

GUSTAVO LUÍS SANT'ANA DIAS

**DERIVA EM TÚNEL DE VENTO EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES
AMBIENTAIS DURANTE A PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

D541d
2019
Dias, Gustavo Luís Sant'Ana, 1980-
Deriva em túnel de vento em função das condições
ambientais durante a pulverização agrícola / Gustavo Luís
Sant'Ana Dias. – Viçosa, MG, 2019.
1 tese eletrônica (xiii, 75 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Mauri Martins Teixeira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2019.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.732>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Pulverização e polvilhação na agricultura - Aspectos
econômicos. 2. Túneis aerodinâmicos. 3. Evaporação.
I. Teixeira, Mauri Martins, 1953-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 632.94

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB-6/2523

GUSTAVO LUÍS SANT'ANA DIAS

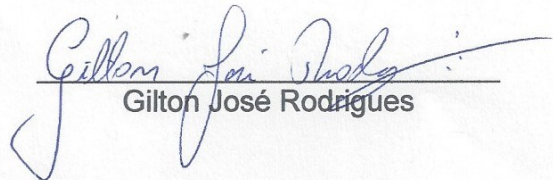
**DERIVA EM TÚNEL DE VENTO EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES
AMBIENTAIS DURANTE A PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 05 de julho de 2019.



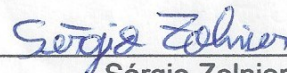
Edney Leandro da Vitória



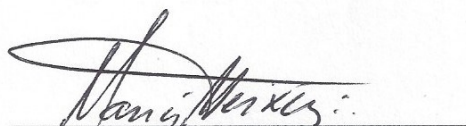
Gilton José Rodrigues



Marconi Ribeiro Furtado Júnior



Sérgio Zolnier
(Coorientador)



Mauri Martins Teixeira
(Orientador)

“Aquilo que não me mata, só me fortalece.”

(Friedrich Nietzsche)

AGRADECIMENTOS

A Deus pai, por sua infinita bondade e misericórdia e por me proporcionar grandes maravilhas, sendo uma delas a oportunidade de cursar e concluir este projeto de pós-graduação.

Aos meus pais, José Maria Moreira Dias e Inez das Graças Sant'Ana Dias, pelas oportunidades que tive e por serem meu norte e minhas referências de vida.

Ao meu irmão Leandro Sant'Ana Dias, pela constante preocupação, pelas palavras de incentivo em momentos de incerteza e insegurança e pelo grande apoio emocional.

Aos meus tios, em especial à Elza de Fátima Moreira Dias, pelo carinho, pela atenção e pelo apoio, e a outros familiares, pela demonstração de alegria pelo meu sucesso. A todos os primos, que sempre torceram pela minha vitória.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade ímpar de realizar meu curso de doutorado.

Ao meu orientador, professor Mauri Teixeira Martins, pela orientação e oportunidade.

Aos meus coorientadores, professor Haroldo Carlos Fernandes, pelos conselhos, pela amizade, pela compreensão e pela força na montagem do experimento e na coleta de dados; professor Sérgio Zolnier, âncora na realização deste trabalho, pelos conselhos, pela orientação na instrumentação do experimento nos aspectos meteorológicos e pelo apoio; e Professor Antônio Policarpo de Souza, pela orientação nos parâmetros estatísticos.

Aos técnicos e amigos do Laboratório de Mecanização Agrícola Marcelo do Carmo Freitas, Danilo Almeida Firmino e Vicente Almeida Firmino, pela amizade, pelo companheirismo, pela paciência e pela ajuda na execução deste projeto.

Aos colegas de pós-graduação, pelo companheirismo, pela boa convivência e pelo auxílio em todas as atividades inerentes ao curso de pós-graduação.

Aos amigos do Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas, por contribuírem diretamente para a realização deste trabalho.

Ao amigo e professor Antônio Alberto da Silva, pilar no meu ingresso na pós-graduação na UFV em 2012, por sua amizade, pelo carinho, pela compreensão, pela força, pela orientação e pelo apoio, seja como seu aluno, seja como seu ex-aluno.

Aos estagiários do Setor de Mecanização Agrícola, Túlio Sant’Ana Maciel e Victor de Sousa Lopes, essenciais durante a coleta de dados.

Aos professores Marconi Furtado Ribeiro e Edney Leandro da Vitória, pelos conselhos na construção do túnel de vento, pela execução da coleta de dados e pelas sugestões na escrita dos resultados obtidos.

Ao professor Cosme Damião Cruz e toda a sua equipe, pelo suporte com os softwares de estatística GENES e R *Studio*, e ao professor Júlio César Lima Neves, pelo auxílio na interpretação dos gráficos gerados.

Aos amigos Efigênia Ribeiro de Castro (*in memoriam*) e Luiz Carlos de Castro, pelas orações, pelo apoio espiritual e moral e pelo carinho, desde os tempos de outrora.

À Paloma Marília Cardoso Firmino, pelas palavras de apoio e pelo incentivo em momentos difíceis do curso.

Aos amigos Vitor Rafael Barra e Márcio Rocha de Oliveira, que foram os meus primeiros incentivadores na realização de uma pós-graduação.

Aos amigos Welberth Assunção e Gustavo Vieira Veloso, pela ajuda direta na conclusão deste trabalho de pós-graduação.

À Comissão Coordenadora do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Agrícola, pela paciência e compreensão diante dos imprevistos acontecidos na reta final do curso de doutorado.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho.

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

BIOGRAFIA

GUSTAVO LUÍS SANT'ANA DIAS, filho de José Maria Moreira Dias e de Inez das Graças Sant'Ana Dias, nasceu na cidade de Viçosa, Minas Gerais, em 25 de outubro de 1980.

Em janeiro de 2009, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Em agosto de 2013, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação intitulada “Sintomas de intoxicação de culturas por herbicidas” em fevereiro de 2015.

Em março de 2015, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Doutorado, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese intitulada “Deriva em túnel de vento em função das condições ambientais durante a pulverização agrícola” em julho de 2019.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Geral.....	4
2.2. Específicos	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. Perdas por deriva durante as pulverizações	5
3.2. Perdas por evaporação durante as pulverizações	10
3.3. Pontas hidráulicas usadas na pulverização.....	14
3.4. Tecnologia de aplicação	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1. Confeção e desenvolvimento do túnel de vento.....	20
4.2. Equipamentos e instrumentação do sistema de coleta de dados	23
4.3. Sistema de pulverização e aquecimento e instalação do sistema de aquisição de dados	27
4.4. Mensuração das variáveis climatológicas	32
4.5. Caracterização da ponta hidráulica	39
4.5.1. Calibração de manômetros.....	39
4.5.2. Vazão de líquido da ponta hidráulica.....	40
4.5.3. Espectro de gotas da ponta hidráulica.....	41
4.6. Condução do experimento dentro do túnel de vento.....	41
4.6.1. Utilização do analisador de partículas a laser	41
4.6.2. Perdas por deriva no túnel de vento	43
4.6.3. Influência das condições climáticas na deriva da população de gotas.....	43
4.7. Ajuste de modelo estatístico para estimar a deriva em ambiente controlado	44
4.7.1. Modelo estatístico	44
4.7.2. