROT	10.1016/j.cropro.2014.10.016	85
PASCUZZI S, 2015, CROP PROT	10.1016/j.cropro.2014.11.006	48
PASCUZZI S, 2017, CROP PROT	10.1016/j.cropro.2016.09.009	46
PERGHER G, 2013, CROP PROT	10.1016/j.cropro.2012.11.021	39
FOQUE D, 2012, CROP PROT	10.1016/j.cropro.2012.05.020	39
CHEN Y, 2013, TRANS ASABE	10.13031/trans.56.10173	37
GRELLA M, 2020, PEST MANAG SCI	10.1002/ps.5975	33
SALCEDO R, 2020, CROP PROT	10.1016/j.cropro.2019.104964	32
SINHA R, 2020, CROP PROT	10.1016/j.cropro.2020.105124	30

A Figura 5 apresenta a rede de coocorrência de palavras-chave derivadas de pesquisas sobre deposição de gotas em culturas perenes. Nota-se a centralidade e frequência das palavras “*air-assisted sprayer*” (pulverizador assistido por ar), “*spray coverage*” (cobertura de pulverização), “*crop protection*” (proteção de culturas) e “*orchard*” (pomar), indicando que esses termos constituem os principais eixos temáticos dos estudos atuais e estão associados a vários outros termos que visam eficiência de aplicação fitossanitária. Os tons azulados representam os termos mais antigos, sendo eles “*spray coverage*” “*coffea arabica*”, “*deposition*” e “*airflow rate*” (cobertura de pulverização, café arábica, deposição e taxa de fluxo de ar), o que demonstra a importância histórica de estudos de variáveis da aplicação. Nos pontos amarelo-esverdeados, incluem-se os termos mais recentes, como “*variable-rate spraying, drone e canopy volume*” (pulverização de taxa variável, aeronaves remotamente pilotadas ou drones e volume do dossel), indicando a inclusão de pulverização de precisão e parâmetros da arquitetura das plantas nas pesquisas atuais. A presença do termo “*abaxial surfaces*” (superfícies abaxiais) destaca-se, pois revela que as pesquisas estão buscando solucionar desafios de deposição em face abaxial das folhas e indica tendência do subtema do presente estudo cienciométrico.

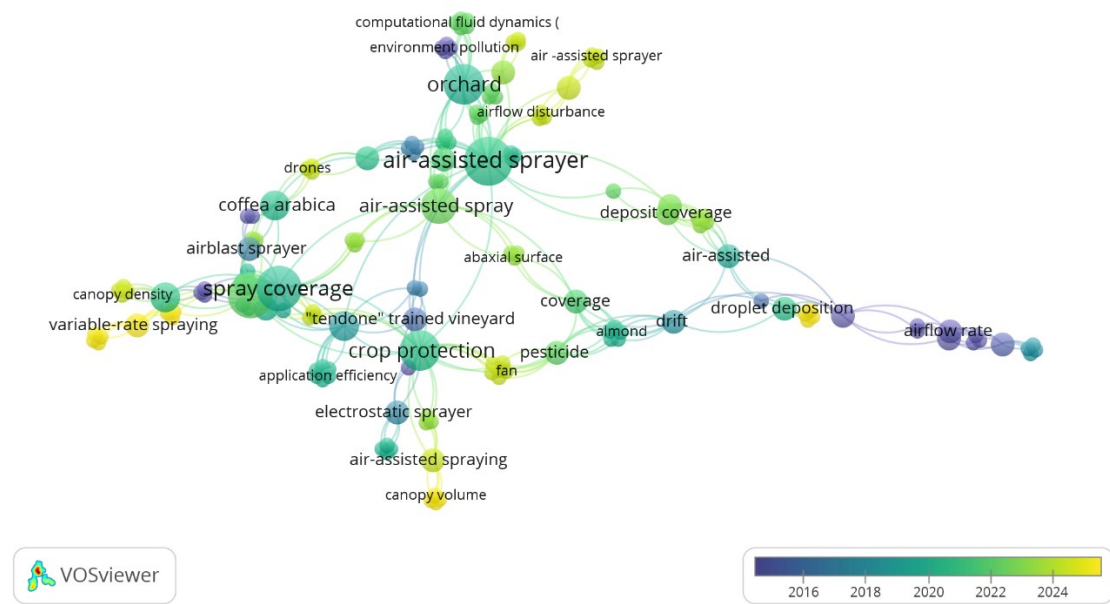


FIGURA 5. Rede de coocorrência de palavras-chave sobre depósito de gotas de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science.

O autor que conecta os grupos na rede de coautoria é Yan Z., que se destacou também como um dos mais produtivos no tema. Observa-se que os dois grupos de autores, em tom roxo azulado no lado direito da Figura 6, possuem colaboração mais antiga com o autor central. Já os três grupos à esquerda, com coloração amarelo esverdeado, apresentam colaboração recente, sugerindo linhas de pesquisa inovadoras. Notou-se que a colaboração dos grupos ocorre majoritariamente entre autores chineses.

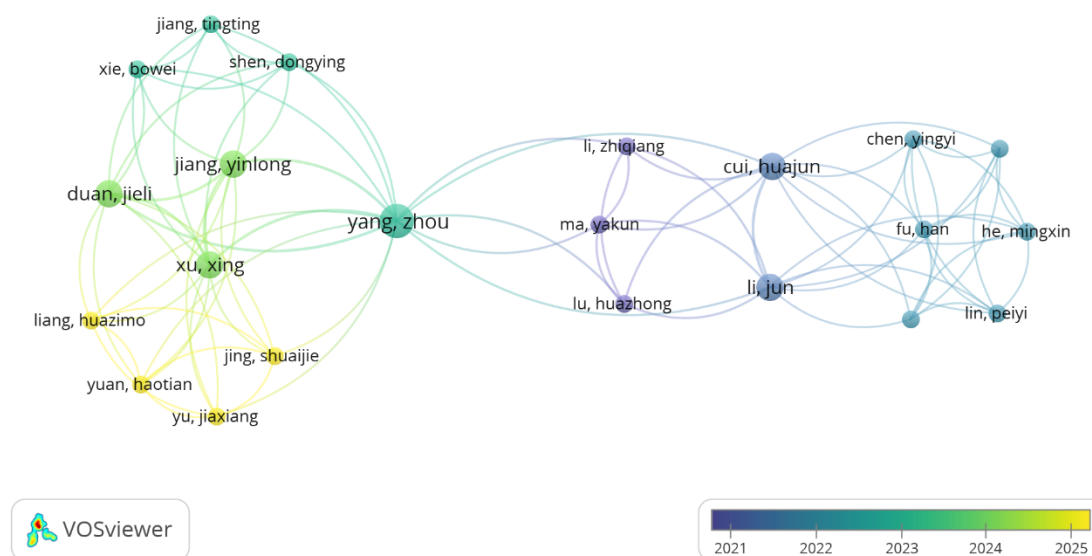


FIGURA 6. Rede de coautoria em publicações sobre depósito de gotas de pulverização em culturas perenes.

O tema da deposição de gotas em culturas perenes vem ganhando destaque nos últimos anos, impulsionado pelo avanço de tecnologias de aplicação e pela demanda de maior eficiência, precisão e sustentabilidade nos sistemas produtivos. A predominância de pesquisas conduzidas por países e instituições relevantes para a agricultura, associada à sua divulgação em meios de impacto, reforça a consolidação desse campo de pesquisa. Além disso, a evolução temática apresentando a incorporação de novas ferramentas, como drones e pulverização a taxa variável, indica uma tendência de modernização na área em estudo.

3.2 Depósito de gotas de pulverização em face foliar abaxial de culturas perenes

A análise da tendência anual de publicações (Figura 7a) revela que o interesse pela avaliação da deposição em face foliar intensificou-se nos últimos 10 anos, correspondendo ao período de pico das publicações na área tema deste estudo. Dos 50 artigos publicados ao longo de 14 anos, 35 (70%) foram entre 2020 e 2025, e desses, 10 (28%) estudos investigaram a deposição em face abaxial. A distribuição geográfica das pesquisas de deposição em face abaxial é bastante concentrada, com apenas dois países explorando essa variável: 70% dos estudos são derivados da China e os outros 30% dos Estados Unidos (Figura 7b). As instituições

responsáveis são principalmente universidades chinesas, com destaque para um laboratório especializado em agricultura moderna.

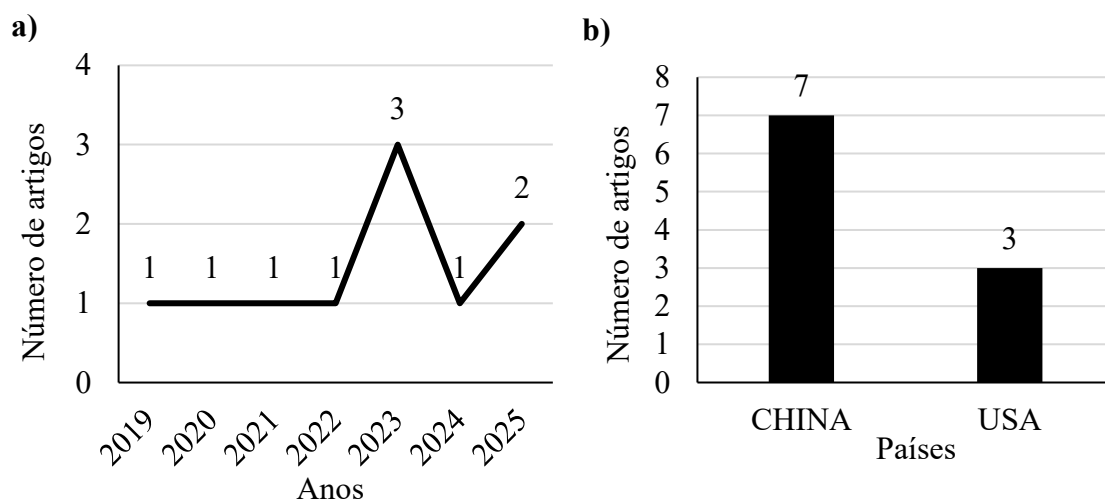


FIGURA 7. Tendência anual de publicações e países que pesquisam sobre depósito de gotas de pulverização em face abaxial de culturas perenes. Em detalhes: a) Número de artigos publicados anualmente e b) Número de artigos publicados pelos países pesquisadores

A tendência de crescimento das publicações evidencia a relevância científica do subtema, visto que a deposição em face abaxial representa um desafio técnico que influencia diretamente a eficácia das aplicações fitossanitárias (Pelegrini *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023). O aumento das publicações pode estar associado ao avanço e à disseminação de tecnologias de aplicação mais modernas, que exigem conhecimento da dinâmica de deposição. A preocupação recorrente por aplicações mais eficientes, racionais e sustentáveis também contribui para os estudos que focam em superfície alvo (Guo *et al.*, 2025; Le *et al.*, 2025).

A concentração de pesquisas sobre deposição em face foliar, conduzidas em regiões específicas, corrobora os dados do estudo sobre deposição em culturas perenes. Isso se relaciona à relevância econômica de culturas perenes nessas regiões, à disponibilidade de infraestrutura tecnológica e à crescente preocupação com os impactos ambientais. Conforme destacado por Ji *et al.* (2021), a China tem priorizado a otimização de tecnologias de aplicação e o uso de pesticidas, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais decorrentes da atividade agrícola. A baixa diversidade geográfica das publicações indica uma lacuna importante no entendimento da eficácia das pulverizações, principalmente em culturas de copa densa. Portanto, as pesquisas nessa temática, em diferentes regiões, contribuirão para recomendações de estratégias de pulverização mais eficientes para deposição em ambas as faces foliares.

A nuvem de palavras-chave dos autores (Figura 8) revela o tema central dos artigos, e as dez principais palavras-chave são: cobertura, deposição, pulverização assistida por ar, sistemas de distribuição de defensivos agrícolas com configuração otimizada (SSCDS), superfície abaxial, aplicação aérea, pulverizador eletrostático assistido por ar, ângulo do fluxo de ar, padrão de distribuição do fluxo de ar e controle gradual do fluxo de ar.

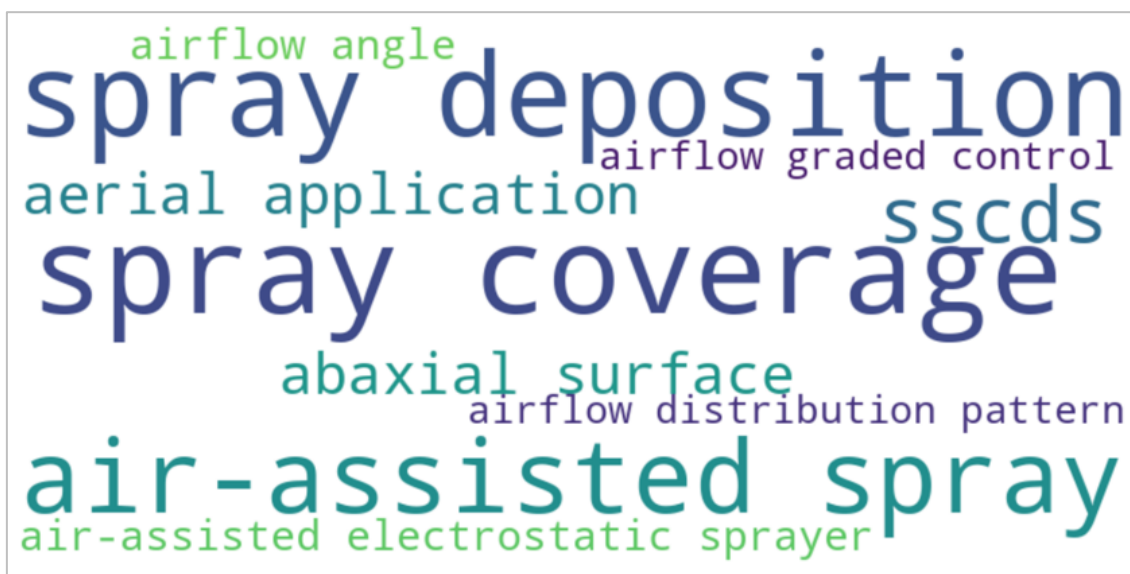


FIGURA 1. Palavras mais frequentes dos autores em estudo sobre deposição de gotas de pulverização em culturas perenes, com base em dados da Web of Science

Os termos de destaque indicam um foco em inovações para a otimização da deposição e permitem ressaltar a importância dos estudos em tecnologia de aplicação para superar desafios físicos impostos à deposição. Adicionalmente, nota-se uma preocupação com relação ao fluxo de ar gerado por pulverizadores convencionais, decorrente do fato de que o fluxo de ar excessivo pode causar o deslocamento das gotas para fora da área-alvo, enquanto o fluxo insuficiente resulta em baixa penetração no interior da copa. Assim, o ajuste adequado do ar é essencial para equilibrar eficiência de deposição e segurança ambiental, aspecto que tem motivado o desenvolvimento de sistemas inteligentes. O fluxo de ar afeta a deposição em diferentes regiões do dossel das plantas (Liu *et al.*, 2024). O ajuste adequado da velocidade e da direção do vento é fundamental para movimentar as folhas e favorecer a penetração, a uniformidade da cobertura da copa, além de reduzir a deriva e o desperdício de produtos fitossanitários (Wang *et al.*, 2025).

A Tabela 3 apresenta os documentos encontrados na busca sobre deposição de gotas em faces foliares e o total de citações. Dentre eles, destaca-se o artigo de Sinha, R. de 2020, o mais

citado do subtema (30 citações), autor que também se destacou entre os dez mais citados do tema central deste estudo. O mesmo autor possui ainda outra publicação, tornando-o, portanto, o pesquisador com maior produção científica dentro do subtema. Os artigos dele abordam a avaliação da deposição em faces foliares, com foco em eficácia, o que pode justificar o impacto de suas publicações.

TABELA 3. Documentos sobre depósito de gotas de pulverização em faces foliares e o total de citações

Documentos	DOI	Total de citações
SINHA R, 2020, CROP PROT	10.1016/j.cropro.2020.105124	30
LI T, 2022, AGRONOMY-BASEL	10.3390/agronomy12040944	18
OWEN-SMITH P, 2019, INSECTS	10.3390/insects10070193	14
JIANG Y, 2023, FRONT PLANT SCI	10.3389/fpls.2023.1079703	13
SINHA R, 2021, TRANS ASABE	10.13031/trans.13199	6
YAN C, 2024, CROP PROT	10.1016/j.cropro.2024.106588	5
XU S, 2023, FRONT PLANT SCI	10.3389/fpls.2023.1211104	4
XUE X, 2023, AGRICULTURE-BASEL	10.3390/agriculture13081498	3
FENG F, 2025, AGRONOMY-BASEL	10.3390/agronomy15010095	1
YU J, 2025, FRONT PLANT SCI	10.3389/fpls.2024.1491397	0

A análise dos artigos selecionados para o estudo de subtema permitiu identificar que 20% das pesquisas estudaram deposição em faces foliares, explorando a face abaxial. Essa quantidade, embora baixa, é expressiva, considerando a complexidade metodológica envolvida na quantificação do depósito na face abaxial das folhas, principalmente de culturas perenes, onde a estrutura do dossel dificulta as avaliações. Contudo, 90% dos estudos avaliaram o depósito usando alvos artificiais, como cartão de mylar (Sinha *et al.*, 2020; Sinha *et al.*, 2021), papéis filtro (Feng *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2022; Owen-Smith; Wise; Grieshop, 2019; Yan *et al.*, 2024; Yu *et al.*, 2025) e plástico de PVC (Xu *et al.*, 2023b). Apenas 10% realizaram a avaliação diretamente na folha das plantas, conferindo maior precisão, pois alvos naturais permitem representar melhor as condições reais de campo (Jiang *et al.*, 2023). Wang *et al.* (2025) destacam que alvos artificiais diferem da superfície real das folhas que, dependendo de sua estrutura, apresentam movimentação variável quando submetidas ao fluxo de ar do pulverizador. Isso ocorre devido às características físicas das folhas, que diferem dos alvos artificiais, que possuem composição mais estática.

Ainda, a análise das publicações relacionadas à deposição em faces foliares evidenciou que a maioria dos estudos se concentra na avaliação de variáveis operacionais, como tipo e sistema de pulverização, ajustes do ventilador, velocidade do fluxo de ar, pressão de pulverização e tipo de ponta. No entanto, observou-se uma escassez de investigações voltadas à influência de outros fatores, como o ângulo de pulverização, o tamanho de gotas e o espectro, características da planta (como estrutura e densidade foliar), bem como o uso de tecnologias complementares, como adjuvantes. Essa lacuna evidencia uma oportunidade relevante de pesquisa, uma vez que estes parâmetros podem desempenhar papel determinante na uniformidade e eficiência da aplicação fitossanitária.

Por fim, os estudos voltados para deposição em face foliar demonstram crescimento, refletindo a preocupação dos pesquisadores com pulverizações eficientes em regiões de difícil acesso, como a face abaxial das folhas. Dessa forma, a deposição em faces foliares sobressai como estratégia de aperfeiçoamento para aplicações fitossanitárias em culturas perenes, contribuindo para a eficácia no controle de pragas e doenças.

4 CONCLUSÃO

A temática de deposição em folhas de culturas perenes, especialmente em faces foliares, ainda é pouco explorada. Apesar do crescimento observado nos últimos anos, o número total de trabalhos ainda é limitado, indicando a necessidade de mais pesquisas sobre o tema. Avaliações mais detalhadas que considerem a arquitetura de culturas perenes, a deposição em face abaxial das folhas e os fatores que influenciam a cobertura foliar podem subsidiar recomendações técnicas mais precisas.

Verificou-se uma tendência de crescimento de estudos sobre depósito em faces foliares de culturas perenes, e identificou-se a carência de pesquisas que realizam avaliações em alvos naturais. Dessa forma, sugere-se o desenvolvimento de métodos de avaliação da deposição na face abaxial de folhas, bem como a avaliação da deposição em faces foliares em diferentes culturas.

Além disso, o estudo permitiu evidenciar que a alta frequência de publicação não está necessariamente atrelada a um maior impacto científico. Autores com menor volume de publicações, mas com alta taxa de citações, podem exercer maior influência nas pesquisas. Essa constatação reforça a importância da adoção de indicadores qualitativos, como o número de citações, evidenciando que a ênfase na quantidade de publicações pode ocultar contribuições científicas relevantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- DOU, H.; ZHAI, C.; ZHANG, Y.; CHEN, L.; GU, C.; YANG, S. Research on decoupled air speed and air volume adjustment methods for air-assisted spraying in orchards. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1250773>
- FENG, F.; DOU, H.; ZHAI, C.; ZHANG, Y.; ZOU, W.; HAO, J. Design and experiment of orchard air-assisted sprayer with airflow graded control. **Agronomy**, v. 15, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15010095>
- GUO, Y.; WANG, H.; SUN, W.; SUN, Y.; XING, R.; ZHANG, K.; FANG, X.; SUI, B.; XU, J. The effect of airflow-assisted parameters on droplet deposition on soybean leaves at the V7 growth stage. **Agronomy**, v. 15, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15010141>
- HE, D.; BRISTOW, K.; FILIPOVIĆ, V.; LV, J.; HE, H. Microplastics in terrestrial ecosystems: A scientometric analysis. **Sustainability**, v. 12, p. 8739, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12208739>
- Jl, G.; CHEN, H.; ZHANG, Y.; XIANG, J.; WANG, Y.; WANG, Z.; ZHU, D.; ZHANG, Y. Leaf surface characteristics affect the deposition and distribution of droplets in rice (*Oryza sativa* L.). **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 17846, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97061-5>
- JIANG, Y.; YANG, Z.; XU, X.; SHEN, D.; JIANG, T.; XIE, B.; DUAN, J. Wetting and deposition characteristics of air-assisted spray droplet on large broad-leaved crop canopy. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1079703>
- LE, Z.; GUTIÉRREZ-GAMBOA, G.; DONG, M.; ZHENG, W.; SUN, B. Spraying effects of UAV application on droplet effectiveness in two vine trellis systems of high-slope terrace vineyards. **Plants**, v. 14, n. 10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14101452>
- LI, T.; QI, P.; WANG, Z.; XU, S.; HUANG, Z.; HAN, L.; HE, X. Evaluation of the effects of airflow distribution patterns on deposit coverage and spray penetration in multi-unit air-assisted sprayer. **Agronomy**, v. 12, n. 4, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12040944>
- LIU, Z.; CHEN, J.; GUO, J.; QIU, B. Numerical simulation and validation of droplet deposition on tomato leaf surface under air-assisted spraying. **Agronomy**, v. 14, n. 8, p. 1661, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14081661>
- LU, H.; LI, X.; XU, T.; QI, Y.; YUAN, Q.; QIU, W.; LYU, X. Advances in CFD-based fluid computational dynamics for fruit tree model construction method and airflow regulation equipment. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 18, n. 2, 2025. DOI: <https://doi.org/10.25165/ijabe.v18i2.9554>

OLIVEIRA, F. S.; JUNIOR, J. P. S.; ROSA, L.J.; NETO, A. F.; OLIVEIRA, F. J. V. Tecnologia de drones voltada para pulverização agrícola. **Scientific Electronic Archives**, v. 18, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.36560/18120252017>

OWEN-SMITH, P.; WISE, J.; GRIESHP, M. J. Season long pest management efficacy and spray characteristics of a solid set canopy delivery system in high density apples. **Insects**, v. 10, n. 7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects10070193>

PELEGRINI, G.; SOUZA, A. M.; FERREIRA, P. H.; MONTEIRO, G. G.; FERREIRA, M. C. Air-assisted spraying and electrically charged droplets for Bemisia tabaci control in soybeans. **Pest Management Science**, v. 78, n. 11, p. 4618–4627, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.7082>

QUN, W.; RANRAN, C.; JINGSUO, L.; KHAN, N. Toward a sustainable agricultural system in China: exploring the nexus between agricultural science and technology innovation, agricultural resilience and fiscal policies supporting agriculture. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1390014>

SINHA, R.; KHOT, L.; GRIESHP, M.; HOHEISEL, G. Field performance of a solid set canopy delivery system configured for high-density tall spindle architecture trained apple canopies. **Transactions of the ASABE**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.13199>

SINHA, R.; RANJAN, R.; KHOT, L. R.; HOHEISEL, G.-A.; GRIESHP, M. J. Comparison of within canopy deposition for a solid set canopy delivery system (SSCDS) and an axial–fan airblast sprayer in a vineyard. **Crop Protection**, v. 132, p. 105124, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105124>

WANG, G.; LI, Z.; JIA, W.; OU, M.; DONG, X.; ZHANG, Z. A review on the evolution of air-assisted spraying in orchards and the associated leaf motion during spraying. **Agriculture**, v. 15, n. 9, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15090964>

WEI, Z.; LI, R.; XUE, X.; SUN, Y.; ZHANG, S.; LI, Q.; CHANG, C.; ZHANG, Z.; SUN, Y.; DOU, Q. Research status, methods and prospects of air-assisted spray technology. **Agronomy**, v. 13, n. 5, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051407>

WU, M.; LIU, S.; LI, Z.; OU, M.; DAI, S.; DONG, X.; WANG, X.; JIANG, L.; JIA, W. A review of intelligent orchard sprayer technologies: perception, control, and system integration. **Horticulturae**, v. 11, n. 6, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11060668>

XU, S.; WANG, X.; LI, C.; RAN, X.; ZHONG, Y.; JIN, Y.; SONG, J. Effect of airflow angle on abaxial surface deposition in air-assisted spraying. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1211104>

YAN, C.; TAN, H.; NIU, C.; SHEN, C.; XU, L. Spray deposition in an artificial grapevine canopy as affected by spray angle regulation systems of radial airflow air-assisted sprayers. **Crop Protection**, v. 178, p. 106588, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106588>

YU, J.; XU, X.; DUAN, J.; JIANG, Y.; YUAN, H.; LIANG, H.; JING, S.; YANG, Z. Effect of operational parameters on droplet deposition characteristics using an unmanned aerial

vehicle for banana canopy. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2025. DOI:
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1491397>

ZHANG, J.; CHEN, Q.; ZHOU, H.; LIU, C.; HAN, R.; LV, X. Morphological changes and spray coverage of pear leaves and canopy at different phenological periods during air-assisted spraying. **Crop Protection**, v. 197, p. 107324, 2025. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2025.107324>

ZHAO, H.; YANG, S.; LI, W.; FENG, H.; JIANG, S.; LIU, W.; LI, J.; ZHENG, Y.; ZHANG, S. Orchard variable-rate spraying method integrating GNSS and wind-excited audio-conducted leaf area density. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 2025. DOI:
<https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1621080>

CAPÍTULO III

Deposição e transpasse de gotas no cafeeiro: interação entre taxa de aplicação e tipos de pontas de pulverização

Deposição e transpasse de gotas no cafeeiro: interação entre taxa de aplicação e tipos de pontas de pulverização

RESUMO

A aplicação fitossanitária eficiente é essencial para a proteção de plantas, porém, no cafeeiro, a distribuição uniforme ainda representa um desafio, podendo comprometer o controle de pragas e doenças. Dessa forma, tornam-se fundamentais estudos que busquem não apenas a uniformidade de deposição, mas também maior retenção do produto no alvo e a redução das perdas, garantindo maior eficiência agrônômica e sustentabilidade nas aplicações. O estudo teve como objetivo quantificar o depósito de traçador na fração referência (área-alvo) e na fração transpasse (calda que atravessa o dossel), sob diferentes taxas de aplicação e tipos de pontas de pulverização na cultura do cafeeiro. O experimento foi conduzido em esquema fatorial 3 x 2, incluindo três taxas de aplicação (200, 400 e 600 L ha⁻¹) e dois tipos de pontas (jato cônico vazio e leque plano), com quatro repetições. O depósito foi quantificado nos três terços da planta (superior, mediano e inferior), em duas posições do ramo (interno e externo) e nos lados esquerdo e direito da rua de aplicação. Os dados foram analisados por modelos lineares de efeitos mistos, considerando os fatores fixos, aleatórios e a estrutura hierárquica das medições, com comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). A deposição no cafeeiro foi significativamente influenciada pela interação entre a taxa de aplicação e o tipo de ponta, evidenciando pronunciado efeito parede do dossel, com maior depósito nas regiões externas dos ramos. A ponta de jato cônico vazio associada à taxa de 200 L ha⁻¹ proporcionou maior eficiência, maximizando o depósito na fração referência e reduzindo o transpasse. Em contraste, o aumento da taxa de aplicação com a ponta de jato plano elevou as perdas por transpasse. O depósito da fração transpasse representou, em média, 29% do volume depositado, evidenciando relevância como indicador da qualidade operacional e da eficiência da pulverização assistida por ar no cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.; tecnologia de aplicação; retenção foliar; aplicação assistida por ar; deriva.

Droplet Deposition and Transpassage in Coffee Plants: Interaction Between Application Rate and Spray Nozzles

ABSTRACT

Efficient pesticide application is essential for plant protection; however, in coffee crops, achieving uniform distribution still represents a challenge, which may compromise pest and disease control. Therefore, studies aimed not only at improving deposition uniformity but also increasing product retention on the target and reducing losses are essential to ensure greater agronomic efficiency and sustainability in applications. The objective of this study was to quantify tracer deposition in the reference fraction (target area) and in the throughfall fraction (spray passing through the canopy), under different application rates and nozzle types in coffee crops. The experiment was conducted in a 3×2 factorial scheme, including three application rates (200, 400, and 600 L ha⁻¹) and two nozzle types (hollow cone and flat fan), with four replications. Deposition was quantified in the three canopy thirds (upper, middle, and lower), at two branch positions (inner and outer), and on the left and right sides of the application row. Data were analyzed using linear mixed-effects models, considering fixed and random factors and the hierarchical structure of the measurements, with mean comparisons performed using Tukey's test ($p < 0.05$). The deposition in coffee plants was significantly influenced by the interaction between application rates and nozzle types, highlighting a pronounced canopy wall effect, with higher deposition in the outer regions of the branches. The hollow cone nozzle associated with the 200 L ha⁻¹ rate provided greater efficiency, maximizing deposition in the reference fraction and reducing throughfall. In contrast, increasing the application rate with the flat fan nozzle increased losses due to throughfall. Throughfall deposition represented, on average, 29% of the total deposited volume, indicating its relevance as an indicator of operational quality and efficiency of air-assisted spraying in coffee crops.

Keywords: *Coffea arabica* L.; application technology; leaf retention; air-assisted application; drift.

1 INTRODUÇÃO

O café é uma cultura estratégica para o Brasil e para o mercado global, desempenhando importante papel na geração de renda, nas exportações e na dinâmica da cadeia agroindustrial. A cultura do café demanda práticas de manejo eficientes para manter a produtividade e a qualidade do produto. Nesse contexto, atender à demanda mundial por café apresenta diversos desafios (Vitória *et al.*, 2023), uma vez que a produtividade da cultura depende de uma complexa interação entre fatores ambientais e práticas de manejo agrícola. Entre essas práticas, a pulverização de produtos fitossanitários é essencial para a sanidade das plantas, sendo sua eficiência influenciada pela tecnologia de aplicação, pela arquitetura da planta e pela dinâmica das pragas.

A eficiência da pulverização está diretamente relacionada com a capacidade de distribuir o produto fitossanitário de forma adequada ao longo da copa. Em culturas perenes, alcançar uma distribuição uniforme continua sendo um desafio para os métodos tradicionais de pulverização agrícola, pois a arquitetura densa impõe barreiras à penetração e à deposição das gotas, fazendo com que parte do produto aplicado não atinja o alvo. A cobertura uniforme é essencial tanto para o controle efetivo de pragas e doenças quanto para a sustentabilidade ambiental (Calderone; Ferro; Catania, 2025; İnan; Karci, 2025), pois a deposição desigual compromete a eficácia do tratamento e potencializa perdas. Na cafeicultura, práticas de controle inadequadas podem causar reduções de produtividade entre 26% e 38% (Cerdeira *et al.*, 2017), o que reforça a necessidade de otimizar a deposição da pulverização ao longo do dossel da cultura.

Em áreas cafeeiras, a tecnologia predominante para aplicação fitossanitária é o turbo atomizador (conhecido também como hidropneumático), disponível em diversos modelos. Entre os mais comuns em culturas arbóreas, destacam-se os de ventilador radial e axial, sendo este último predominante na cafeicultura. Os pulverizadores de ventilador axial operam com grandes volumes de ar turbulento a pressões estáticas relativamente baixas, apresentando limitações quanto ao ajuste dos padrões de fluxo de ar e da distribuição vertical da pulverização. Embora permitam variação do tipo e do número de pontas, o posicionamento delas não pode ser facilmente ajustado (Deveau; Ledebuhr; Maketelov, 2021; Grella *et al.*, 2022; Salcedo *et al.*, 2021). Além disso, esses equipamentos distribuem parte das gotas e do fluxo de ar para o ambiente circundante, ultrapassando os limites da copa. Essa deposição fora do alvo deve-se frequentemente à limitação no ajuste do fluxo de ar e à regulação inadequada pelos operadores.

A regulagem e calibração de pulverizadores, quando não alinhados ao objetivo, podem acarretar desuniformidade de aplicação, perda de calda para o solo, deriva e evaporação das gotas (Crause *et al.*, 2023). Em culturas perenes, as gotas são direcionadas pelo fluxo de ar lateralmente às copas e para cima, levando tanto à deriva horizontal, através da copa, quanto à deriva vertical, acima da copa e para a atmosfera. Esse comportamento reforça a premissa de que a deposição não se restringe à faixa alvo de aplicação, podendo ser influenciada de forma significativa por condições operacionais. Portanto, torna-se crucial minimizar as perdas de produto, a subaplicação, a sobredosagem e a deposição fora do alvo (Grella *et al.*, 2022; Vigo-Morancho *et al.*, 2024).

O desempenho dos pulverizadores assistidos por ar depende da adequação do fluxo de ar à arquitetura da planta. No entanto, o ajuste fino desses equipamentos ainda representa um desafio operacional, pois os testes de campo demandam elevado esforço, tempo e instrumentos de alto custo para medição precisa das taxas de fluxo de ar (Wang *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2022). Esse cenário é agravado pelo conhecimento limitado e pela carência de treinamento técnico entre produtores, resultando frequentemente em aplicações excessivas de calda além da área alvo e em perdas estimadas entre 30 e 50% do produto aplicado (Petre; Pop; Boşcoianu, 2023; Womac *et al.*, 2022; Xun *et al.*, 2023).

Para uma aplicação eficiente, torna-se indispensável a otimização das condições operacionais, incluindo seleção adequada de pontas, taxas de aplicação, velocidades de trabalho, bem como a correta regulagem e calibração dos pulverizadores (Planas *et al.*, 2022). Dentre esses parâmetros, o tipo de ponta e a taxa de aplicação exercem influência direta sobre a deposição e a retenção foliar, além de contribuírem para a redução da deriva. Em pomares, as pontas de jato cônico vazio são comumente utilizadas, pois em altas pressões elas geram gotas finas que favorecem a cobertura e a penetração no dossel, mas possuem maior risco de deriva. Em contraste, pontas de jato plano produzem gotas mais grossas, o que pode contribuir para a redução da deriva, entretanto, essas pontas também alteram o padrão de deposição e retenção foliar, influenciando a cobertura (Cunha *et al.*, 2004; Herbst *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2023; Silva Cunha; Nomelini, 2014; Wu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025). Dentre os parâmetros de aspersão, o tipo de ponta exerce efeito significativo sobre a penetração e deposição (Sun *et al.*, 2024), o que justifica a necessidade de investigações adicionais sobre o uso adequado do tipo de ponta (Neto; Cunha, 2016).

Estudos em tecnologia de aplicação têm se concentrado em otimizar a deposição do produto no alvo, o espectro e a eficácia de controle. Entretanto, a fração de calda que atravessa

o dossel permanece pouco explorada, especialmente da cultura do cafeeiro. Essa lacuna limita a compreensão da eficiência real da aplicação e das perdas associadas ao processo. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo quantificar a deposição de traçador na fração referência (área-alvo) e na fração transpasse (calda que atravessa o dossel), sob diferentes taxas de aplicação e tipos de pontas de pulverização na cultura do cafeeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local experimental

O experimento em campo foi realizado em fevereiro de 2023 na propriedade rural Jataí (18°53'04.82" S, 47°21'09.15" O; 972 m de altitude), no município de Monte Carmelo-MG. A região possui clima do tipo Cwa (quente e úmido com inverno seco), segundo a classificação de Köppen-Geiger (Beck *et al.*, 2023). As análises laboratoriais foram conduzidas no Centro de Excelência em Mecanização Agrícola (CEMA) e no Laboratório de Mecanização Agrícola (LAMEC), ambos vinculados ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) da Universidade Federal de Uberlândia.

2.2 Caracterização da lavoura

O ensaio foi conduzido em uma lavoura de cafeeiro da cultivar Mundo Novo, com seis anos de idade, implantada no espaçamento de 3,8 x 0,6 m. No momento do ensaio, as plantas encontravam-se em fase de enchimento de grãos. Para a caracterização estrutural do dossel, foram mensuradas a altura de dez plantas, o diâmetro médio da copa e o espaçamento entre linhas de cultivo, obtendo os valores médios de 2,75 m para altura e 1,64 m para diâmetro da copa. O volume de vegetação da cultura foi calculado com base na forma da copa, conforme metodologia descrita por Guo *et al.* (2024), resultando em volume de 11.868 m³ ha⁻¹.

2.3 Arranjo experimental

O experimento adotou um esquema fatorial 3 x 2, com quatro repetições. Os fatores consistiram em três taxas de aplicação (200, 400, 600 L ha⁻¹) e dois tipos de ponta de pulverização (jato cônico vazio e jato plano). As amostras foram coletadas em uma estrutura hierárquica (aninhada) em múltiplas posições: dois lados de aplicação (esquerdo e direito da rua de aplicação), três terços da planta (superior, mediano e inferior) e duas posições do ramo plagiotrópico (interno e externo). Os tratamentos principais (taxa e ponta) foram casualizados, enquanto as coletas aninhadas seguiram uma ordem sistemática dentro da parcela.

Cada parcela experimental foi composta por dez linhas de 40 metros de comprimento. A área útil correspondeu aos 20 m centrais das duas linhas centrais, utilizando-se 10 m de

bordadura em cada extremidade. Para evitar contaminação entre tratamentos, as parcelas foram separadas por uma bordadura de oito linhas de plantas e 30 metros de distância (Figura 1).

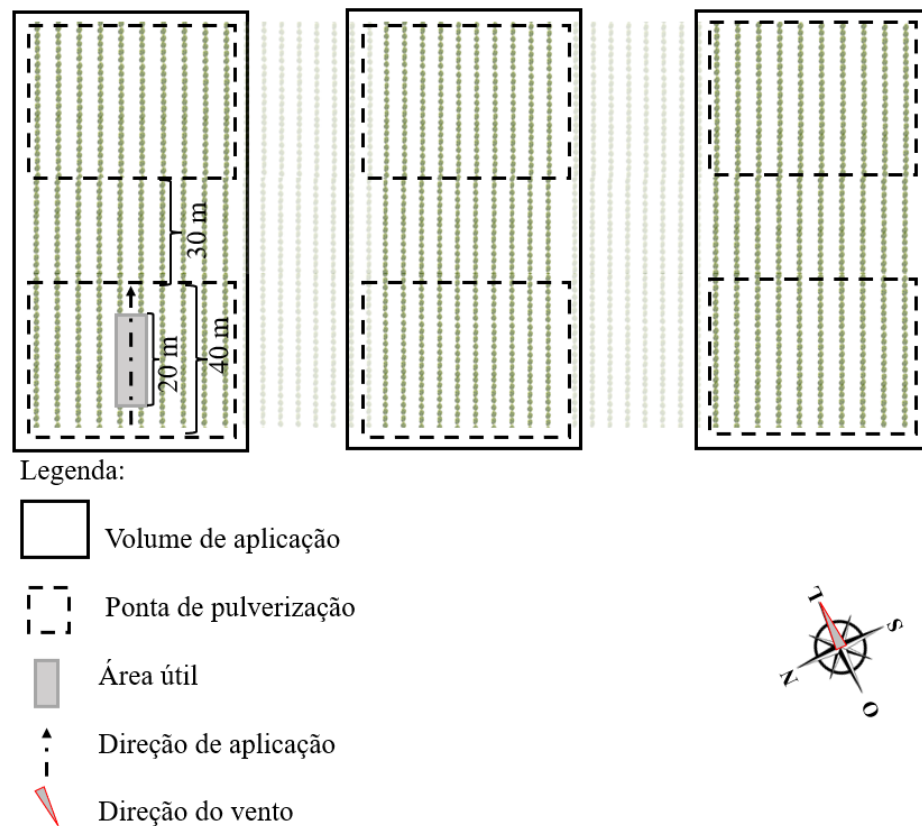


FIGURA 1. Experimento em campo, destacando as áreas de cada tratamento, área útil central, as bordaduras utilizadas para o controle de contaminação entre tratamentos e direção de aplicação e do vento.

2.4 Variáveis de estudo

A variável resposta foi o depósito de traçador quantificado nas frações da área pulverizada. O depósito foi quantificado em folhas de diferentes locais (lados de aplicação, terços da planta e posições do ramo), nas frações 1 e $\frac{1}{2}$ da área pulverizada, baseado na norma ISO 22866 (2005) (Figura 2).

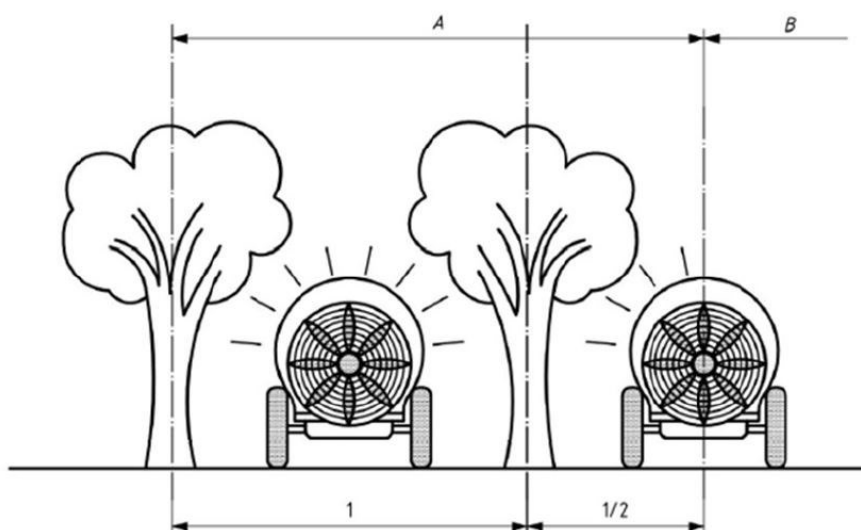


FIGURA 2. Ilustração da pulverização usando um pulverizador assistido por ar (Fonte: ISO 22866, 2005). De acordo com a norma, a seção A mostra a área pulverizada, enquanto a seção B ilustra a zona de deriva da pulverização.

A normativa não discorre sobre as frações contidas na área pulverizada. Assim, o depósito quantificado na fração 1 foi denominado como referência (coletado no lado da planta voltado para a rua de passagem do pulverizador), enquanto o depósito na fração $\frac{1}{2}$ foi definido como transpasse (coletado no lado oposto da planta) (Figura 3).

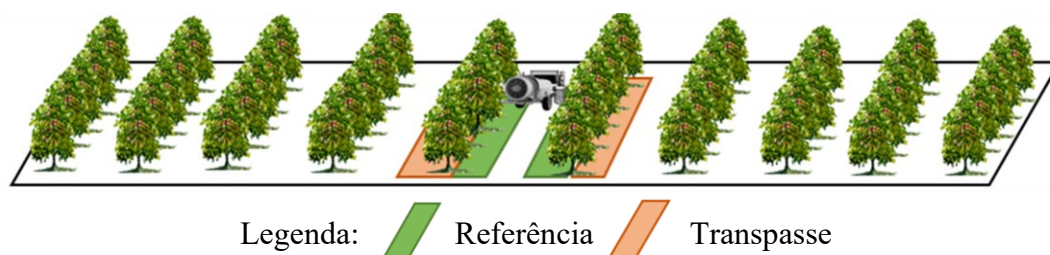


FIGURA 3. Representação detalhada dos alvos de amostragem na cultura do café, definindo o depósito referência (coletado na rua de aplicação) e o depósito transpasse (coletado em parte da rua adjacente, correspondendo à fração $\frac{1}{2}$ da área pulverizada).

2.5 Composição da calda e condições de aplicação

Para determinar o depósito, adicionou-se à calda o corante alimentício Azul Brilhante, catalogado internacionalmente pela “Food, Drug & Cosmetic” (FD&C Blue n.1) como traçador, na dose de 600 g ha^{-1} . Para manter a dose constante entre os tratamentos, a concentração do traçador na calda foi ajustada para cada taxa de aplicação: $3,0 \text{ g L}^{-1}$ (para 200L

ha⁻¹), 1,5 g L⁻¹ (para 400L ha⁻¹) e 1,0 g L⁻¹ (para 600L ha⁻¹). Para cada tratamento, foi preparado um volume de 200 L de calda. As aplicações foram realizadas sob as seguintes condições meteorológicas médias, obtidas por meio de uma estação modelo Vantage Pro2 (Davis, Hayward, CA, USA): temperatura de 28,4°C, umidade relativa do ar de 66,25%, velocidade do vento de 2,4 km h⁻¹, com direção predominante leste.

2.6 Maquinário utilizado, regulagem e calibração

A aplicação dos tratamentos foi realizada por um pulverizador turbo de arrasto, modelo Arbus 2000 TF 2P (Jacto, Pompeia, São Paulo, Brasil) com capacidade para 2.000 litros, equipado com 12 porta bicos em cada arco lateral (totalizando 24 bicos), ventilador de 850 mm de diâmetro, velocidade do ar de 95 km h⁻¹ e volume do ar de 11,2 m³ s⁻¹. A regulagem das pás do ventilador foi mantida na configuração padrão utilizada por produtores do Cerrado Mineiro, posição de maior volume de ar (posição A).

O trator usado para tracionar o pulverizador foi um Massey Ferguson 4x2 TDA, modelo 4265 compacto (Massey Ferguson, Canoas, Rio Grande do Sul, Brasil), com potência nominal de 65 cv (48 kW). Determinou-se a rotação do motor do trator para obtenção de 540 rpm na tomada de potência utilizando o tacômetro digital da marca Minipa®, modelo MDT2238A (Minipa®, Santo Amaro, São Paulo, Brasil). O trator operou em rotação fixa de 1.980 rpm, em terceira marcha reduzida, resultando em velocidade de deslocamento de 6,45 km h⁻¹, mantida constante em todos os tratamentos. O conjunto foi previamente lavado e descontaminado com o produto Oxiclean (Oxiquímica Agrociência, Jaboticabal, São Paulo, Brasil)

Para configuração das taxas de aplicação dos tratamentos, realizou-se a calibração do pulverizador por meio do ajuste da pressão de pulverização. Utilizando-se um kit para manômetro, modelo M615 (Magnojet, Ibaiti, Paraná, Brasil) e uma proveta graduada de 1 L, com escala de 10 mL, a uniformidade de vazão foi verificada mediante a coleta individual do volume pulverizado por cada uma das 24 pontas durante um minuto. A partir desses dados, calculou-se o coeficiente de variação (CV%), obtendo-se valores inferiores ao limite aceitável de 10% (Baio *et al.*, 2024) (Tabela 1).

TABELA 1. Parâmetros operacionais de calibração do pulverizador turbo para atingir as taxas de aplicação (200, 400 e 600 L ha⁻¹) com as pontas de jato plano e cônico vazio, e o coeficiente de variação das pontas

Tratamento	Taxa de aplicação (L ha ⁻¹)	Modelo	Jato	Vazão (L min ⁻¹)	Pressão (kPa)	CV %
T1	200	BD01	Plano	0,34	207	2,22
T2	400	BD02	Plano	0,68	207	2,77
T3	600	BD025	Plano	1,02	289	1,84
T4	200	MAG1	Cônico vazio	0,34	413	1,87
T5	400	MAG1,5	Cônico vazio	0,68	723	3,04
T6	600	MAG2	Cônico vazio	1,02	1034	2,67

*De acordo com o fabricante (Magnojet), nas condições de pressão utilizadas, as pontas BD02 e BD025 produzem gotas médias, enquanto as demais produzem gotas finas. Todas com ângulo de jato de 80°.

Um procedimento foi estabelecido para a regulagem do alinhamento vertical das pontas em relação ao dossel da planta, utilizando uma haste, fita métrica, barbante e canetão. Com a fita métrica, mensurou-se a distância da ponta de pulverização até o meio do ramo plagiotrópico (D) e a altura média de plantas (A). A altura da planta foi dividida pelo número de vãos entre os pontas (11 vãos), para determinar o espaçamento e permitir o correto alinhamento. Com o espaçamento encontrado, as demarcações foram feitas na haste, posicionando-a na distância encontrada (da ponta ao meio do ramo plagiotrópico) e o ajuste foi feito com o barbante esticado da ponta até as demarcações. Destaca-se que a regulagem iniciou-se de baixo para cima. A primeira ponta e defletor de ar inferior foram alinhados em direção ao ponto inferior da saia da planta e as pontas seguintes às marcações feitas na haste, com a última ponta e o defletor superior alinhadas para a última marcação, 10 centímetros acima do topo da planta (Figura 4).

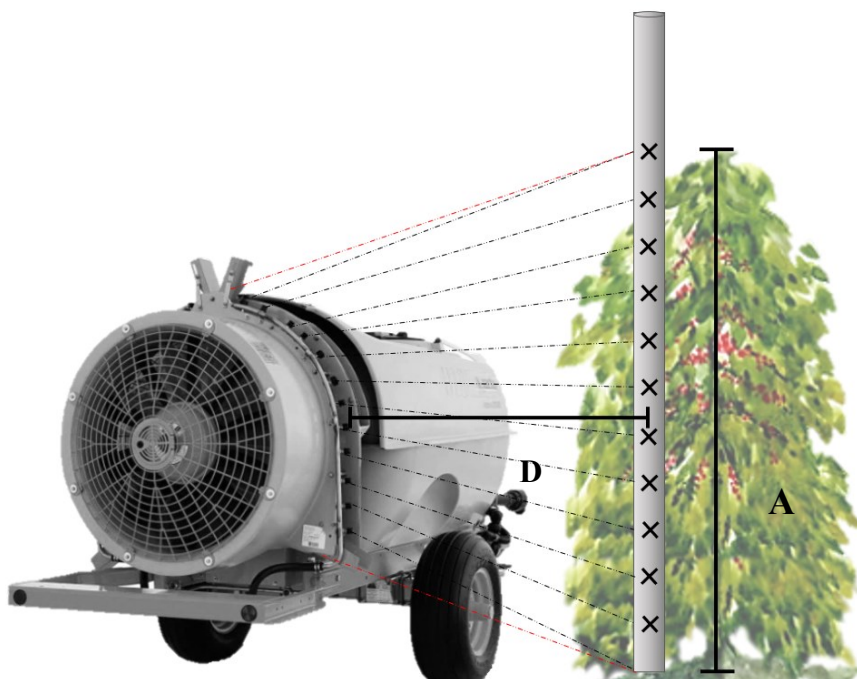


FIGURA 4. Procedimento de alinhamento vertical das pontas de pulverização em relação à arquitetura da planta de café, utilizando a altura da planta (A) e a distância do arco até o centro do ramo plagiotrópico (D) como referências.

Para assegurar a uniformidade de distribuição da calda e evitar a sobreposição excessiva de jatos, as pontas de jato plano foram ajustadas com uma angulação de 15° em relação ao arco do ramal (Figura 5).



FIGURA 5. Otimização do padrão de deposição para pontas de jato plano: ajuste angular de 15° para prevenir a distorção do jato e assegurar a uniformidade da distribuição ao longo do arco de pulverização

2.7 Esquema de aplicação e coleta das amostras

A aplicação foi realizada com uma única passada do pulverizador na rua de aplicação (Figura 6); assim foi possível a avaliação do depósito nas duas frações da área pulverizada.

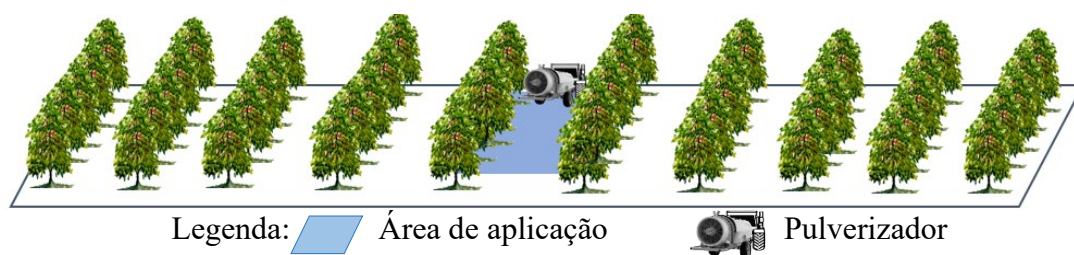


FIGURA 6. Representação esquemática da aplicação em passada única do turbo atomizador em cafeeiro, método utilizado para avaliar o depósito de gotas em frações da área pulverizada

Após a secagem do traçador sobre a superfície foliar, procedeu-se à coleta. Coletaram-se duas folhas por ponto amostral, seguindo a estrutura hierárquica do experimento: dois lados de aplicação (esquerdo e direito da rua de aplicação), três terços do dossel (superior, mediano e inferior) e nas posições externa ($3^{\circ}/4^{\circ}$ par de folha a partir da extremidade do ramo plagiotrópico) e interna ($2^{\circ}/3^{\circ}$ par de folha a partir do ramo ortotrópico (Figura 7).

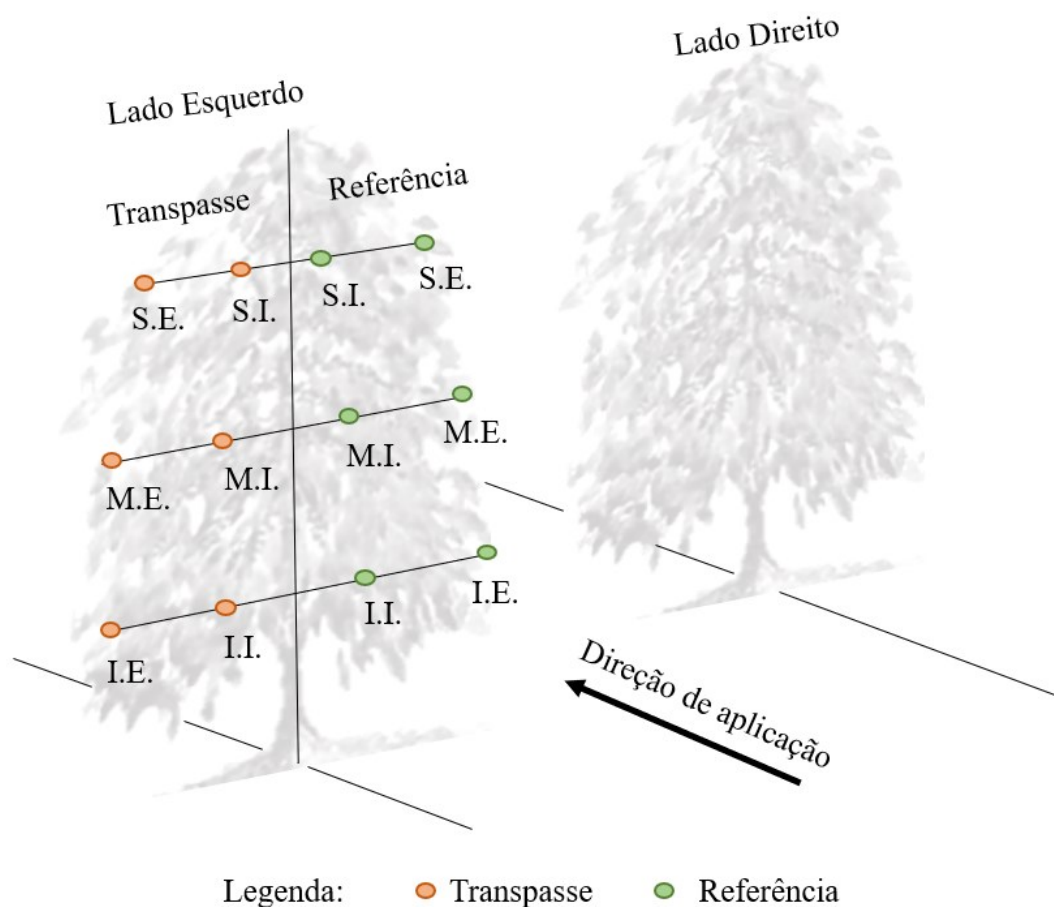


FIGURA 7. Estrutura de amostragem hierárquica na planta de café, ilustrando os pontos de coleta nos terços do dossel (superior, mediano, inferior) e nas posições do ramo (interno e externo) em ambas as frações da área pulverizada

Todas as amostras foram acondicionadas individualmente em sacos plásticos identificados e armazenadas em caixas térmicas de isopor, mantidas ao abrigo de luz, a fim de preservar a integridade das amostras e minimizar a degradação do traçador até a análise laboratorial.

2.8 Determinação da deposição do traçador

Em laboratório, o traçador foi extraído das folhas por meio de lavagem com um volume fixo de 20 mL de água destilada por amostra. A solução resultante foi mantida em repouso por 24 horas para decantação de partículas. A leitura de absorvância foi realizada em um espectrofotômetro, modelo V-5000 (Metash®, Songjiang District, Shanghai, China), no comprimento de onda de 630 nm. A concentração do traçador em cada amostra foi determinada

a partir de uma calibração espectrofotométrica previamente estabelecida, baseada na relação linear entre absorbância e concentração (Gráfico 1).

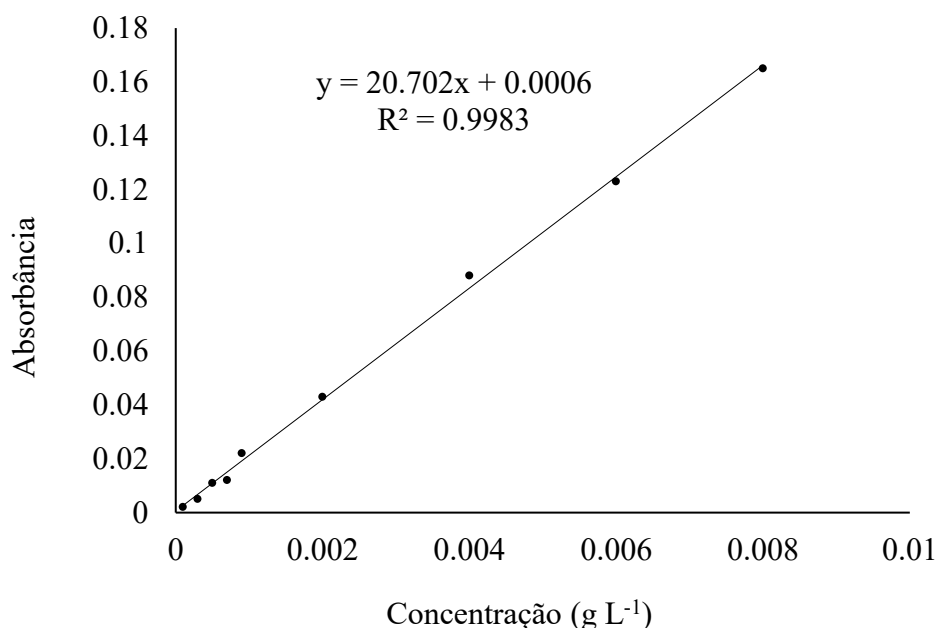


GRÁFICO 1. Calibração espectrofotométrica do traçador utilizada para determinar a concentração das amostras

A área de cada folha foi determinada com um medidor de área foliar (Area Meter), modelo LI 3100C (Lincoln, Nebraska, Estados Unidos). A massa do traçador foi calculada pela equação de diluição e o depósito final foi normalizado pela área foliar (Equação 1).

$$C_i \cdot V_i = C_f \cdot V_f \quad (1)$$

Onde:

C_i = concentração do traçador na calda aplicada (g L⁻¹);

V_i = volume capturado pelo alvo (mL);

C_f = concentração do traçador na amostra (g L⁻¹);

V_f = volume de diluição da amostra (mL).

2.9 Análises estatísticas

A análise dos dados foi realizada por meio de modelos lineares mistos (LMM), considerando efeitos fixos e aleatórios, adequados para a estrutura hierárquica do experimento. Em experimentos complexos, especialmente na presença de dependência entre observações, o uso de modelos mistos proporciona maior acurácia das estimativas (Carvalho *et al.*, 2023).

Inicialmente, os dados foram avaliados quanto à presença de *outliers* por meio de *boxplots*. Os pressupostos de homoscedasticidade e normalidade dos resíduos foram validadas por gráficos QQ-plots (Ieno *et al.*, 2009). Todas as variáveis atenderam aos pressupostos para a geração dos modelos, os quais foram ajustados utilizando o pacote lme4 (Bates *et al.*, 2015), com parâmetros estimados pelo método da máxima verossimilhança restrita (REML).

Foram considerados como efeitos fixos a taxa de aplicação, o tipo de ponta, o lado de aplicação, o terço das plantas e a posição do ramo, incluindo suas interações. Como efeitos aleatórios, foram tratados a área de aplicação (bloco experimental) e os terços dentro de cada lado de aplicação. Quando observadas diferenças significativas, as médias estimadas foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, utilizando o pacote *emmeans* (Lenth, 2018). Todas as análises foram conduzidas no ambiente R, por meio do software RStudio, versão 4.3.1 (R Core Team, 2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Depósito na fração referência

Na fração referência, a interação entre taxa de aplicação e tipo de ponta foi significativa. A ponta de jato plano proporcionou maiores valores de depósito em todas as taxas de aplicação, com destaque para 400 L ha⁻¹, no qual foi observado maior acúmulo do traçador, sendo estatisticamente superior à ponta de jato cônico nesta mesma taxa. Para ponta de jato cônico, os maiores depósitos ocorreram em 200 e 600 ha⁻¹, não diferindo entre si (Figura 8).

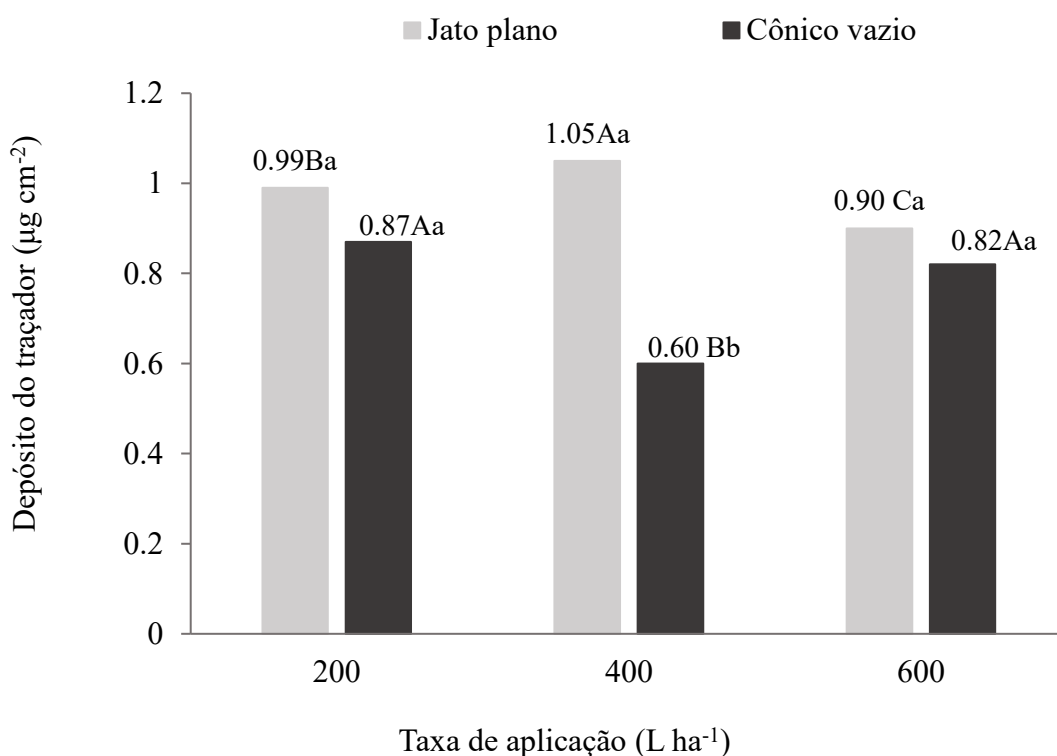


FIGURA 8. Depósito de traçador em fração referência sob taxa de aplicação e tipo de ponta no cafeeiro. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente, de acordo com o teste de Tukey a um nível de significância de 0,05. Letras maiúsculas comparam as taxas dentro do fator pontas, enquanto letras minúsculas comparam os tipos de pontas dentro do fator taxa.

A ponta de jato plano tende a operar em pressões de trabalho mais baixas, produzindo gotas de maior diâmetro. Gotas de maior diâmetro apresentam maior inércia e maior probabilidade de interceptação primária pelo dossel. Em contraste, a ponta de jato cônico trabalha a pressões mais elevadas, produzindo gotas mais finas, que seguem um caminho mais

lento e sinuoso até o alvo. Por terem menor diâmetro, estas gotas apresentam maior suscetibilidade à deriva, o que reforça a importância de estratégias como a escolha das pontas, o ajuste da pressão de trabalho e o uso de adjuvantes para otimizar a deposição (Ítmec *et al.*, 2022; Makhnenko *et al.*, 2021; Milamowski *et al.*, 2022). De fato, a correta calibração da pressão é um fator crítico para definir o tamanho das gotas, controlar a deriva e favorecer a penetração na copa (Jiang *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2024; Xue *et al.*, 2023). Embora a pressão de pulverização não tenha sido avaliada como uma variável experimental neste estudo, seus efeitos potenciais devem ser considerados, uma vez que está diretamente associada às características operacionais de cada ponta utilizada e influencia o espectro de gotas gerado, podendo contribuir para as diferenças observadas na deposição.

A significativa redução do depósito na porção interna do ramo evidencia o efeito de filtragem exercido pelo dossel denso do cafeeiro, no qual as folhas externas atuam como a primeira barreira física à interceptação da nuvem pulverizada (Figura 9).

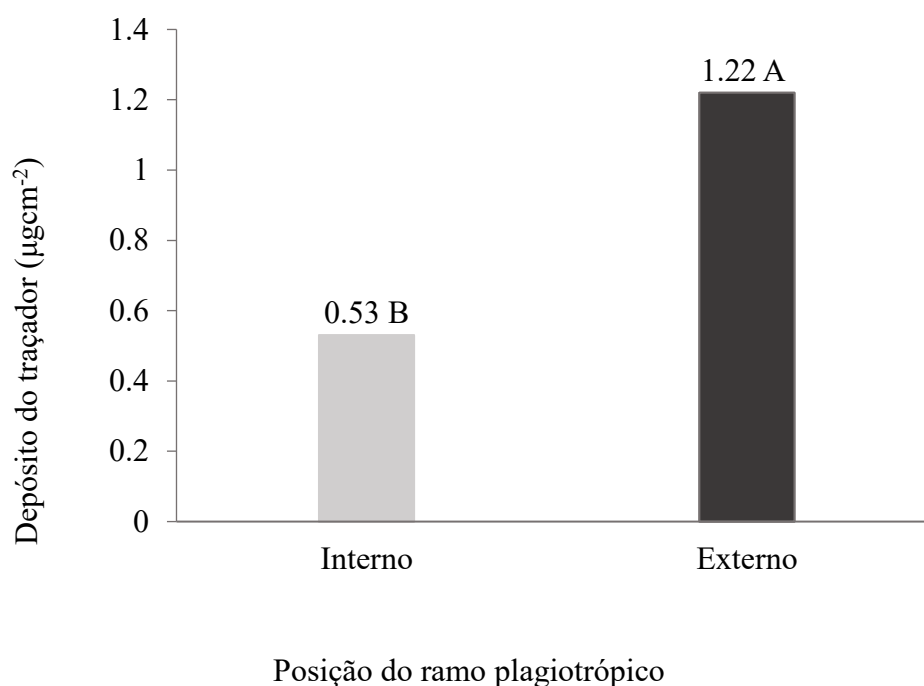


FIGURA 9. Depósito de traçador em fração referência em posições do ramo plagiotrópico do cafeeiro. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a significância de 0,05

A barreira exercida pelas folhas externas do cafeeiro limita a penetração das gotas para as camadas internas, criando uma “sombra de pulverização” e resultando em menor disponibilidade de calda nessas regiões. Em culturas perenes com arquitetura densa, como o

cafeeiro, esse fenômeno favorece a deposição nas regiões externas da copa, podendo comprometer a eficiência da aplicação ao reduzir a cobertura e a uniformidade da distribuição do produto (Owen-Smith; Wise; Grieshop, 2019). Como consequência, pragas e patógenos localizados no interior da planta podem receber menores quantidades de ingrediente ativo.

Yan *et al.* (2022) destacam que a arquitetura da planta interfere na movimentação do ar dentro e em torno da copa, alterando sua energia e modificando a trajetória e a deposição das gotas. Dessa forma, a estrutura da copa e a densidade foliar determinam o comportamento das gotas no interior do dossel, impactando diretamente a eficácia do controle. Diante disso, estratégias voltadas à melhoria da penetração tornam-se fundamentais. Técnicas como a pulverização eletrostática podem favorecer a atração e a aderência das gotas às superfícies foliares, contribuindo para o aumento do depósito em posições internas e para a redução de perdas (Herkins *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2024).

A distribuição do depósito de traçador apresentou variabilidade espacial ao longo do dossel. A deposição máxima foi observada a 200 L ha^{-1} , no terço superior do lado direito de aplicação. No lado esquerdo, sob essa mesma taxa, a deposição mostrou-se mais uniforme entre os terços. Na taxa de 400 L ha^{-1} , verificou-se aumento do depósito no terço mediano do lado esquerdo, enquanto no lado direito ocorreu redução. Na taxa de 600 L ha^{-1} , observou-se diminuição do depósito com o aumento da altura do dossel, particularmente no lado esquerdo. Em contraste no lado direito, notou-se incremento da deposição no terço superior (Figura 10).

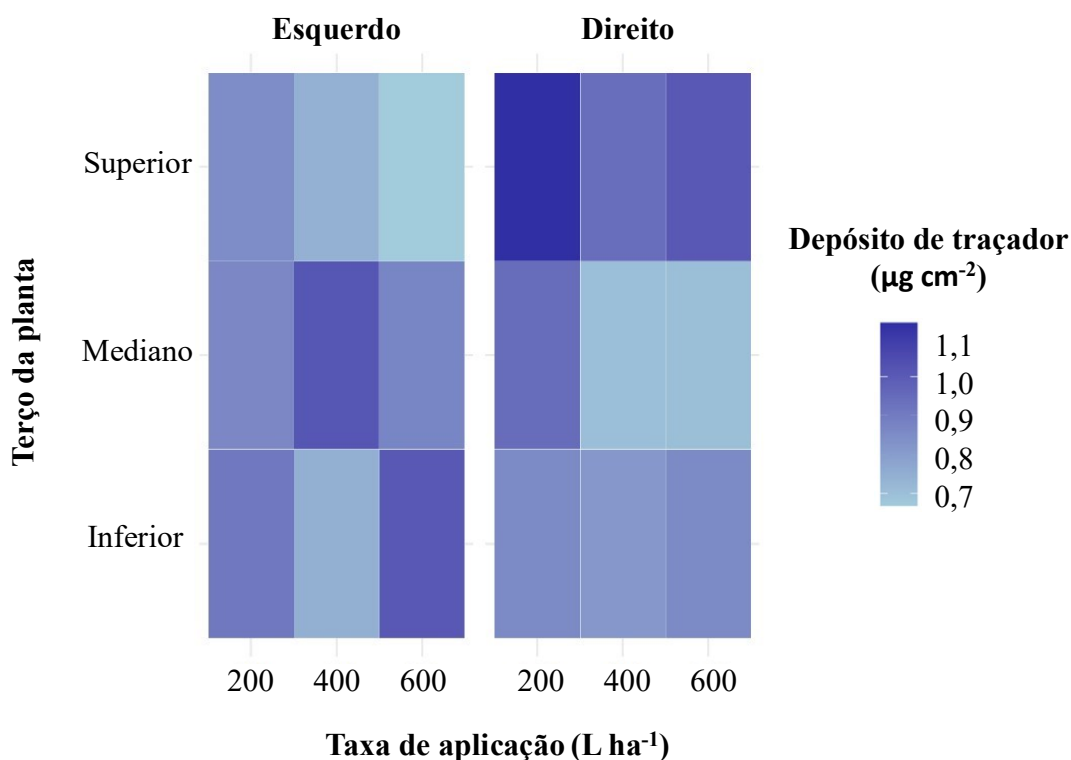


FIGURA 10. Distribuição espacial do depósito de traçador em fração referência, nos diferentes terços do cafeeiro e em lados de aplicação, em função das taxas de aplicação

A variabilidade de depósito entre os lados e os terços pode ser atribuída às interações físicas entre a dinâmica do fluxo de ar e a arquitetura da planta. Em campo, foi observado que o fluxo de ar no lado direito apresentava direção descendente e alinhamento com os ramos plagiotrópicos do cafeeiro, enquanto no lado esquerdo apresentava movimento ascendente e maior barreira com a estrutura foliar. Assim, quando o fluxo de ar penetra em regiões do dossel com menor densidade foliar e acompanha a orientação dos ramos, o transporte das gotas ocorre com menor resistência aerodinâmica, favorecendo o depósito. Por outro lado, quando o fluxo de ar incide contra os ramos e regiões mais densas do dossel, a capacidade de transporte e penetração nos diferentes terços da planta tende a ser reduzida. Estes processos, associados ao menor diâmetro das gotas e às forças de tensão superficial, influenciam diretamente a retenção nas superfícies foliares e evidenciam a complexidade das interações entre fluxo de ar, arquitetura da planta e dinâmica de deposição. Khot (2022) e Rathnayake *et al.* (2021) demonstraram que o lado direito do dossel recebe uma maior velocidade do ar em função da direção de rotação da turbina, resultando em aumento da deposição, enquanto uma maior

penetração no terço médio da planta é observada no lado esquerdo devido à persistência horizontal do fluxo de ar.

A variação do depósito de gotas evidencia a distribuição desuniforme recorrente em aplicações com turbo atomizadores. Embora maiores valores de deposição possam sugerir maior eficiência, esse acúmulo não representa uma deposição otimizada, mas sim um indicativo de sobredosagem e escoamento superficial. Em altas taxas de aplicação, a energia do fluxo de ar favorece a penetração inicial da nuvem no dossel (Santinato *et al.*, 2019). No entanto, ao interceptar a densa barreira foliar do terço inferior, característica da arquitetura da planta (Alves *et al.*, 2020), o excesso de calda promove a saturação das superfícies, a coalescência das gotas e o subsequente escoamento superficial, reduzindo a eficiência de retenção do produto. Esse processo gera um efeito de lavagem, concentrando o traçador em regiões basais da copa. Portanto, picos de depósito devem ser interpretados com cautela, pois possivelmente refletem baixa eficiência de aplicação, associada a maiores perdas para o solo e risco de fitotoxicidade por concentração localizada de produto.

Além disso, a uniformidade da deposição ao longo no dossel tende a diminuir sob maiores taxas de aplicação, uma vez que a nuvem de pulverização mais densa favorece a sobreposição e o aumento do diâmetro médio das gotas. Esse evento reduz a capacidade de penetração no interior da copa e, conseqüentemente, o depósito, aumentando as perdas por escoamento de calda (Li *et al.*, 2023; Michael *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2024).

No contexto de menores taxas de aplicação, a menor densidade da nuvem pulverizada aumenta a mobilidade das gotas, favorecendo a penetração no dossel e proporcionando melhor distribuição entre os diferentes terços da planta. Além disso, a menor concentração reduz a sobreposição, minimizando as perdas por escoamento e contribuindo para maior eficiência da aplicação (Alves *et al.*, 2020). Dessa forma, o uso de taxas reduzidas pode resultar em maior eficiência de deposição, sem comprometer de forma significativa a uniformidade entre os terços da planta.

A variabilidade espacial do depósito observada nesse estudo reforça a necessidade de estratificar as plantas em terços e considerar os lados de aplicação na quantificação da retenção do traçador. Sinha *et al.* (2020) destacam que, dentro da faixa de aplicação, a distribuição uniforme da pulverização na copa é determinante para o controle eficaz de pragas, independentemente da tecnologia empregada. Assim, além de assegurar uma distribuição uniforme durante a aplicação, deve-se buscar deposição consistente entre os terços e lados da planta. Essa uniformidade é fundamental para garantir a eficiência do controle fitossanitário e

otimizar o uso de insumos, uma vez que a distribuição heterogênea do produto pode resultar simultaneamente em áreas subdosadas e superdosadas dentro da mesma planta.

3.2 Depósito na fração transpasse

A deposição na fração transpasse foi influenciada pelos parâmetros operacionais (taxa de aplicação e tipo de ponta), com menor efeito para os lados de aplicação. A ponta de jato plano proporcionou maior depósito nas taxas de 200 e 400 L ha⁻¹, enquanto o depósito foi reduzido para ambas as pontas na taxa de 600 L ha⁻¹ (Figura 11).

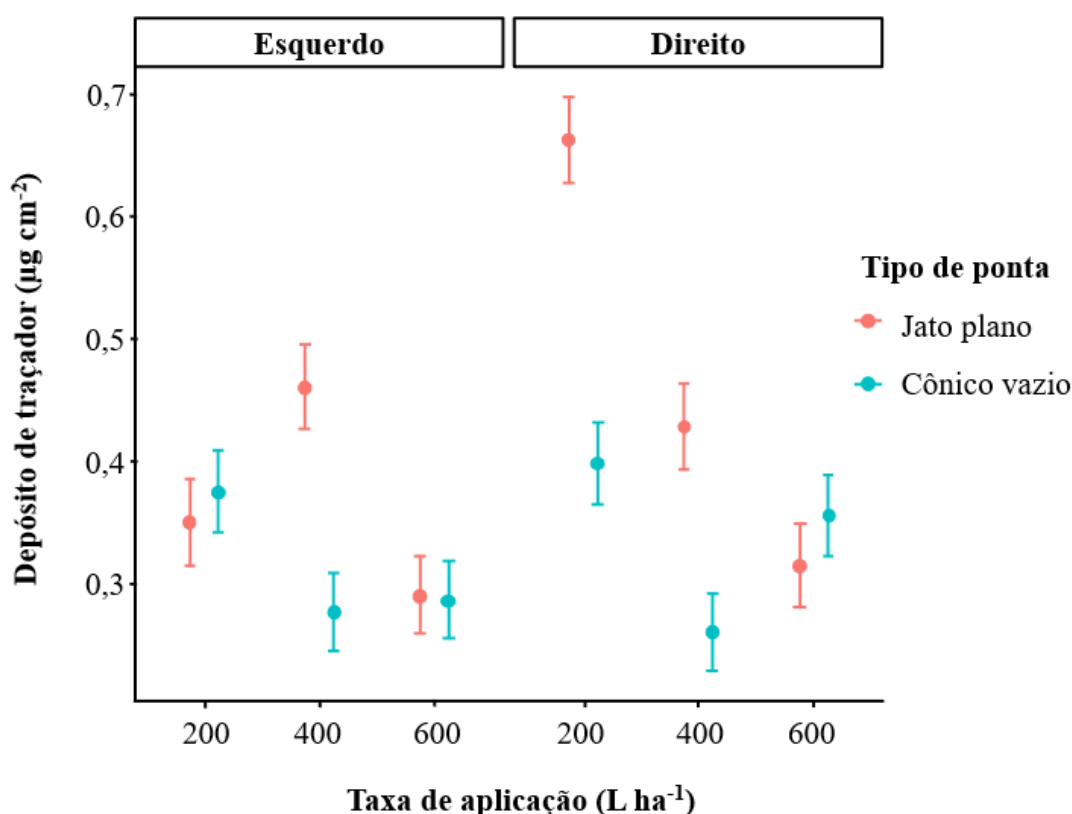


FIGURA 11. Depósito de traçador em fração transpasse, utilizando diferentes tipos de pontas e taxas de aplicação em cafeeiro, em lados de aplicação

Embora a dinâmica assimétrica do fluxo de ar tenha gerado heterogeneidade na fração referência, esse efeito foi atenuado na fração transpasse. Após atravessar o dossel, as gotas perdem energia cinética, resultando em uma nuvem mais difusa e, consequentemente, em deposição mais uniforme no lado oposto da planta.

Nota-se que o depósito da fração transpasse foi governado principalmente por ajustes operacionais, enquanto os lados de aplicação, que diferem em termos de dinâmica de fluxo de ar, tiveram menor efeito. O fluxo de ar excessivo ou mal direcionado pode promover distribuição irregular da pulverização e aumentar as perdas de produto (Wang *et al.*, 2025). Assim, embora o fluxo de ar heterogêneo do pulverizador utilizado gere deposição irregular entre lados e terços do dossel na fração referência, essa tendência não se manteve na fração transpasse. As gotas que atravessaram a primeira camada foliar atingiram o lado oposto com menor energia e maior dispersão, favorecendo uma distribuição mais homogênea nessa fração.

Os dados indicam que o ajuste dos parâmetros operacionais pode melhorar a penetração das gotas na copa e reduzir perdas por transpasse. Além disso, a otimização dessas variáveis em função da arquitetura da copa e do estágio fenológico da cultura pode elevar a eficiência de deposição. Estudos futuros devem investigar a relevância do depósito de transpasse em diferentes densidades de dossel e estágios de desenvolvimento, bem como avaliar estratégias complementares, como o uso de adjuvantes, visando estabelecer configurações operacionais mais precisas que otimizem o depósito nas diferentes frações da área pulverizada.

Em ambas as posições do ramo plagiotrópico, as taxas de 200 e 400 L ha⁻¹ com a ponta de leque plano proporcionaram maiores depósitos de transferência. Com a ponta cônica, apenas a taxa de 200 L ha⁻¹ demonstrou maior depósito de transferência e somente em posição externa do ramo. Sob a maior taxa (600 L ha⁻¹), os valores de depósito apresentaram-se menores para ambas as pontas (Figura 12).

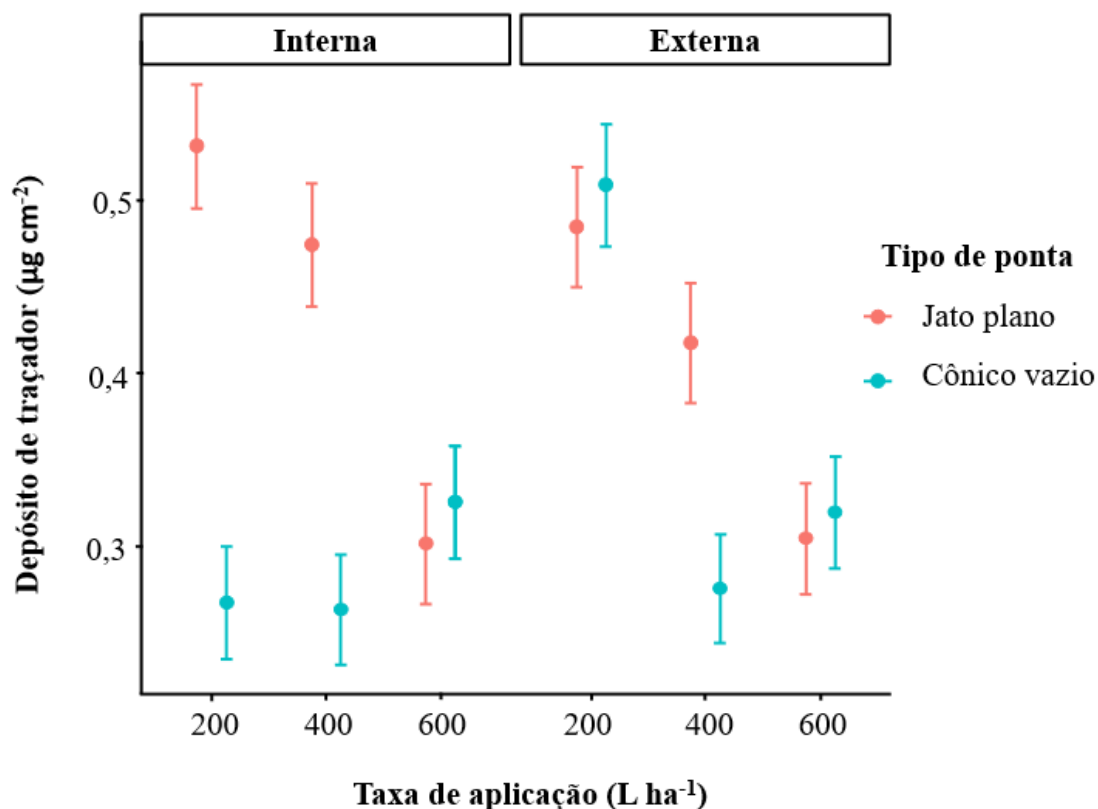


FIGURA 12. Depósito em fração transpasse em função dos tipos de pontas e taxas de aplicação nas posições interna e externa do ramo plagiotrópico do cafeeiro

De modo geral, o depósito na fração transpasse apresentou distribuição homogênea entre as posições do ramo, o que pode ser atribuído à perda de energia cinética e à maior dispersão das gotas após atravessarem o dossel. Durante a pulverização com assistência de ar, a nuvem atinge inicialmente o lado da planta voltado para a passagem do pulverizador (fração referência), onde ocorre maior interceptação pelas camadas externas do ramo. À medida que o fluxo de ar se dissipa no interior da copa, as gotas remanescentes passam a se deslocar com menor velocidade e de forma difusa, resultando em deposição mais uniforme no lado oposto da planta (fração transpasse). Contudo, na menor taxa de aplicação com a ponta de jato cônico vazio, observou-se variação expressiva do depósito entre posições do ramo, possivelmente em função da menor densidade da nuvem de pulverização e do predomínio de gotas finas, mais suscetíveis a turbulência e a desvios de trajetória. Além disso, essa diferença pode estar associada ao deslocamento vertical das gotas durante a pulverização, sugerindo que parte delas pode ter sido desviada para regiões superiores ao dossel e posteriormente interceptada pela posição externa da copa, resultando em maior deposição.

Em termos quantitativos, aproximadamente 29% do traçador foi direcionado à fração transpasse, com deposição média de $0,87 \mu\text{g cm}^{-2}$ na fração referência e $0,36 \mu\text{g cm}^{-2}$ na fração transpasse, evidenciando que parte da calda não foi efetivamente retida pelo alvo. Esse resultado indica que o volume aplicado pode atravessar o dossel denso e ultrapassar a linha tratada, com potencial de atingir fileiras adjacentes. Tal comportamento pode estar associado, principalmente, à regulação imprecisa do fluxo de ar, que favorece a penetração excessiva das gotas no interior da copa e seu subsequente deslocamento para além do alvo, aumentando o potencial de sobreposição e deriva (Li *et al.*, 2023). Diante desse cenário, observa-se potencial para otimização das condições operacionais, visando aumentar a eficiência de deposição e reduzir perdas durante a pulverização.

Do ponto de vista operacional, essa dinâmica reflete baixa eficiência de retenção e aproveitamento inadequado do volume aplicado. Agronomicamente, a distribuição desuniforme do produto no campo pode ocasionar superdosagem localizada, risco de fitotoxicidade, contaminação ambiental e desperdício de insumos, ao mesmo tempo em que áreas de menor cobertura podem expor pragas e patógenos a doses subletais, favorecendo falhas de controle e seleção de populações resistentes (Irsel, 2021; Kumar; Ajaykumara, 2022).

A dinâmica da ponta de jato plano, caracterizada por gotas de maior diâmetro e maior energia de impacto individual, associada às menores taxas de aplicação, que resultam em menor densidade da nuvem de pulverização, pode favorecer uma menor interceptação inicial na porção externa do dossel. Consequentemente, uma maior fração do volume aplicado atravessa a copa, resultando em incremento do depósito na fração transpasse. Entretanto, esse aumento do depósito não deve ser interpretado como maior eficiência de penetração ou de cobertura interna, mas sim como indicativo de menor retenção do produto na fração referência.

Por outro lado, a utilização da ponta de jato cônico vazio na menor taxa de aplicação (200 L ha^{-1}) possibilitou alcançar deposição mais uniforme e eficiente em fração referência, ao mesmo tempo em que reduziu o depósito da fração transpasse, minimizando a sobreposição, a deriva e o potencial de contaminação ambiental. Essa estratégia também contribui para a sustentabilidade econômica da aplicação, ao reduzir o desperdício de insumos e melhorar a relação custo-benefício para o produtor. Resultados semelhantes foram relatados por Alves *et al.* (2020), que verificaram que a redução da taxa de aplicação para volumes próximos a 200 L ha^{-1} pode incrementar a deposição de gotas, além de reduzir perdas para o solo.

Em termos práticos, nas condições deste estudo, a combinação da ponta cônica com a taxa de 200 L ha^{-1} mostrou-se a estratégia mais equilibrada. Esta configuração otimizou o

depósito na fração referência e minimizou o excesso na fração transpasse, sugerindo maior eficiência operacional, menor risco de sobredosagem e menor perda para o ambiente. Para maior mitigação das perdas por transpasse, recomenda-se que pesquisas futuras avaliem essas perdas por meio de diferentes métodos para cálculo de volume de calda em pomares, incluindo modelos como TRV (Tree Row Volume), baseado na área da parede foliar, e o LWA (Leaf Wall Area), que considera o volume da linha de árvores (Zhou *et al.*, 2023), além dos diversos sistemas de apoio a decisão - DSSs (Decision Support systems) (Planas *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÕES

A deposição na cultura do cafeeiro foi influenciada pela interação entre a taxa de aplicação e o tipo de ponta, evidenciando elevada variabilidade espacial ao longo do dossel e dentro da área alvo de aplicação.

Entre as estratégias avaliadas, a combinação da ponta de jato cônico vazio com a taxa de aplicação de 200 L ha⁻¹ apresentou o melhor desempenho, promovendo maior depósito na fração referência e, simultaneamente, reduzindo o depósito na fração transpasse. Em contraste, a ponta de jato plano, especialmente nas taxas de 200 e 400 L ha⁻¹, intensificou o depósito na fração transpasse, indicando menor precisão da aplicação e maior potencial de perdas. Além disso, o aumento da taxa de aplicação não promoveu melhoria da deposição, sendo associado à saturação foliar e ao escorrimento, caracterizando baixa eficiência de retenção.

A fração transpasse foi responsável por aproximadamente 29% do volume depositado, mostrando-se um indicador da eficiência de retenção do produto na área-alvo e da qualidade operacional da pulverização, sendo relevante para a otimização das aplicações assistidas por ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, T. C.; CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, G. S.; SILVA, S. M.; LEMES, E. M. Canopy volume and application rate interaction on spray deposition for different phenological stages of coffee crop. **Coffee Science**, v. 15, p. 1–14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.25186/v15i.1777>.
- BAIO, F. H.; OLIVEIRA, J. T. D.; SANTOS, L. A.; CUNHA, F. F. D.; TEODORO, P. E. Evaluation of spray nozzle wear under field conditions. **Engenharia Agrícola**, v. 44, e20230149, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v44e20230149/2024>
- BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, p. 1–48, 2015. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.
- BECK, H. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; LUTSKO, N. J.; DUFOUR, A.; MIRALLES, D. G. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. **Scientific Data**, v. 10, p. 724, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02549-6>.
- CALDERONE, G.; FERRO, M. V.; CATANIA, P. A. systematic literature review on recent unmanned aerial spraying systems applications in orchards. **Smart Agricultural Technology**, v. 10, p. 00708, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100708>.
- CARVALHO, A. M. X.; MENDES, F. Q.; BORGES, P. H. C.; KRAMER, M. A brief review of the classic methods of experimental statistics. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 45, e56882, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56882>
- CARVALHO, F. K.; MOTA, A. A. B.; CHECHETTO, R. G.; ANTUNIASSI, U. R. **Entendendo a tecnologia de aplicação: turbopulverizadores**. Botucatu: FEPAF, 2023. 92 p.
- CERDA, R.; AVELINO, J.; GARY, C.; TIXIER, P.; LECHEVALLIER, E.; ALLINNE, C. Primary and secondary yield losses caused by pests and diseases: assessment and modeling in coffee. **Plos One**, v. 12, e0169133, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169133>.
- CHEN, P.; DOUZALS, J. P.; LAN, Y.; COTTEUX, E.; DELPUECH, X.; POUXVIEL, G.; ZHAN, Y. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1–16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.870956>.
- CHERAIET, A.; CODIS, S.; LIENARD, A.; VERGÈS, A.; CARRA, M.; BASTIDON, D.; BONICEL, J. F.; DELPUECH, X.; RIBEYROLLES, X.; DOUZALS, J. P.; LEBEAU, F.; TAYLOR, J. A.; NAUD, O. EvaSprayViti: A flexible test bench for comparative assessment of the 3D deposition efficiency of vineyard sprayers at multiple growth stages. **Biosystems Engineering**, v. 241, p. 1–14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.03.008>.

CRAUSE, D. H.; VITÓRIA, E. L.; RIBEIRO, L. F. O.; FERREIRA, F. A.; LAN, Y.; CHEN, P. Droplet deposition of leaf fertilizers applied by an unmanned aerial vehicle in *Coffea canephora* plants. **Agronomy**, v. 13, p. 1506, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061506>.

CUI, H.; WANG, C.; YU, S.; XIN, Z.; LIU, X.; YUAN, J. Two-stage CFD simulation of droplet deposition on deformed leaves of cotton canopy in air-assisted spraying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 224, p. 109228, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109228>.

DEVEAU, J.; LEDEBUHR, M.; MANKETELow, D. **Airblast 101**: your guide to effective and efficient spraying. 2. ed. Ontário: Canadá, 2021. 305 p.

GRELLA, M.; MARUCCO, P.; ZWERTVAEGHER, I.; GIOELLI, F.; BOZZER, C.; BIGLIA, A.; MANZONE, M.; CAFFINI, A.; FOUNTAS, S.; NUYTENS, D.; BALSARI, P. The effect of fan setting, air-conveyor orientation and nozzle configuration on airblast sprayer efficiency: Insights relevant to trellised vineyards. **Crop Protection**, v. 155, p. 1–18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.105921>.

GUO, C.; HU, Y.; QIN, J.; WU, D.; XU, L.; WANG, H. Comparison of crown volume increment in street trees among six cities in western countries and China. **Horticulturae**, v. 10, n. 3, p. 300, 2024 <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030300>

HERBEST, A.; BONDS, J.; WANG, Z.; ZENG, A.; HE, X.; GOFF, P. The influence of unmanned agricultural aircraft system design on spray drift. **Journal of Cultivated Plants/Journal für Kulturpflanzen**, v. 72, p. 1–11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5073/JfK.2020.01.01>.

HERKINS, M.; ZHAO, L.; ZHU, H.; JEON, H.; CASTILHO-THEODORO, J. Optimization and evaluation of electrostatic spraying systems and their effects on pesticide deposition and coverage inside dense canopy plants. **Agronomy**, v. 15, p. 1401, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15061401>.

IENO, E. N.; LUQUE, P. L.; PIERCE, G. J.; ZUUR, A. F.; SANTOS, M. B.; WALKER, N. J.; SAVELIEV, A. A.; SMITH, G. M. Three-way nested data for age determination techniques applied to cetaceans. In: ZUUR, A. F. *et al.* **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. New York: Springer, 2009. p. 459–468. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6_20.

İNAN, M.; KARCI, A. Effects of optimizing droplet distribution at particular heights and speeds using proportional-integral-derivative (PID) control algorithm in unmanned aerial vehicle (UAV) systems: a review. **Journal of Agricultural Sciences**, v. 31, p. 612–639, 2025. DOI: <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1611010>.

İRSEL, G. Design and implementation of low-cost field crop sprayer electronic flow control system. **Gazi University Journal of Science**, v. 34, p. 835–849, 2021. DOI: <https://doi.org/10.35378/gujs.773320>.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. ISO 22866. **Equipment for crop protection** – methods for field measurement of spray drift. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. ISO 5682-1. **Equipment for crop protection—spraying equipment—part 1: Test methods for sprayer nozzles**. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

JIANG, Y.; YANG, Z.; XU, X.; SHEN, D.; JIANG, T.; XIE, B.; DUAN, J. Wetting and deposition characteristics of air-assisted spray droplet on large broad-leaved crop canopy. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1079703>

KHOT, L. R. Air-assisted velocity profiles and perceptive canopy interactions of commercial airblast sprayers used in Pacific Northwest specialty crop production. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 24, p. 78–89, 2022. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7039>. Acesso em: 26 set. 2024.

KUMAR, M.; AJAYKUMARA, K. M. Importance of pesticide dose in pest management. **Indian Entomologist**, v. 3, p. 51–54, 2022. Disponível em: <https://www.indianentomologist.org/vol3issue1>. Acesso em: 26 set. 2024.

LENTH, R. V. **Emmeans**: Estimated Marginal Means, aka Least Squares Means. R package version 1.8.8, 2018. Disponível em: <http://cran.r-project.org/package=emmeans>. Acesso em: 26 set. 2024.

LI, S.; LI, J.; YU, S.; WANG, P.; LIU, H.; YANG, X. Anti-Drift Technology Progress of Plant Protection Applied to Orchards: A Review. **Agronomy**, v. 13, p. 2679, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13112679>

MAKHNENKO, I.; ALONZI, E. R.; FREDERICKS, S. A.; COLBY, C. M.; DUTCHER, C. S. A review of liquid sheet breakup: Perspectives from agricultural sprays. **Journal of Aerosol Science**, v. 157, p. 105805, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105805>

MILANOWSKI, M.; SUBR, A.; COMBRZYŃSKI, M.; RÓŻAŃSKA-BOCZULA, M.; PARAFINIUK, S. Effect of adjuvant, concentration and water type on the droplet size characteristics in agricultural nozzles. **Applied Sciences**, v. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12125821>.

NETO, G. J.; CUNHA, J. P. A. R. Spray deposition and chemical control of the coffee leaf-miner with different spray nozzles and auxiliary boom. **Engenharia Agrícola**, v. 36, p. 656–663, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n4p656-663/2016>.

OWEN-SMITH, P.; WISE, J.; GRIESHP, M.J. Season long pest management efficacy and spray characteristics of a solid set canopy delivery system in high density apples. **Insects**, v. 10, n. 7, p. 193, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects10070193>

PETRE, I. M.; POP, S.; BOȘCOIANU, M. Engineering and management of the precision treatments spraying system implementation on horticultural crops. **Rezultatele Cercetărilor**

Noastre Tehnice, v. 71, p. 249–255, 2023. DOI: <https://doi.org/10.31926/RECENT.2023.71.249>.

PLANAS, S.; ROMÁN, C.; SANZ, R.; ROSELL-POLO, J. R. Bases for pesticide dose expression and adjustment in 3D crops and comparison of decision support systems. **Science of The Total Environment**, v. 806, p. 150357, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150357>.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 26 set. 2024.

RATHNAYAKE, A. P.; CHANDEL, A. K.; SCHRADER, M. J.; HOHEISEL, G. A.; KHOT, L. R. Spray patterns and perceptive canopy interaction assessment of commercial airblast sprayers used in Pacific Northwest perennial specialty crop production. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 184, p. 106097, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106097>.

SALCEDO, R.; FONTE, A.; GRELLA, M.; GARCERÁ, C.; CHUECA, P. Blade pitch and air-outlet width effects on the airflow generated by an airblast sprayer with wireless remote-controlled axial fan. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 190, p. 106428, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106428>.

SANTINATO, F.; SILVA, C. D.; SILVA, R. P.; ORMOND, A. T. S.; GONÇALVES, V. A. R.; SANTINATO, R. Development and technical validation of spray kit for coffee harvester. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, p. 571–575, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13424>.

SILVA, J. E.; CUNHA, J. P.; NOMELINI, Q. S. Deposição de calda em folhas de cafeeiro e perdas para o solo com diferentes taxas de aplicação e pontas de pulverização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 1302-1306, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n12p1302-1306>

SUN, D.; HUANG, X.; HU, J.; JIANG, H.; SONG, S.; XUE, X. Multifactorial analysis and experiments affecting the effect of fog droplet penetration in fruit tree canopies. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1351525, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1351525>

VITÓRIA, E. L.; KROHLING, C. A.; BORGES, F. R. P.; RIBEIRO, L. F. O.; RIBEIRO, M. E. A.; CHEN, P.; LAN, Y.; WANG, S.; MORAES, H. M. F.; FURTADO JÚNIOR, M. R. Efficiency of fungicide application using an unmanned aerial vehicle and pneumatic sprayer for control of *Hemileia vastatrix* and *Cercospora coffeicola* in mountain coffee crops. **Agronomy**, v. 13, p. 340, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020340>.

VIGO-MORANCHO, A.; VIDEGAIN, M.; BONÉ, A.; VIDAL, M.; GARCÍA-RAMOS, F. J. Static and dynamic study of the airflow behavior generated by two air assisted sprayers commonly used in 3D crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 216, p. 108535, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108535>.

WANG, G.; LI, Z.; JIA, W.; OU, M.; DONG, X.; ZHANG, Z. A review on the evolution of air-assisted spraying in orchards and the associated leaf motion during spraying. **Agriculture**, v. 15, p. 964, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15090964>.

WANG, M.; DOU, H.; SUN, H.; ZHAI, C.; ZHANG, Y.; YUAN, F. Calculation method of canopy dynamic meshing division volumes for precision pesticide application in orchards based on LiDAR. **Agronomy**, v. 13, p. 1077, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13041077>.

WANG, S.; WANG, W.; LEI, X.; WANG, S.; LI, X.; NORTON, T. Canopy segmentation method for determining the spray deposition rate in orchards. **Agronomy**, v. 12, p. 1195, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12051195>.

WANG, S.; LI, X.; NUYTTENS, D.; ZHANG, L.; LIU, Y.; LI, X. Evaluation of compact air-induction flat fan nozzles for herbicide applications: Spray drift and biological efficacy. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 1018626, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1018626>.

WANG, Y.; ZHANG, Z.; SHI, R.; DAI, S.; JIA, W.; OU, M.; DONG, X.; YAN, M. A review of multiscale interaction mechanisms of wind–leaf–droplet systems in orchard spraying. **Sensors**, v. 25, p. 4729, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25154729>.

WOMAC, A. R.; OZKAN, E.; ZHU, H.; KOCHENDORFER, J.; JEON, H. Status of spray penetration and deposition in dense field crop canopies. **Journal of the ASABE**, v. 65, p. 1107–1117, 2022. DOI: <https://doi.org/10.13031/ja.15091>.

WU, X.; JIA, Y.; LUO, B.; CHEN, C.; WANG, Y.; KANG, F.; LI, J. Deposition law of flat fan nozzle for pesticide application in horticultural plants. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 15, p. 27–38, 2022. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221504.7502>

ZHANG, L.; LI, Z.; CHU, H.; CHEN, Q.; LI, Y.; LIU X. Design and Evaluation of a Novel Efficient Air-Assisted Hollow-Cônico Electrostatic Nozzle. **Agriculture**, v.15, n.12, p. 1293, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15121293>

ZHOU, Q.; XUE, X.; CHEN, C.; CAI, C.; JIAO, Y. Canopy deposition characteristics of different orchard pesticide dose models. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 16, n. 3, p. 1-6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231603.7665>

CAPÍTULO IV

Distribuição e eficiência da deposição no cafeeiro sob diferentes ângulos de jato de pulverização em lados de aplicação

Distribuição e eficiência da deposição no cafeeiro sob diferentes ângulos de jato de pulverização em lados de aplicação

RESUMO

O depósito adequado e uniforme depende da interação entre vários fatores e requer o ajuste criterioso dos parâmetros operacionais. No cafeeiro, a elevada densidade foliar exige o uso de pulverização assistida por ar, cuja eficiência está diretamente relacionada à correta configuração desses parâmetros. Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi quantificar o depósito de traçador em frações da área pulverizada no cafeeiro, especialmente em superfícies foliares, sob diferentes ângulos de jato de pulverização em lados de aplicação. O experimento foi realizado em esquema fatorial 3 x 2, com três configurações de ângulo de jato de pulverização (80°, 90° e uma combinação de 40°-90°-60°) nos dois lados de aplicação (esquerdo e direito da rua de aplicação). O depósito foi quantificado nas faces adaxial e abaxial das folhas em diferentes terços da planta. Os dados foram analisados por modelos lineares de efeitos mistos, considerando os fatores fixos, aleatórios e a estrutura hierárquica das medições, com comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O ângulo de pulverização influenciou significativamente a deposição de calda no dossel do cafeeiro. O ângulo de 90° proporcionou a maior deposição e uniformidade na fração referência e nas faces foliares, porém aumentou as perdas por transpasse, enquanto o ângulo de 80° reduziu o transpasse, mas comprometeu a uniformidade. A combinação de ângulos (40°-90°-60°) mostrou alternativa para aplicações verticalmente direcionadas. Observou-se maior deposição na face abaxial no terço superior e na face adaxial no terço inferior. Além disso, a deposição foi dependente da arquitetura da planta, com menor acúmulo em posições internas, evidenciando influências estruturais e assimetria do fluxo de ar. A dinâmica de deposição em dosséis densos resulta da interação entre parâmetros operacionais, fluxo de ar e arquitetura da planta. Nesse sentido, limitações inerentes ao equipamento, como a assimetria do fluxo de ar, podem comprometer a uniformidade espacial do depósito e a eficiência da aplicação fitossanitária.

Palavras-chave: abertura de leque; depósito de calda em superfície foliar; face abaxial; perdas de pulverização.

Distribution and Efficiency of Tracer Deposition on Coffee Plants Under Different Spray Angles on Application Sides

ABSTRACT

Adequate and uniform deposition depends on the interaction of multiple factors and requires careful adjustment of operational parameters. In coffee crops, the high leaf density demands the use of air-assisted spraying, whose efficiency is directly related to the proper configuration of these parameters. In this context, the objective of this study was to quantify tracer deposition across fractions of the sprayed area in coffee plants, with emphasis on leaf surfaces, under different spray jet angles on the application sides. The experiment was conducted in a 3×2 factorial design, with three spray jet angle configurations (80° , 90° , and a combination of 40° – 90° – 60°) on two application sides (left and right sides of the application row). The deposition was quantified on the adaxial and abaxial leaf surfaces at different canopy thirds. Data were analyzed using linear mixed-effects models, considering fixed and random factors and the hierarchical structure of the measurements, with mean comparisons performed using Tukey's test ($p < 0.05$). The spray angle significantly influenced spray deposition within the coffee canopy. The 90° angle provided the highest deposition and uniformity in the reference fraction and on leaf surfaces; however, it increased losses due to throughfall, whereas the 80° angle reduced throughfall but compromised uniformity. The combination of angles (40° – 90° – 60°) proved to be an alternative for vertically directed applications. Greater deposition was observed on the abaxial surface in the upper canopy and on the adaxial surface in the lower canopy. In addition, deposition was dependent on plant architecture, with lower accumulation in inner positions, highlighting structural influences and air flow asymmetry. The deposition dynamics in dense canopies result from the interaction between operational parameters, air flow, and plant architecture. In this sense, inherent equipment limitations, such as air flow asymmetry, may compromise the spatial uniformity of deposition and the efficiency of pesticide application.

Keywords: spray pattern; leaf surface deposition; abaxial surface; spray losses.

1 INTRODUÇÃO

O controle de pragas e doenças em pomares utiliza amplamente pulverizadores assistidos por ar. No entanto, a deposição na face inferior das folhas é frequentemente limitada (Xu *et al.*, 2023), especialmente em copas mais densas, onde a penetração do ar e das gotas é reduzida. O cafeeiro é uma cultura perene de elevada importância econômica que demanda aplicações fitossanitárias frequentes ao longo do ciclo. Nessa cultura, a deposição no interior do dossel e em face abaxial das folhas permanece um desafio crítico, especialmente quando o alvo de interesse se encontra protegido. A otimização da cobertura na face abaxial depende da interação de múltiplos fatores (Mello *et al.*, 2024), e dentre os parâmetros operacionais, o ângulo de jato de pulverização se destaca por influenciar diretamente a atomização, o tamanho e a trajetória das gotas (Chen *et al.*, 2022a).

A arquitetura complexa do dossel e a orientação foliar variável dificultam a penetração das gotas para as camadas internas da copa, resultando em cobertura desuniforme (Souza *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). Essa limitação é crítica no cafeeiro, onde a face abaxial das folhas, anatomicamente mais vulnerável devido à menor espessura da cutícula e maior densidade estomática (Alhudaib; Ismail, 2024; Avelino *et al.*, 2023; Batista *et al.*, 2010; Caixeta *et al.*, 2024; Cui *et al.*, 2020; Fernandes *et al.*, 2021; Grisi *et al.*, 2008; Osakabe, 2021; Owen-Smith; Wise; Grieshop, 2019) constitui o sítio preferencial para a colonização e infecção por pragas e patógenos de alto impacto econômico, como a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) e o ácaro vermelho (*Oligonychus ilicis*). A deposição insuficiente nessa região compromete diretamente a eficácia de produtos de contato e pode limitar o desempenho de produtos sistêmicos, reforçando a necessidade de estratégias de aplicação que assegurem cobertura efetiva da face abaxial (Godoy-Nieto *et al.*, 2022).

A literatura científica sobre tecnologia de aplicação em culturas perenes tem se concentrado na otimização do fluxo de ar gerado pelos pulverizadores (Yan *et al.*, 2024a; Wang *et al.*, 2023), uma vez que esse fluxo promove a movimentação e a oscilação das folhas, influenciando diretamente a interceptação e a deposição em superfícies foliares (Cui *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024). No entanto, a deposição não depende exclusivamente do fluxo de ar, resultando da interação de múltiplos fatores, dentre os quais o ângulo do jato de pulverização. Assim, a compreensão desse parâmetro torna-se fundamental para aprimorar a eficiência das aplicações e, conseqüentemente, o controle de pragas e doenças (Chen *et al.*, 2022a; Choudhary *et al.*, 2023).

Nesse contexto, diferentes configurações de pontas e ângulos de pulverização têm sido investigadas com o objetivo de maximizar a eficiência da aplicação (Negrisoli *et al.*, 2021). O ângulo de jato das pontas de pulverização configura-se, portanto, como um parâmetro operacional relevante para a otimização das aplicações fitossanitárias. Embora frequentemente negligenciado, os diferentes ângulos de jato, em interação com as condições operacionais, podem influenciar a uniformidade de deposição das gotas ao longo do dossel do cafeeiro, tanto nos estratos da planta quanto nas superfícies foliares. De modo geral, ângulos mais estreitos tendem a concentrar o jato e favorecer a penetração em posições mais distantes, enquanto ângulos amplos tendem a ampliar a área de cobertura (Salvador *et al.*, 2018). Portanto, a seleção adequada do ângulo do jato de pulverização apresenta potencial para melhorar o desempenho operacional, otimizar o uso de produtos fitossanitários e reduzir perdas.

Em culturas perenes, é comum o uso de pontas com ângulos de pulverização maiores, devido a sua capacidade de ampliar a área de cobertura. Contudo, ângulos maiores tendem a deslocar o espectro de gotas, gerando gotas mais finas e potencialmente mais suscetíveis à deriva. Dessa forma, a seleção do ângulo de jato deve considerar não apenas a cobertura do alvo, mas também a redução das perdas por deriva (Contiero; Biffe; Catapan, 2018; Mughai *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2017). Em dosséis densos, que dependem do fluxo de ar para promover a movimentação foliar, a elevada energia do ar pode favorecer a penetração excessiva das gotas, fazendo com que parte do volume aplicado atravessasse o dossel sem ser interceptada pelo alvo. Esse processo pode resultar em perdas de produto e em deposição em áreas não alvo, como fileiras adjacentes, caracterizando o transpasse da pulverização. Nesse sentido, a quantificação do depósito sob diferentes parâmetros operacionais em frações da área pulverizada, como a fração referência (área-alvo de aplicação) e a fração transpasse (volume que ultrapassa o dossel), permite uma avaliação mais abrangente da eficiência da aplicação.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi quantificar o depósito de traçador nas frações da área pulverizada, especialmente em superfícies foliares (adaxial e abaxial) do cafeeiro, sob diferentes ângulos de pulverização em lados da rua de aplicação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local experimental

O experimento de campo foi conduzido em outubro de 2023 na fazenda Jataí, no município de Monte Carmelo, MG (18°52'45.27" S, 47°20'48.62" O; 1020 m de altitude). A região possui clima do tipo Cwa (quente e úmido com inverno seco), conforme a classificação de Köppen-Geiger (Beck *et al.*, 2023). As análises laboratoriais foram realizadas no Centro de Excelência em Mecanização Agrícola (CEMA) e no Laboratório de Mecanização Agrícola (LAMEC), ambos vinculados ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) da Universidade Federal de Uberlândia.

2.2 Caracterização da lavoura

A lavoura cafeeira da área experimental foi composta pela cultivar Mundo Novo, com seis anos de implantação, conduzida no espaçamento de 3,8 x 0,60 m e sob sistema de irrigação por gotejo. Para caracterização estrutural do dossel, foram selecionadas aleatoriamente dez plantas, nas quais foram mensuradas a altura, a largura média da copa e o espaçamento entre linhas de cultivo, utilizando fita métrica. O volume de vegetação da cultura foi determinado conforme metodologia de Guo *et al.* (2024), sendo expresso em volume de vegetação por área. No momento do experimento, as plantas apresentavam altura média de 2,89 m e largura média da copa de 1,71 m, resultando em volume estimado de 12.700 m³ ha⁻¹.

2.3 Arranjo experimental

O experimento foi realizado em esquema fatorial 3 x 2. O primeiro fator correspondeu a três configurações de ângulo de jato de pulverização: 80° e 90° (ângulos fixos ao longo do ramal) e 40°-90°-60° (combinação de ângulos ao longo do ramal). O segundo fator consistiu em dois lados de aplicação (direito e esquerdo da rua de aplicação). As especificações das pontas utilizadas e suas configurações são apresentadas na Tabela 1, enquanto a disposição das pontas de pulverização com diferentes ângulos ao longo do ramal é ilustrada na Figura 1.

TABELA 1. Especificações das pontas usadas de acordo com fabricante, configurações e aplicação prática

Ângulo de jato	Ponta-Modelo	Filtro (mesh)	Classe	Pressão (kPa)	Distribuição no ramal	Aplicação prática
80°	MAG 1.5	80	Fina	621	24 pontas iguais	Amplamente usada na cafeicultura
90°	MGA 0.15	100	Fina	276	24 pontas iguais	Alternativa usada na cafeicultura
40°	MGA 0.15	100	Muito fina	276	8 superiores	Alcance para terço superior
90°	MGA 0.15	100	Fina	276	8 medianas	Cobertura para terço mediano
60°	MGA 0.15	100	Muito fina	276	8 inferiores	Penetração para terço inferior

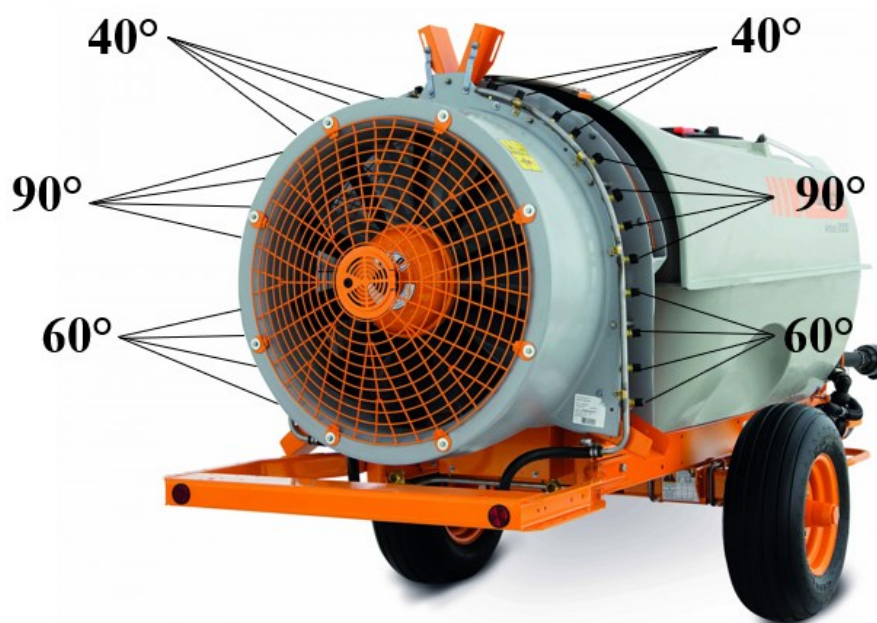


FIGURA 1. Representação esquemática do tratamento de ângulos combinados (40°-90°-60°), detalhando a disposição espacial das pontas de pulverização ao longo do ramal vertical do pulverizador

As parcelas experimentais consistiram em dez linhas de 40 m de comprimento. A área útil correspondeu aos 20 m centrais de duas linhas, com 10 m de bordadura em cada extremidade. Para evitar contaminação, as parcelas foram separadas por uma bordadura de oito linhas de café (Figura 2).

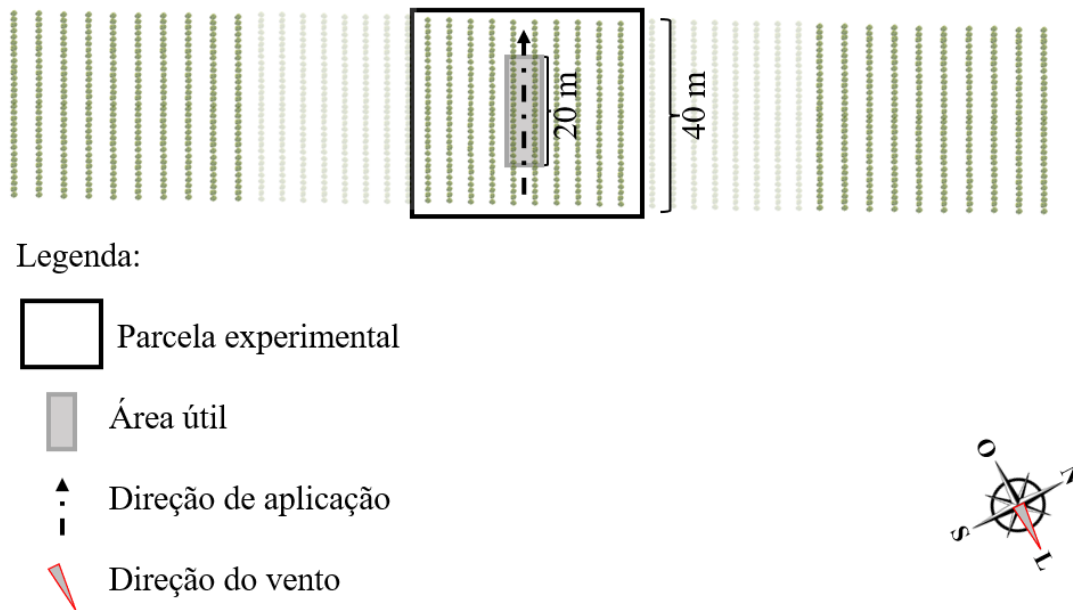


FIGURA 2. Esquema da parcela experimental, indicando a área útil de amostragem, as bordaduras utilizadas para o controle de contaminação entre tratamentos e direção de aplicação e do vento

2.4 Variáveis de estudo

As variáveis resposta foram o depósito total e o depósito por face foliar (adaxial e abaxial). Ambas foram quantificadas nas duas frações espaciais, adaptadas da norma ISO 22866 (2005):

- Depósito na fração referência: Coletado no lado da planta voltado para a rua de passagem do pulverizador.
- Depósito na fração transpasse: Coletado no lado oposto da planta. Esta terminologia foi adotada para diferenciar o depósito da área-alvo daquele resultante do deslocamento de calda através do dossel (Figura 3).

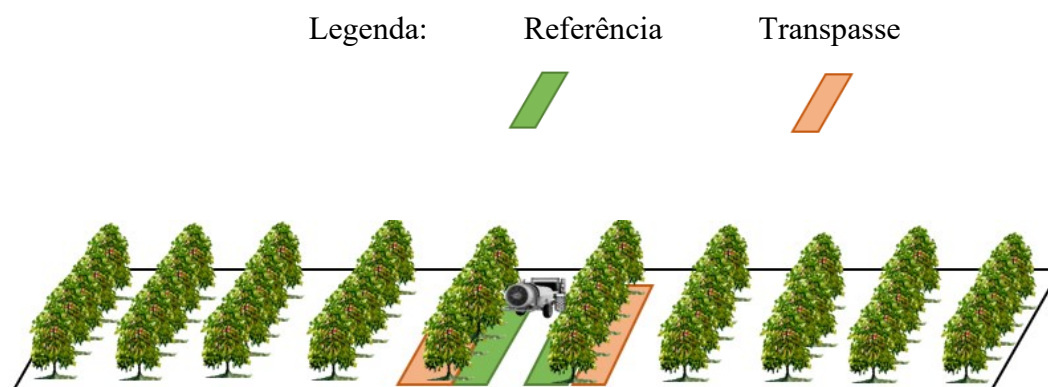


FIGURA 3. Representação esquemática, em uma vista de seção transversal da linha do cafeeiro, definindo as frações referência e transpasse

Para as diferentes variáveis de estudo, foram empregados diferentes números de repetições: a) depósito total ($n=4$): amostras coletadas para quantificar o depósito somado de ambas as faces foliares. b) depósito por face foliar ($n=5$): amostras coletadas para quantificar o depósito isolado nas faces adaxial e abaxial. O aumento do número de repetições (de 4 para 5) visou aumentar o poder estatístico para detectar diferenças mais sutis na deposição por face. Todas as medidas em lados de aplicação, terços da planta e posições do ramo foram aninhadas.

2.5 Composição da calda e condições de aplicação

O traçador utilizado para determinação do depósito por absorbância em espectrofotometria foi o corante alimentício Azul Brilhante (FD&C Blue n.º 1), na dose de 1 kg ha^{-1} . A concentração do traçador na calda foi ajustada de acordo com a taxa de aplicação de 400 L ha^{-1} , resultando em $2,5 \text{ g L}^{-1}$. Com auxílio de um balde graduado, foi preparado um volume de 400 L de calda para aplicação. As aplicações foram realizadas sob as seguintes condições meteorológicas médias, obtidas por meio de uma estação modelo Vantage Pro2 (Davis, Hayward, CA, USA): temperatura $27,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, umidade relativa do ar 60% e velocidade do vento $3,2 \text{ km h}^{-1}$, com direção predominante leste.

2.6 Maquinário utilizado, regulagem e calibração

Utilizou-se um pulverizador turbo de arrasto, modelo Arbus 2000 TF 2P (Jacto, Pompeia, São Paulo, Brasil), com capacidade para 2.000 litros, possuindo 12 porta bicos em cada lateral, ventilador de 850 mm de diâmetro, velocidade do ar de 95 km h^{-1} e volume do ar de

11,2 m³ s⁻¹. A regulagem das aletas do ventilador permaneceu no padrão usado pelos produtores, ajustadas na posição ‘A’, de maior volume de ar.

O pulverizador foi tracionado por um trator Massey Ferguson 4x2 TDA (Massey Ferguson, Canoas, Rio Grande do Sul, Brasil), modelo 4265 compacto, com potência de 65 cv (48 kW). O conjunto foi previamente descontaminado com produto Oxiclean (Oxiquímica Agrociência, Jaboticabal, São Paulo, Brasil), e logo seguiu-se com a regulagem determinando a rotação do motor do trator para obtenção de 540 rpm na tomada de potência, utilizando o tacômetro digital modelo MDT2238A (Minipa®, Santo Amaro, São Paulo, Brasil). O trator operou em rotação fixa de 1.980 rpm, em terceira marcha reduzida, entregando uma velocidade de 5,63 km h⁻¹ em todos os tratamentos.

A vazão por ponta foi determinada pela fórmula padrão de calibração, $q = Q \cdot V \cdot f / 600$, onde q é a vazão (L min⁻¹), Q a taxa de aplicação (L ha⁻¹), V a velocidade de deslocamento (5,63 km h⁻¹) e f a faixa de aplicação teórica (3,8 m), resultando em 0,59 L min⁻¹ por ponta. A calibração foi realizada utilizando um kit de manômetro (M615, Magnojet, Ibaiti, Paraná, Brasil) e uma proveta graduada de 1 L. Após a coleta do volume individual das 24 pontas durante um minuto, calculou-se o coeficiente de variação (CV%) para avaliação da uniformidade de vazão. Os valores de CV% obtidos foram 2,7%, 4,35 e 3,92 % para pontas com ângulo de jato de 90°, 80° e ângulos combinados (40°-90°-60°), respectivamente, todos inferiores ao limite aceitável de 10% (Baio *et al.*, 2024). O alinhamento dos bicos em relação à planta seguiu a metodologia descrita no Capítulo III.

2.7 Esquema de aplicação e coleta das amostras

A aplicação foi realizada com uma única passada do pulverizador na rua de aplicação (Figura 4). Assim foi possível a avaliação do depósito nas duas frações da área pulverizada.



FIGURA 4. Ilustração da área de aplicação para avaliação do depósito nas frações da área pulverizada no cafeeiro

Após a pulverização, foi aguardado o tempo necessário para a fixação do traçador nas folhas, procedendo-se, em seguida, à coleta das amostras. Para a avaliação das variáveis relacionadas à deposição total, em fração referência e transpasse, foram coletadas duas folhas do ramo plagiotrópico em posição externa (3º ou 4º par de folha a partir da extremidade) e interna (2º ou 3º par de folha a partir do ramo ortotrópico), em cada um dos três terços do dossel, considerando os dois lados de aplicação (esquerdo e direito da rua de aplicação) (Figura 5).

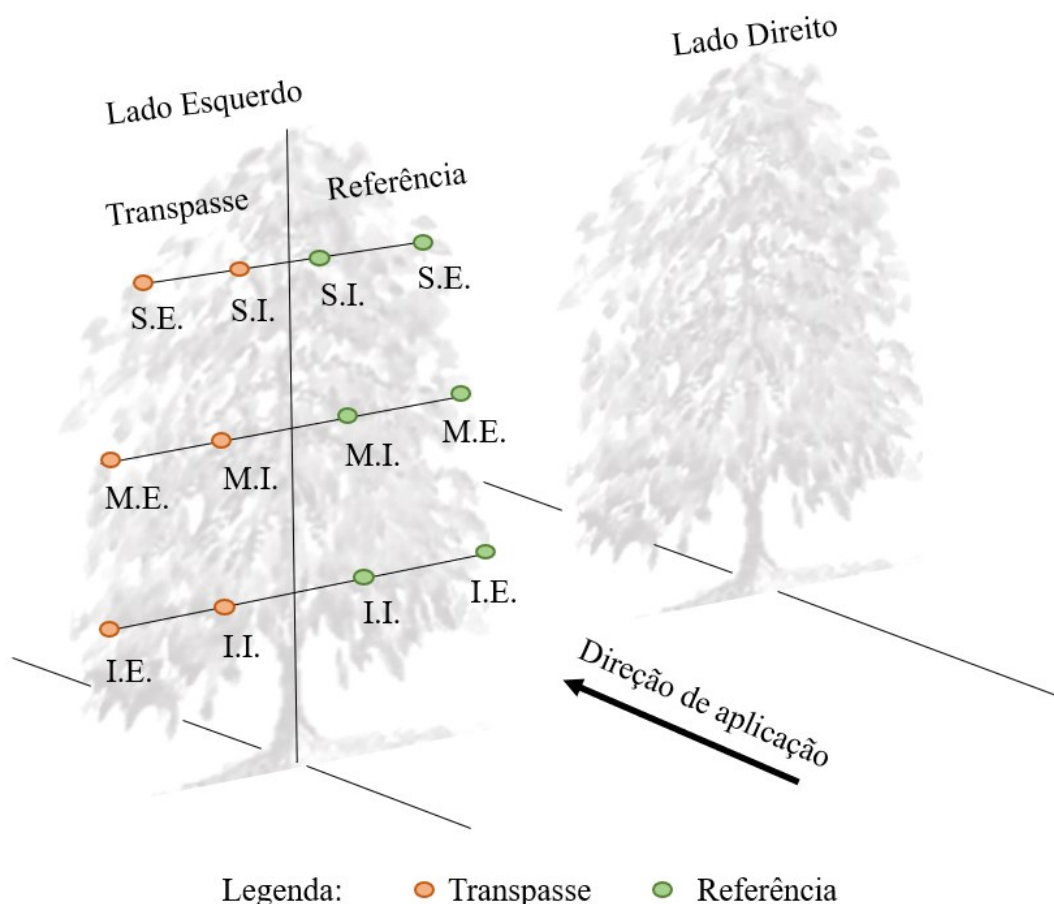


FIGURA 5. Representação esquemática da estratificação espacial da amostragem foliar, indicando os pontos de amostragem: terços do dossel (superior, médio, inferior), posições no ramo plagiotrópico (externa e interna) e frações de deposição (referência e transpasse)

Para isolar o depósito em cada face foliar, antes da pulverização adotou-se um procedimento de mascaramento. Uma das superfícies da folha foi protegida com fita adesiva transparente (70 mm), evitando a interceptação das gotas e permitindo a quantificação isolada do depósito na face oposta. A fita foi escolhida em testes preliminares por sua flexibilidade e boa aderência inicial. Contudo, observou-se que a transpiração foliar pode reduzir sua aderência ao longo do tempo, sendo crucial que a aplicação da fita e a pulverização ocorram no mesmo

dia. O procedimento foi realizado em folhas distintas para cada face foliar. Para quantificar o depósito adaxial, a face abaxial de uma folha foi coberta; e para quantificar o depósito abaxial, a face adaxial de outra folha foi protegida. Após a aplicação e fixação do traçador, as folhas foram destacadas, as fitas removidas e, em seguida, as folhas foram armazenadas em sacos plásticos identificados. Devido à dificuldade de acesso ao interior do dossel, este procedimento foi realizado apenas nas folhas posicionadas em região externa dos ramos (Foto 1).

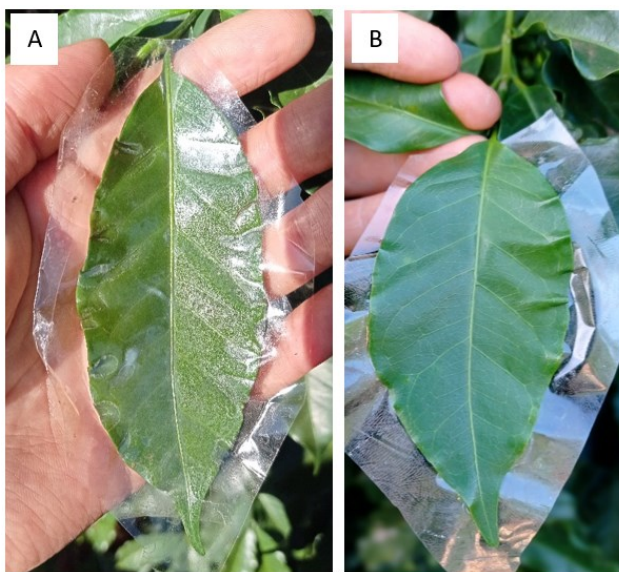


FOTO 1. Imagem da fita aderida em faces foliares do cafeeiro. (A) aderida à face adaxial e (B) aderida à face abaxial

Todas as amostras foram manuseadas cuidadosamente, evitando contato com a superfície de avaliação. Em seguida, foram acondicionadas em sacos plásticos previamente identificados e armazenadas em caixas de isopor, garantindo isolamento térmico e luminoso até a chegada ao laboratório, onde o depósito do traçador foi determinado por espectrofotometria.

2.8 Determinação do depósito do traçador

No laboratório, foram adicionados 20 mL de água destilada aos sacos plásticos contendo as folhas coletadas, procedendo-se a lavagem para remoção do traçador, com agitação manual das amostras por 30 segundos. Em seguida, o líquido resultante da lavagem foi transferido para copos descartáveis de 50 mL, previamente identificados. Estes foram acondicionados em local isolado de luminosidade por 24 h, para sedimentação de impurezas e posterior leitura de absorbância. A absorbância do marcador em cada amostra foi determinada utilizando um

espectrofotômetro, marca Metash®, modelo V-5000 (Metash®, Songjiang District, Xangai, China), com comprimento de onda de 630 nm.

As folhas lavadas foram encaminhadas ao laboratório de Mecanização Agrícola da Universidade Federal de Uberlândia, campus Uberlândia, para determinação da área foliar, utilizando o medidor de área modelo LI 3100C, da marca Licor® (Lincoln, EUA). Como o equipamento fornece a área total das folhas (soma das faces adaxial e abaxial), o valor obtido foi dividido por dois para possibilitar o cálculo do depósito específico por face foliar.

As leituras de absorbância foram transformadas em concentração e ajustadas por meio de uma calibração espectrofotométrica construída em função do traçador (Gráfico 1, Capítulo III). A partir da concentração da calda aplicada e do volume de diluição das amostras, determinou-se a massa de traçador retida nas folhas (Equação 1). Por fim, a massa do marcador foi dividida pela área foliar de cada amostra, obtendo-se o depósito foliar.

$C_i \cdot V_i = C_f \cdot V_f$	(1)
---------------------------------	-----

Onde:

C_i = concentração do traçador na calda aplicada (g L^{-1});

V_i = volume capturado pelo alvo (mL);

C_f = concentração do traçador na amostra (g L^{-1});

V_f = volume de diluição da amostra (mL).

2.9 Análises estatísticas

A análise dos dados foi realizada por meio de modelos lineares mistos (LMM), considerando efeitos fixos e aleatórios, apropriados para a estrutura hierárquica do experimento. Em experimentos complexos, especialmente quando há ausência de independência entre observações, o uso de modelos mistos aumenta a acurácia das predições na presença de variáveis de influência (Carvalho *et al.*, 2023).

Os dados foram inicialmente verificados quanto à presença de *outliers* por meio de *boxplots*. Os pressupostos de homoscedasticidade e normalidade foram avaliados por meio de gráficos QQ-plots (Ieno *et al.*, 2009). Todas as variáveis atenderam aos pressupostos para a geração dos modelos, os quais foram estimados utilizando o pacote lme4 (Bates *et al.*, 2015), com parâmetros estimados pelo método da máxima verossimilhança restrita (REML).

Para o modelo referente às variáveis de deposição total, foram considerados como efeitos fixos o ângulo de jato, o lado de aplicação, o terço da planta e a posição do ramo, incluindo suas interações. Como efeitos aleatórios, foram incluídos a área de aplicação (bloco experimental) e o terço dentro de cada lado de aplicação.

Para variáveis de depósito em faces foliares, os efeitos fixos considerados foram o ângulo de jato, o lado de aplicação e o terço da planta, incluindo suas interações. Como efeitos aleatórios, foram considerados a área de aplicação (bloco experimental) e o efeito de terços dentro de cada lado de aplicação.

As médias estimadas foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, utilizando o pacote emmeans (Lenth, 2018), quando detectadas diferenças significativas. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no ambiente R, através do software RStudio, versão 4.3.1 (R Core Team, 2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Depósito total de fração referência

A configuração de ângulos combinados (40°-90°-60°) resultou em maior depósito no terço superior do lado esquerdo e terço mediano do lado direito de aplicação. O ângulo de jato de 80° apresentou maior depósito no terço mediano do lado esquerdo e no terço inferior do lado direito. De modo geral, tanto os ângulos combinados (40°-90°-60°) quanto o de 80° demonstraram menor uniformidade de deposição entre as posições da planta. Em contraste, o ângulo de 90° promoveu maior deposição nos terços superior e mediano no lado direito da aplicação e apresentou distribuição mais homogênea ao longo do dossel (Figura 6).

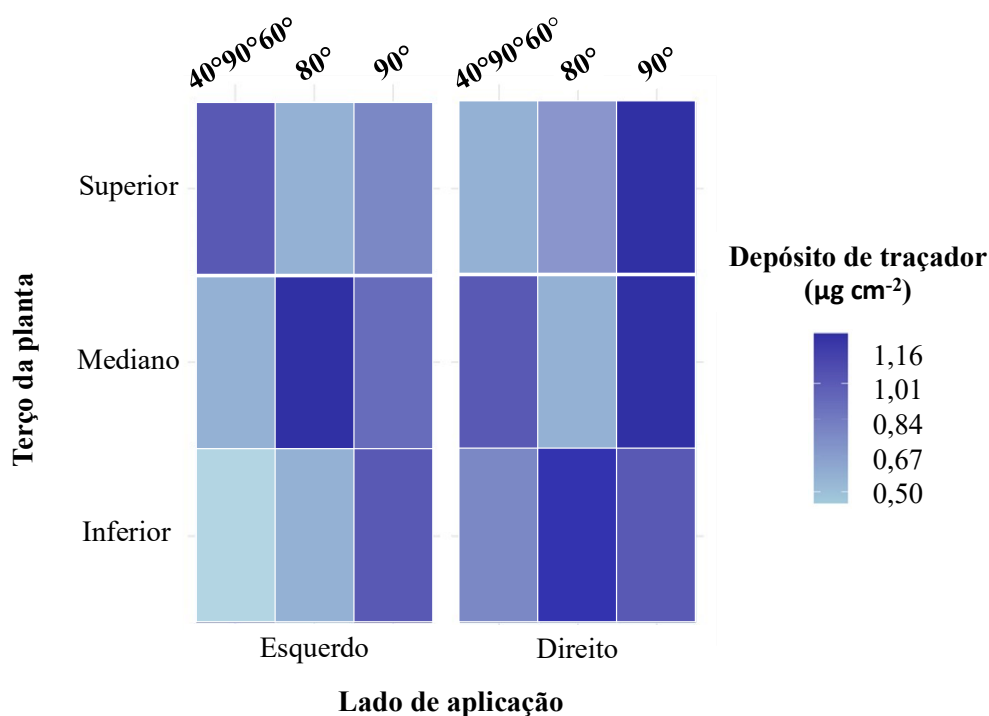


FIGURA 6. Variação do depósito de traçador na fração referência em função dos diferentes ângulos de pulverização nos lados de aplicação, em diferentes terços do cafeeiro

Os resultados podem ser explicados pela física da atomização. Ângulos de pulverização maiores, como o de 90°, ampliam a abertura do leque e favorecem uma distribuição mais homogênea das gotas, conforme relatado por Li *et al.* (2021). Por outro lado, ângulos menores tendem a concentrar o jato, aumentando a sobreposição de gotas e a variabilidade do espectro

(Makhnenko *et al.*, 2021). Assim, os achados confirmam que o ângulo de jato exerce influência direta sobre a distribuição de calda no dossel do cafeeiro. Destaca-se que, embora a variação de ângulos ao longo do ramal reduza a uniformidade geral do depósito, ela favoreceu o direcionamento da calda para o terço superior da planta, validando a estratégia do posicionamento das pontas e sugerindo que diferentes ângulos podem constituir uma estratégia de aplicação verticalmente direcionada.

Considerando as condições meteorológicas adequadas durante o experimento, o ajuste das aletas direcionadoras e das pontas de pulverização à arquitetura da cultura, a assimetria observada entre os lados de aplicação, pode ser atribuída à dinâmica de rotação do ventilador do turbo atomizador sobre a distribuição do fluxo de ar. Tal constatação reforça a necessidade de ajustes operacionais voltados à mitigação dessas limitações. No entanto, a distribuição assimétrica do fluxo de ar em pulverizadores assistidos por ventiladores axiais constitui uma limitação inerente a esse tipo de tecnologia de aplicação. Nesse contexto, avanços tecnológicos, como sistemas de pulverização mais direcionados, têm sido apontados como alternativas promissoras para melhorar a uniformidade de deposição (Feng *et al.*, 2026; Qiao *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2025). A desuniformidade entre os lados de aplicação pode resultar em zonas de subdosagem, comprometendo o controle fitossanitário e favorecendo a resistência de pragas (Margus *et al.*, 2024; Qiu *et al.*, 2021) bem como áreas de superdosagem, associadas ao desperdício de produto e ao aumento do risco de fitotoxicidade (Salyani, 2025).

Independentemente dos ângulos de pulverização, a deposição foi predominantemente maior na posição externa do ramo. No lado direito, os maiores depósitos ocorreram nos terços mediano e inferior do dossel, enquanto no lado esquerdo apresentou menores valores e menor uniformidade. Em posição interna, a deposição foi semelhante entre os lados (Figura 7).

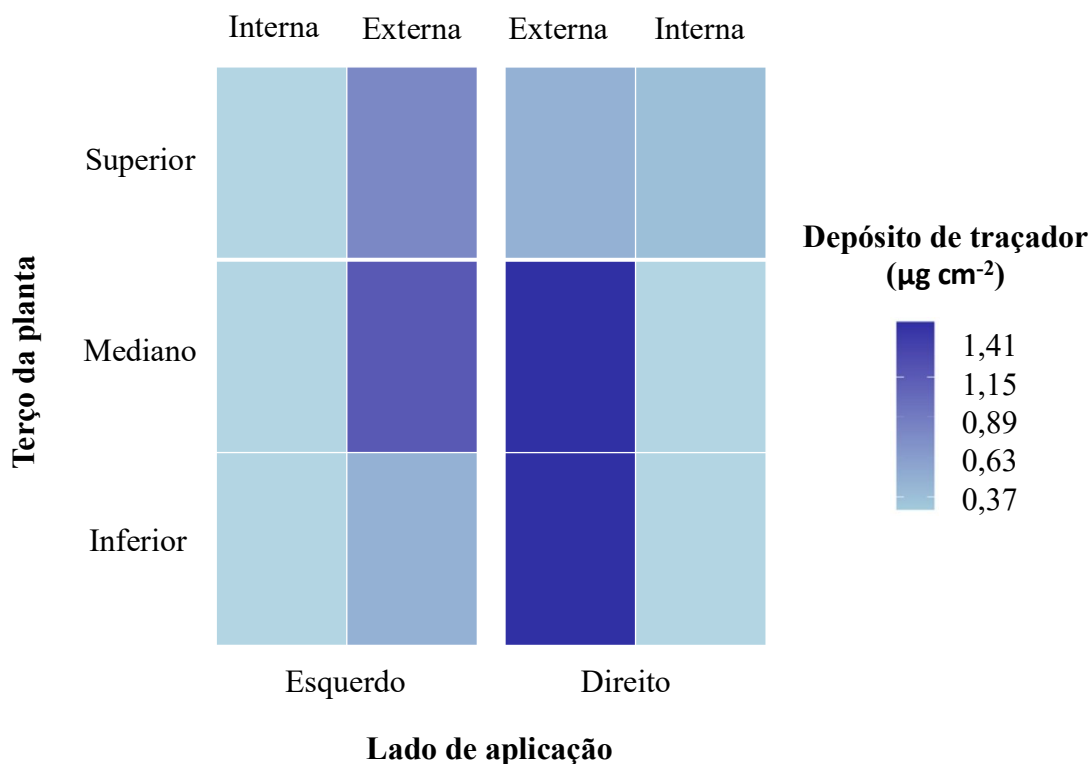


FIGURA 7. Distribuição do depósito de traçador na fração referência em função dos diferentes ângulos de pulverização, nos diferentes terços do cafeeiro e em posições do ramo plagiotrópico do cafeeiro

Na fração referência, folhas em posição externa interceptam a maior parte das gotas pulverizadas, formando uma barreira física que limita a penetração nas regiões internas. Resultados semelhantes foram relatados por Calderone; Ferro; Catania, (2025), que observaram maior deposição nas regiões externas da copa e no terço inferior, enquanto menores depósitos são observados no centro do dossel e no terço superior. De acordo com Ru *et al.* (2023), à medida que o fluxo de ar atravessa o dossel, ocorre dissipação progressiva da energia, reduzindo o transporte para as regiões internas da copa. Esse efeito é intensificado pela arquitetura foliar, na qual as folhas externas apresentam maior mobilidade e frequentemente se sobrepõem, formando uma barreira física à penetração da pulverização. Adicionalmente, Fu *et al.* (2025) destacam que a complexidade estrutural da planta interfere na penetração e na trajetória do fluxo de ar, dificultando a distribuição homogênea das gotas, maior suscetibilidade à deriva e potencial comprometimento da eficiência da aplicação.

Alves *et al.* (2020) demonstraram que a densidade e o volume foliar interferem diretamente na deposição de gotas em diferentes posições do ramo. De forma complementar, Dario *et al.* (2020) ressaltam que a baixa uniformidade de deposição entre regiões interna e

externa da planta torna-se particularmente relevante em aplicações de produtos de contato, que exigem maior cobertura e distribuição homogênea das gotas para eficácia biológica. Além disso, a menor deposição nas regiões superiores do dossel, como observado neste estudo, é um comportamento frequentemente relatado em pulverizações assistidas por ar, indicando limitações no transporte da nuvem de gotas para essas posições (Godoy-Nieto *et al.*, 2022). Nesse contexto, estratégias tecnológicas que favoreçam a penetração da nuvem de gotas no interior do dossel tornam-se fundamentais para melhorar a uniformidade de deposição (Wu *et al.*, 2022).

3.2 Depósito total de fração transpasse

A deposição em fração transpasse foi maior sob o ângulo de jato de 90°, o qual apresentou diferença entre os lados de aplicação, com menor depósito observado no lado direito apenas na posição externa do ramo. O ângulo de 80° seguiu comportamento semelhante, porém com valores inferiores de deposição. Já o ajuste de ângulos combinados (40°-90°-60°) resultou em menor deposição e maior uniformidade entre os lados e as posições do ramo (Figura 8A). O mesmo padrão foi observado entre os terços da planta (Figura 8B), com o ângulo de 90° apresentando os maiores valores de depósito em ambos os lados de aplicação, sendo mais expressivo no terço inferior do lado esquerdo. O ajuste de ângulos combinados (40°-90°-60°) manteve essa distribuição, porém apresentou os menores depósitos de traçador. O ângulo de 80° exibiu valores intermediários de depósito em fração transpasse, com distribuição mais uniforme entre terços e lados de aplicação.

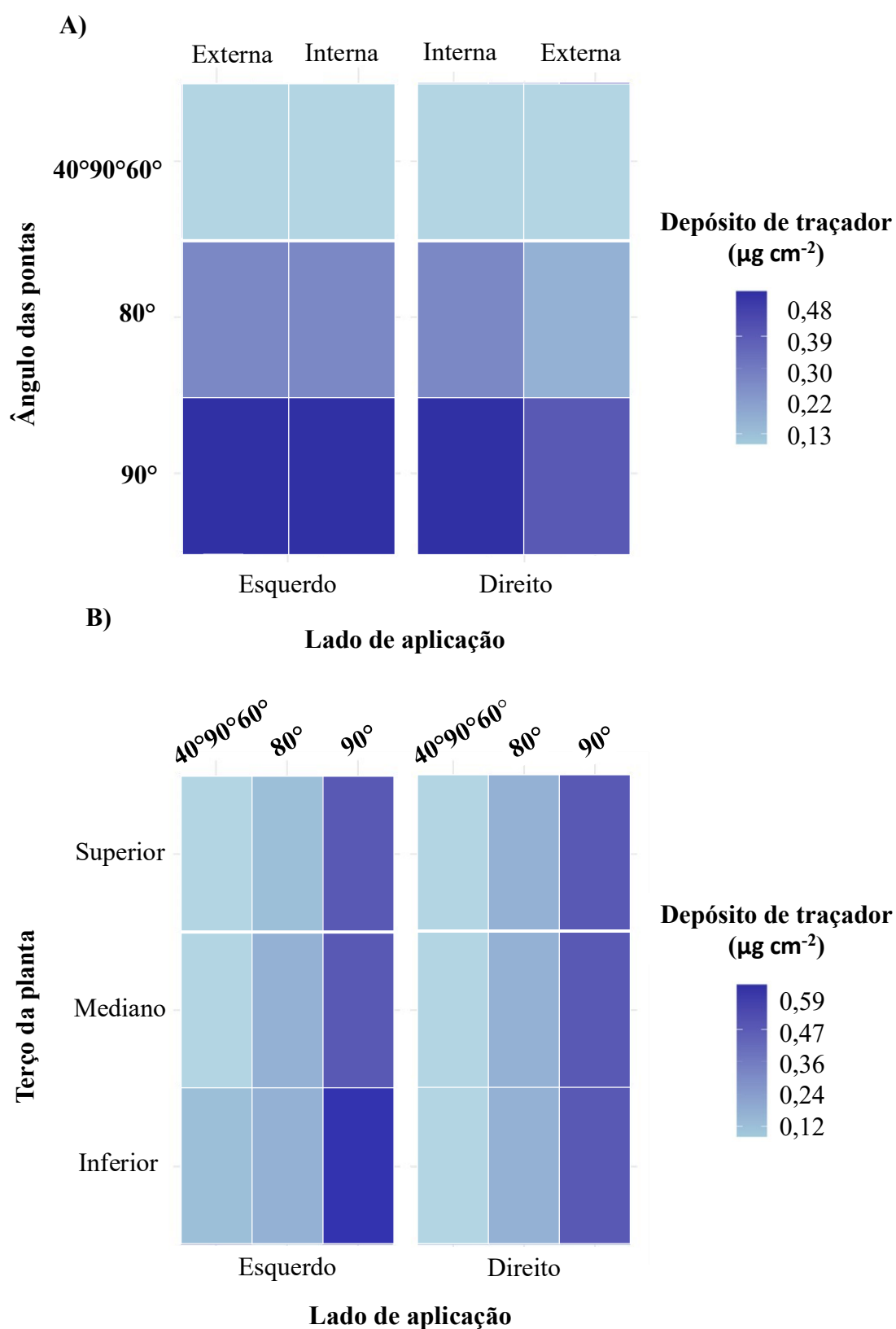


FIGURA 8. Depósito na fração transpasse em função dos diferentes ângulos de pulverização em lados de aplicação. **A)** Depósito nas posições interna e externa do ramo plagiotrópico do cafeeiro. **B)** Depósito nos diferentes terços do cafeeiro

Para a fração transpasse, os resultados obtidos evidenciam limitações do processo de aplicação. Embora o ângulo de jato de 90° tenha promovido maior uniformidade na fração referência, também resultou nos maiores depósitos em fração transpasse, indicando menor eficiência de retenção de calda no alvo. Em contraste, os ângulos combinados reduziram o transpasse. Esse comportamento pode estar associado à formação de gotas de maior diâmetro e maior energia cinética (devido aos ângulos mais estreitos), que são menos suscetíveis ao transporte pelo fluxo de ar secundário no interior da copa, limitando a formação de uma nuvem interna de deriva.

O padrão de distribuição na fração transpasse diferiu daquele observado na fração referência, apresentando maior uniformidade entre as posições do ramo, terços do dossel e lados de aplicação. Esse achado reforça o entendimento de que as gotas que transpassam a copa sofrem perda de energia, resultando em uma redução progressiva do volume retido e, consequentemente, em menor variabilidade nessa fração, conforme discutido no capítulo III. Observou-se ainda maior acúmulo em terço inferior, possivelmente em função da maior flexibilidade dos ramos plagiotrópicos nessa região, o que favorece a abertura temporária do dossel e a penetração da nuvem de gotas. Esse efeito pode ser intensificado em condições que promovem a formação de uma nuvem de gotas mais finas e dispersas, como observado em jatos com maior ângulo de pulverização.

Shi *et al.* (2022) demonstram que a atenuação do fluxo de ar no interior do dossel altera significativamente a distribuição das gotas, enquanto Ru *et al.* (2023) verificaram que a penetração é favorecida à medida que a velocidade do fluxo de ar aumenta. Assim, a redução do fluxo de ar gerado pela turbina, por meio do ajuste das pás, pode constituir uma estratégia prática para minimizar o depósito da fração transpasse. Adicionalmente, Dai *et al.* (2023) observaram que maiores velocidades de deslocamento reduzem o volume de ar por unidade de área do dossel, diminuindo a movimentação foliar e, consequentemente, a penetração da calda. Assim, a velocidade de trabalho também se configura como um importante parâmetro operacional de ajuste, devendo ser otimizada de modo a reduzir perdas por transpasse sem comprometer a deposição em fração referência.

3.3 Depósito de fração referência em faces foliares

O depósito em face adaxial obtido com os ângulos combinados (40°-90°-60°) apresentou menores valores, porém maior uniformidade espacial entre os terços do dossel e entre os lados

de aplicação, indicando distribuição mais equilibrada de calda ao longo da copa nessa face foliar. Por outro lado, o ângulo de jato de 80° resultou em maior variabilidade de deposição entre as posições, com incremento no terço mediano ao lado direito. No geral, o ângulo de 90° proporcionou os maiores valores de depósito na face adaxial, com distribuição relativamente uniforme entre os lados de aplicação, porém com variação vertical, caracterizada por menores valores em terço superior (Figura 9).

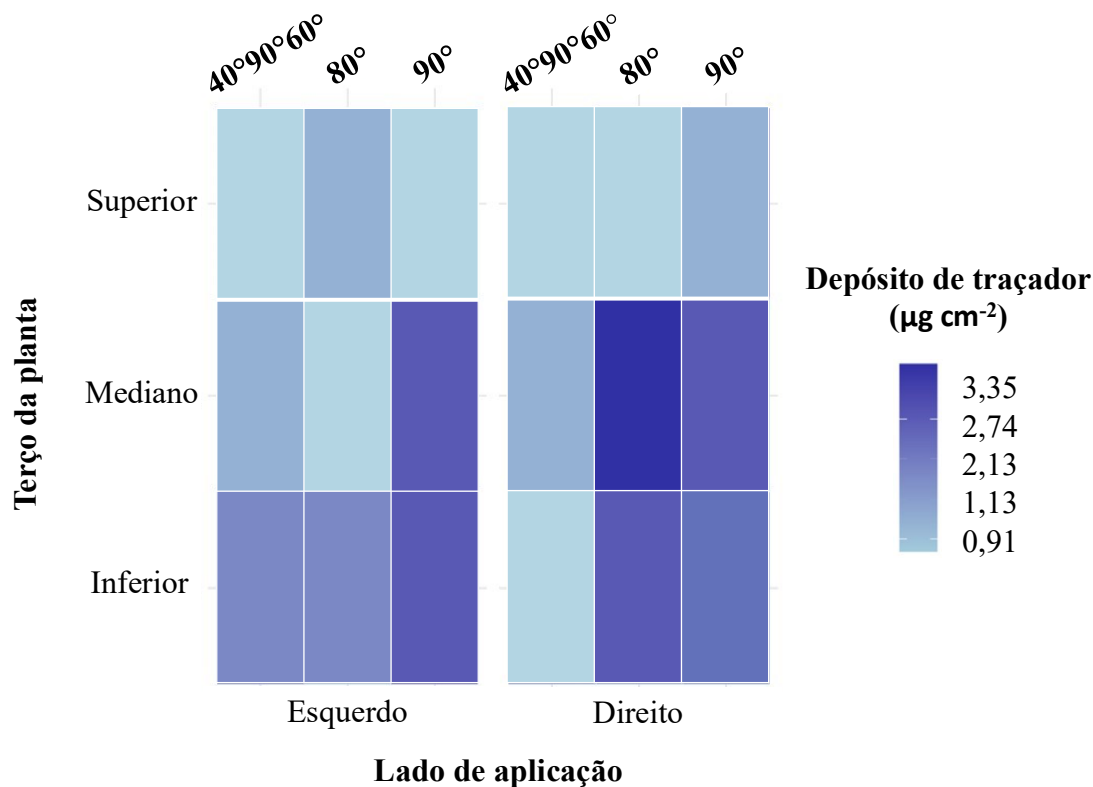


FIGURA 9. Variação do depósito em superfície adaxial da folha, na fração referência, sob diferentes ângulos de pulverização e lados de aplicação, nos diferentes terços do cafeeiro

A deposição quantificada na face adaxial das folhas, na fração referência, revelou maior acúmulo de traçador no terço inferior, com redução progressiva nos terços superiores. Esse efeito pode ser atribuído à arquitetura do cafeeiro, cujos ramos plagiotrópicos apresentam rigidez variável e diferentes inclinações foliares ao longo da planta. Ajustes operacionais estratégicos podem mitigar essa limitação, como a otimização da velocidade do ar, do ângulo de incidência e a adoção de pulverização eletrostática, favorecendo a penetração das gotas e contribuindo para uma distribuição mais uniforme do depósito em todo o dossel da cultura, inclusive na superfície abaxial das folhas, de difícil acesso, onde a pulverização convencional

tende a ser menos eficaz (Qiu *et al.*, 2021; Xue *et al.*, 2023; Yan *et al.*, 2024b; Zhang *et al.*, 2025).

Na face abaxial das folhas, a configuração de ângulos combinados (40°-90°-60°) resultou em maior deposição no terço superior do lado esquerdo da aplicação, enquanto no lado direito, o menor valor concentrou-se no terço mediano. O ângulo de jato de 80° apresentou distribuição mais homogênea, com a menor variabilidade entre terços e lados de aplicação. Em contraste, o ângulo de 90° acentuou a assimetria de deposição entre lados e terços, com maiores valores no terço inferior esquerdo e no terço mediano direito (Figura 10).

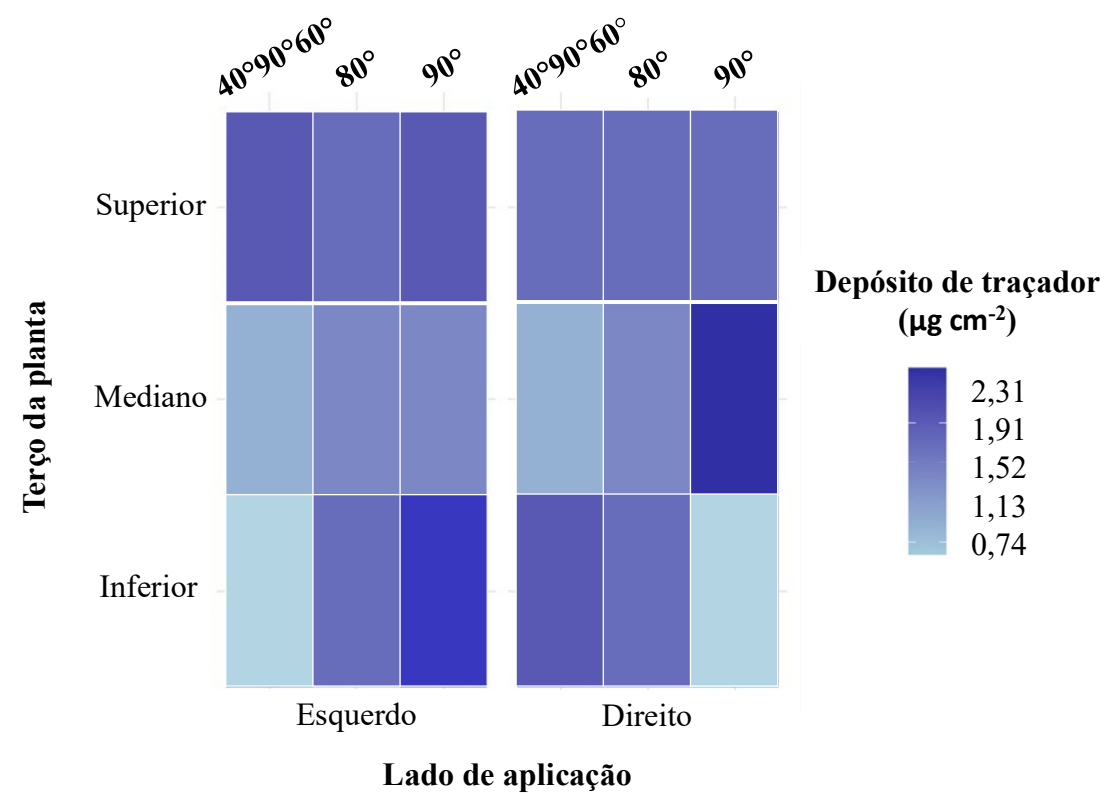


FIGURA 10. Depósito em superfície abaxial da folha, na fração referência, sob diferentes ângulos de pulverização e lados de aplicação, nos diferentes terços do cafeeiro

Diferentemente do observado em face adaxial, a face abaxial apresentou maior deposição no terço superior, com tendência decrescente em terços subsequentes. Este padrão pode ser explicado pelas propriedades físicas e mecânicas dos ramos do café que variam ao longo da copa (Melo Junior *et al.*, 2022). No terço superior, região menos densa e mais distante das pontas de pulverização, os ramos são tipicamente mais curtos e verticais, o que favorece o posicionamento da face abaxial a barlavento, aumentando a interceptação direta. Esse achado é corroborado por Xu *et al.* (2023), que, ao avaliarem o efeito do ângulo do fluxo de ar,

descobriram que o ângulo da folha é o fator de maior impacto na cobertura e deposição da superfície abaxial.

Por outro lado, no terço inferior do dossel, a maior densidade foliar e a inclinação dos ramos favorecem o posicionamento dominante da superfície abaxial da folha a sotavento, reduzindo sua exposição direta à nuvem de gotas. Somado a esse efeito, o fluxo de ar pode curvar as folhas para baixo, reduzindo ainda mais o depósito nessa face, conforme relatado por Yan *et al.* (2022). Esse padrão está de acordo com as observações de Owen-Smith; Wise; Grieshop (2019), que destacam que superfícies expostas ao fluxo de ar recebem diretamente a nuvem de pulverização, enquanto as superfícies protegidas dependem da penetração de gotas mais finas no interior da copa. Em contraste, os ramos plagiotrópicos do terço mediano estão mais alinhados e próximos ao fluxo de ar, favorecendo maior mobilidade das folhas, interceptação das gotas e, conseqüentemente, deposição mais uniforme em ambas as faces foliares.

Os resultados demonstram que, apesar da influência dos ângulos de jato, a arquitetura da planta influencia o padrão de deposição nas superfícies foliares. O depósito é majoritariamente abaxial no terço superior, equilibrado entre superfícies em terço mediano e predominante na superfície adaxial em terço inferior. De acordo com Li *et al.* (2021), a estabilidade foliar, decorrente de uma baixa resposta aerodinâmica, é determinante para a retenção de gotas. Tal dinâmica justifica a maior deposição observada na face foliar mais exposta ao fluxo de ar em regiões do dossel com ramos mais rígidos.

3.4 Depósito de fração transpasse em faces foliares

Na fração transpasse, a deposição em ambas as superfícies foliares foi influenciada pela interação entre o ângulo de jato e o lado de aplicação. Em face adaxial (Figura 11A), a configuração de ângulos combinados (40°-90°-60°) e o ângulo de 80° resultaram em menores depósitos de transpasse em lado esquerdo, apresentando na combinação de ângulos uma distribuição mais homogênea entre os lados da aplicação e o ângulo de 80° um acréscimo de deposição em lado direito. Em superfície abaxial (Figura 11B), foram observados, sob o jato de 90°, picos de depósito nos terços superior e inferior do dossel. Considerando o conjunto dos resultados, o padrão de distribuição do depósito foi semelhante para ambas as superfícies foliares e o ângulo de 90° promoveu maior retenção de traçador, com efeito expressivo no lado esquerdo.

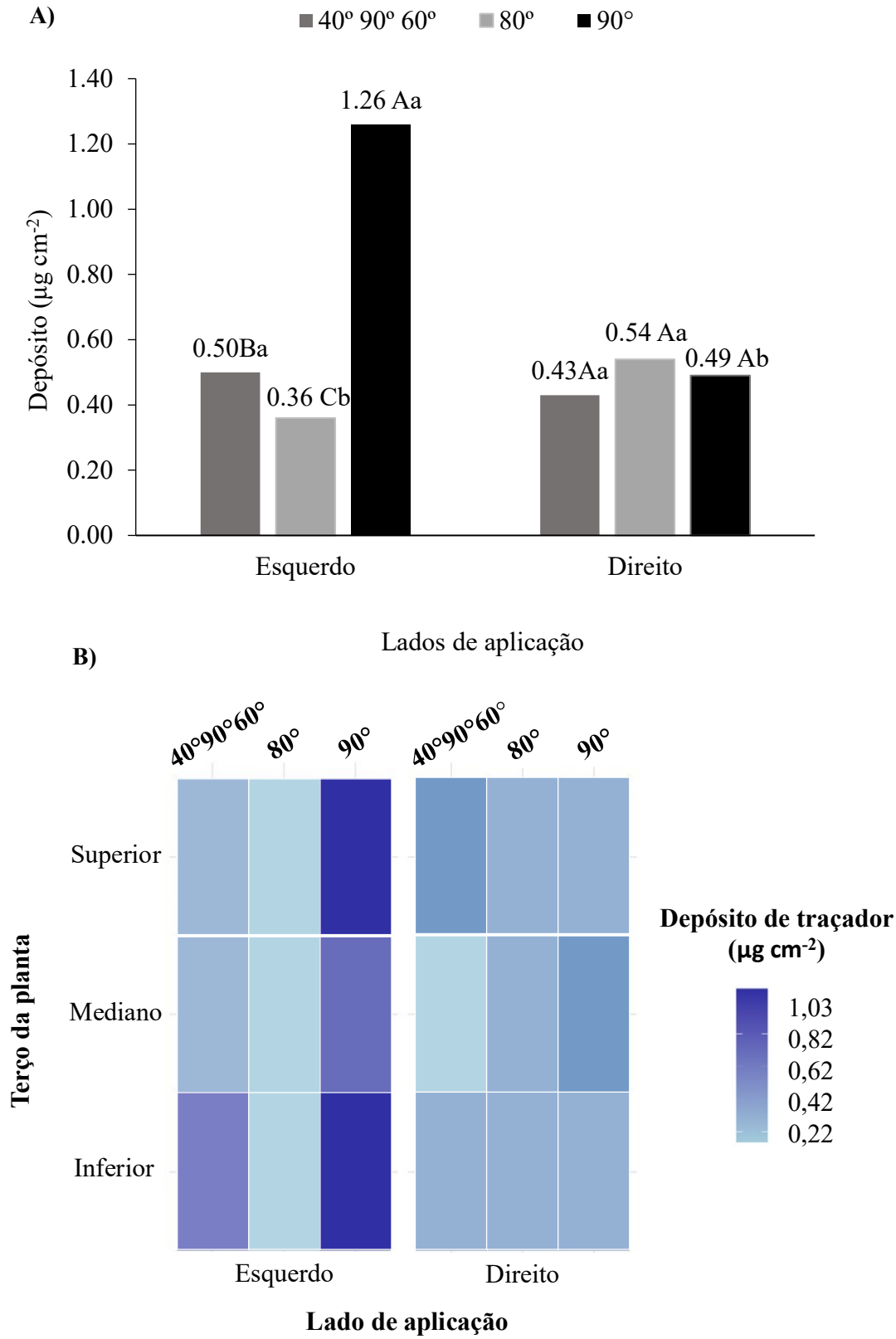


FIGURA 11. Distribuição do depósito nas superfícies foliares em fração transpasse, sob diferentes ângulos de pulverização e em lados de aplicação. (A) Padrão de deposição na superfície adaxial, em lados de aplicação. Médias seguidas por letras iguais não se diferem pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Letras maiúsculas comparam ângulos dentro de lado de aplicação e letras minúsculas comparam lados de aplicação dentro de fator ângulo. (B) Padrão de deposição na superfície abaxial nos diferentes terços do cafeeiro e em lados de aplicação

A análise integrada das figuras evidencia, na fração transpasse, um padrão consistente de maior concentração de traçador sob o ângulo de jato de 90°, particularmente no lado esquerdo da aplicação. A predominância desse ângulo na geração de maiores valores de depósito nessa fração, observada em ambas as faces foliares, pode estar associada à maior abertura do leque, que resulta em maior dispersão espacial do jato. A maior amplitude do leque favorece uma melhor distribuição das gotas logo após a atomização, reduzindo a probabilidade de colisão e coalescência entre elas. Como consequência, as gotas tornam-se mais suscetíveis ao transporte pelo fluxo de ar e maior propensão à dispersão irregular (Sinha *et al.*, 2020).

O acúmulo de traçador em lado esquerdo confirma a hipótese de um fluxo de ar não uniforme gerado pelo ventilador axial. Após a dissipação inicial da energia cinética do jato, as gotas finas tendem a ser transportadas preferencialmente para esse lado, resultando em maior concentração do traçador. Esse comportamento demonstra que o sistema de assistência de ar exerce papel determinante na redistribuição das gotas no interior da copa. Dessa forma, a premissa de que ângulos maiores possam intensificar perdas por deriva (Chen *et al.*, 2022b) manifesta-se, neste contexto, como um processo de "deriva interna", caracterizado pelo deslocamento não controlado da calda no interior do dossel.

Constata-se, portanto, que o ângulo de 80° e os ângulos combinados (40°-90°-60°) resultaram em menor depósito na fração transpasse, indicando maior controle do processo de deposição e evidenciando que diferentes ângulos de jato podem aumentar as perdas por transpasse. Assim, reforça-se a necessidade de ajustes angulares que equilibrem penetração no dossel com a minimização do deslocamento das gotas.

Com base nos valores obtidos, estima-se que entre 20 e 30% do traçador ultrapassou a área alvo de aplicação. Assim, o principal desafio consiste em compreender os mecanismos que governam o transpasse, a fim de subsidiar o desenvolvimento de tecnologias de aplicação para dosséis densos que maximizem a deposição na fração referência e eliminem as perdas, possivelmente por meio de sistemas de pulverização com fluxo de ar mais direcionado e uniforme (Godoy-Nieto *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2025; Wu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÕES

O ângulo de jato das pontas de pulverização exerce influência sobre a deposição de gotas no dossel do cafeeiro. O ângulo de 90° proporcionou maior deposição e melhor uniformidade na fração referência e em faces foliares, entretanto resultou em maior depósito na fração transpasse, maximizando as perdas de calda. Em contrapartida, o ângulo de 80° reduziu o transpasse, porém comprometeu a uniformidade de distribuição. A configuração de ângulos combinados, embora apresente deposição variável, mostrou-se uma estratégia para aplicações verticalmente direcionadas.

Na fração referência, a face abaxial recebe maior depósito no terço superior, enquanto na face adaxial maior depósito ocorre em terço inferior. Esse efeito está associado à arquitetura variável dos ramos ao longo do dossel. Ainda, a posição interna da copa apresenta deposição reduzida, evidenciando uma limitação estrutural recorrente em pulverizações assistidas por ar.

A dinâmica de deposição em dosséis densos mostrou-se complexa e dependente da interação entre parâmetros operacionais, fluxo de ar e arquitetura da planta, podendo esta última superar os ajustes de aplicação, como evidenciado pela inversão do padrão de deposição nas faces foliares no terço superior. Além disso, as limitações intrínsecas do equipamento, como a assimetria do fluxo de ar, podem comprometer a uniformidade espacial do depósito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, T. C.; CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, G. S.; SILVA, S. M.; LEMES, E. M. Canopy volume and application rate interaction on spray deposition for different phenological stages of coffee crop. **Coffee Science**, v. 15, p. 1-14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.25186/v15i.1777>
- ALHUDAIB, K.; ISMAIL, A. M. First occurrence of coffee leaf rust caused by *Hemileia vastatrix* on coffee in Saudi Arabia. **Microbiology Research**, v. 15, n. 1, p. 164-173, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/microbiolres15010011>
- AVELINO, J.; GAGLIARDI, S.; PERFECTO, I.; ISAAC, M. E.; LIEBIG, T.; VANDERMEER, J.; MERLE, L.; HAJIAN-FOROOSHANI, Z.; MOTISI, N. Tree effects on coffee leaf rust at field and landscape scales. **Plant Disease**, v. 107, n. 2, p. 247-261, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-21-1804-FE>
- BAIO, F. H.; OLIVEIRA, J. T. D.; SANTOS, L. A.; CUNHA, F. F. D.; TEODORO, P. E. Evaluation of spray nozzle wear under field conditions. **Engenharia Agrícola**, v. 44, p. e20230149, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v44e20230149/2024>
- BATISTA, L. A.; GUIMARÃES, R. J.; PEREIRA, F. J.; CARVALHO, G. R.; CASTRO, E. M. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, p. 475-481, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-6690201000030002>
- BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, p. 1–48, 2015. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- CAIXETA, E. T.; FRANZIN, M. L.; ZAMBOLIM, L.; VENZON, M.; CARVALHO, C. H. S. D.; OLIVEIRA, A. C. B. D.; RESENDE, M. D. V. D. **Manejo integrado de pragas e doenças do café arábica**. Circular Técnica 8, Brasília, DF, 2024. 35 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1167902/1/Circular-Tecnica-8-Manejo-integrado-de-pragas.pdf> Acesso em: 26 jun. 2025.
- CALDERONE, G.; FERRO, M. V.; CATANIA, P. A systematic literature review on recent unmanned aerial spraying systems applications in orchards. **Smart Agricultural Technology**, v. 10, p. 00708, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100708>.
- CARVALHO, A. M. X.; MENDES, F. Q.; BORGES, P. H. C.; KRAMER, M. A brief review of the classic methods of experimental statistics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, p. e56882, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56882>
- CHEN, C.; LI, S.; WU, X.; WANG, Y.; KANG, F. Analysis of droplet size uniformity and selection of spray parameters based on the biological optimum particle size theory. **Environmental Research**, v. 204, p. 112076, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112076>

CHEN, C.; LI, S.; WU, X.; ZHENG, Y.; WANG, Y.; KANG, F. Construction of a theoretical model for fan nozzles with precise atomization angles for plant protection. **Chemosphere**, v. 287, p. 132017, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132017>

CHOUDHARY, M. K.; KUMAR, M.; CARPENTER, G.; RANI, A.; JATAV, M. S.; THOMAS, E. V. Investigation of Nozzle Characteristics for a Hollow Cone Nozzle in Spray Patternator. **Biological Forum—An International Journal**, v. 15, n. 1, p. 638-642, 2023. Disponível em: <https://www.researchtrend.net/bfij/pdf/102%20Investigation-of-Nozzle-Characteristics-for-a-Hollow-Cone-Nozzle-in-Spray-Patternator-Mukesh-Kumar-Choudhary-102.pdf> Acesso em: 13 set. 2025.

CONTIERO, R. L.; BIFFE, D. F.; CATAPAN, V. **Tecnologia de Aplicação**. In: BRANDÃO FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. L.; BERIAN, L. O. S.; GOTO, R., comps. **Hortaliças-fruto** [online]. Maringá: EDUEM, p. 401-449, 2018. DOI: <https://doi.org/10.7476/9786586383010.0015>

CUI, H.; WANG, C.; YU, S.; XIN, Z.; LIU, X.; YUAN, J. Two-stage CFD simulation of droplet deposition on deformed leaves of cotton canopy in air-assisted spraying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 224, p. 109228, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109228>

CUI, L.; HANIKA, K.; VISSER, RGF; BAI, Y. Improving pathogen resistance by exploiting plant susceptibility genes in coffee (*Coffea* spp.). **Agronomy**, v. 10, n. 12, p. 1928, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10121928>

DARIO, G.; PRECIPITO, L. M. B.; OLIVEIRA, J. V. D.; LUCILHIA, L. V. D. S.; OLIVEIRA, R. B. D. Application techniques of pesticides in greenhouse tomato crops. **Horticultura Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 146-152, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-053620200206>

FENG, F.; ZHANG, Y.; WANG, Z.; DOU, H.; LIU, Y.; ZHONG, Y.; HAO, J. Experimental Study on the Airflow Field Distribution Characteristics of a Multi-Outlet Air-Assisted Orchard Sprayer with Variable Inlet Area. **Agronomy**, v. 16, n. 4, p. 450, 2026. <https://doi.org/10.3390/agronomy16040450>

FERNANDES, C. A. S.; DIAS, Y. F. S.; ALCANTRA, E.; FREITAS, A. S. de, REZENDE, R. M., MARQUES, R. F. de P. V.; OLIVEIRA, A. S. Incidência de *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae) em diferentes variedades e sistemas de manejo do cafeeiro. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 4, p. 105–115, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0011>

FU, S.; REN, N.; LIU, S.; SHAO, M.; JIANG, Y.; DU, Y.; ZHANG, H.; SUN, L.; ZHANG, W. An Improved Hierarchical Leaf Density Model for Spatio-Temporal Distribution Characteristic Analysis of UAV Downwash Air-Flow in a Fruit Tree Canopy. **Agronomy**, v. 15, n. 8, p. 1867, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081867>

GODOY-NIETO, A.; MIRANDA-FUENTES, A.; GRELLA, M.; BLANCO-ROLDÁN, G. L.; RODRÍGUEZ-LIZANA, A.; GIL-RIBES, J. A. Assessment of spray deposit and loss in traditional and intensive olive orchards with conventional and crop-adapted

sprayers. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1764, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081764>

GRISI, F. A.; ALVES, J. D.; CASTRO, E. M.; OLIVEIRA, C.; BIAGIOTTI, G.; MELO, L. A. Avaliações anatômicas foliares em mudas de café 'catuaí' e 'siriema' submetidas ao estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1730-1736, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000600008>

GUO, C.; HU, Y.; QIN, J.; WU, D.; XU, L.; WANG, H. Comparison of crown volume increment in street trees among six cities in western countries and China. **Horticulturae**, v. 10, n. 3, p. 300, 2024 <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030300>

IENO, E. N.; LUQUE, P. L.; PIERCE, G. J.; ZUUR, A. F.; SANTOS, M. B.; WALKER, N. J.; SAVELIEV, A. A.; SMITH, G. M. Three-way nested data for age determination techniques applied to cetaceans. In: ZUUR, A. F. *et al.* **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. New York: Springer, 2009. p. 459-468. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-620>.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. ISO 5682-1. **Equipment for crop protection—spraying equipment—part 1: Test methods for sprayer nozzles**. Geneva, 2017.

LENTH, R. V. **Emmeans**: Estimated Marginal Means, aka Least Squares Means. R package version 1.8.8, 2018. Disponível em: <http://cran.r-project.org/package=emmeans>. Acesso em: 26 set. 2024.

LI, J.; LI, Z. Q.; MA, Y. K.; CUI, H. J.; YANG, Z.; LU, H. Z. Effects of leaf response velocity on spray deposition with an air-assisted orchard sprayer. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 14, n. 1, p. 123-132, 2021. DOI: [10.25165/j.ijabe.20211401.5435](https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.5435)

MARGUS, A.; TIKKA, S.; KARVANEN, J.; LINDSTRÖM, L. Transgenerational sublethal pyrethroid exposure gives rise to insecticide resistance in a pest insect. **Science of the Total Environment**, v. 908, p. 168114, 2024. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.168114](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168114)

MAKHNENKO, I.; ALONZI, E. R.; FREDERICKS, S. A.; COLBY, C. M.; DUTCHER, C. S. A review of liquid sheet breakup: perspectives from agricultural sprays. **Journal of Aerosol Science**, v. 157, p. 105805, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105805>

MELO JÚNIOR, W. W. A. D.; SANTOS, F. L.; SCINOCCA, F.; ROSA, P. A. D.; MAGALHÃES, R. R. Determination of physical and mechanical properties of the coffee branch: An experimental approach. **Coffee Science**, v. 17, p. 1-9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.25186/v17i.2012>

MELLO, C. E. L.; CARMO, E. L. do; BRAZ, G. B. P.; PROCOPIO, S. de O.; SIMON, G. A.; SOUZA, M. de F.; ARAÚJO, G. E. S. de; LINS, H. A. Application rate and nozzles associated with droplet electrification affect the spraying quality in common bean. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 2, e273814, 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e273814>

MUGHAL, W; PEI, J.; LIU, J.; WANG, W.; HUSSAIN, J.; SAMO, I.A.; RONGJUN, X.; ZHANG, Y. Experimental investigation of flat fan nozzle V-cut depths and its impact on spray characteristics. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 22959, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05319-z>

NEGRISOLI, M. M.; SOUZA, D. M. D.; RODRIGUES, D. M.; JESUS, P. J. D.; RAETANO, C. G. Effect of angled spray nozzle designs on spray distribution and droplet spectrum. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 3, e20197043, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210029>

OSAKABE, M. Biological impact of ultraviolet-B radiation on spider mites and its application in integrated pest management. **Applied Entomology and Zoology**, v. 56, n. 2, p. 139-155, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13355-020-00719-1>

OWEN-SMITH, P.; WISE, J.; GRIESHOP, M. J. Season Long Pest Management Efficacy and Spray Characteristics of a Solid Set Canopy Delivery System in High Density Apples. **Insects**, v. 10, n. 7, p. 193, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects10070193>

QIAO, B.; HAN, L.; WANG, Z.; LI, Y.; WANG, L.; HAN, H.; HE, X. Design and testing of an intelligent variable-rate spraying system based on LiDAR-guided application. **Crop Protection**, v. 184, p. 106874, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106874>

QIU, W.; SUN, H.; SUN, Y. H.; LIAO, Y. Y.; ZHOU, L. F.; WEN, Z. J. Design and test of circulating air-assisted sprayer for dwarfed orchard. **Transactions of the CSAE**, v. 37, n. 6, p. 18-25, 2021. DOI: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.06.003>

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 26 set. 2024.

RU, Y.; HU, C.; CHEN, X.; YANG, F.; ZHANG, C.; LI, J.; FANG, S. Droplet penetration model based on canopy porosity for spraying applications. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 339, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020339>

SALVADOR, F.J.; LOPEZ, J.J.; DE LA MORENA, J.; CRIALESI-ESPOSITO, M. Experimental investigation of the effect of orifices inclination angle in multihole diesel injector nozzles. **Fuel**, v. 213, p. 215-221, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.076>

SALYANI, M. Florida Citrus Production Guide: pesticide Application Technology. **IFAS Extension**, ABE-356, rev. 8, 2025. DOI: <https://doi.org/10.32473/edis-cg024-2023>

SANTOS, D. W. F. N.; FORASTIERE, P. R.; SANTOS, F. S.; SILVA, R. M.; GUAZZELLI, T. M. Determinação do ângulo do jorro de pontas hidráulicas utilizando métodos convencionais e processamento digital de imagens. **Nativa**, v. 5, n. 3, p. 199–202, 2017. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v5i3.4509>

SHI, R.; SUN, H.; QIU, W.; LV, X.; AHMAD, F.; GU, J.; YU, H.; ZHANG, Z. Analysing airflow velocity in the canopy to improve droplet deposition for air-assisted spraying: a case

study on pears. **Agronomy**, v. 12, n. 10, p. 2424, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12102424>

SOUZA, F. G.; PORTES, M. F.; SILVA, M. V.; TEIXEIRA, M. M.; FURTADO JÚNIOR, M. R. Impact of sprayer drone flight height on droplet spectrum in mountainous coffee plantation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 12, p. 901-906, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n12p901-906>

WANG, D.; XU, S.; LI, Z.; CAO, W. Analysis of the influence of parameters of a spraying system designed for UAV application on the spraying quality based on Box–Behnken response surface method. **Agriculture**, v. 12, n. 2, p. 131, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020131>

WU, S.; LIU, J.; ZHEN, J.; LEI, X.; CHEN, Y. Resistance characteristics of broad-leaf crop canopy in air-assisted spray field and their effects on droplet deposition. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 924749, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.924749>

WU, M.; LIU, S.; LI, Z.; OU, M.; DAI, S.; DONG, X.; WANG, X.; JIANG, L.; JIA, W. A review of intelligent orchard sprayer technologies: perception, control, and system integration. **Horticulturae**, v. 11, n. 6, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11060668>

XU, S.; WANG, X.; LI, C.; RAN, X.; ZHONG, Y.; JIN, Y.; SONG, J. Effect of airflow angle on abaxial surface deposition in air-assisted spraying. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1211104, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1211104>

XUE, X.; ZENG, K.; LI, N.; LUO, Q.; JI, Y.; LI, Z.; LYU, S.; SONG, S. Parameters Optimization and Performance Evaluation Model of Air-Assisted Electrostatic Sprayer for Citrus Orchards. **Agriculture**, v. 13, n. 8, p. 1498, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081498>

YAN, C.; XU, L.; MA, S.; TAN, H.; SHEN, C.; MA, J.; ZHOU, H. Enhancing spray deposition in grape canopies through the development of new prototype air-disturbance sprayers. **Biosystems Engineering**, v. 244, p. 1-15, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.05.013>

YAN, C.; TAN, H.; NIU, C.; SHEN, C.; XU, L. Spray deposition in an artificial grapevine canopy as affected by spray angle regulation systems of radial airflow air-assisted sprayers. **Crop Protection**, v. 178, p. 106588, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106588>

ZHANG, F.; SUN, H.; QIU, W.; LV, X.; CHEN, Y.; ZHAO, G. Model construction and validation of airflow velocity attenuation through pear tree canopies. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1026503, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1026503>

ZHANG, L.; LI, Z.; CHU, H.; CHEN, Q.; LI, Y.; LIU, X. Design and Evaluation of a Novel Efficient Air-Assisted Hollow-Cônico Electrostatic Nozzle. **Agriculture**, v. 15, n. 12, p. 1293, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15121293>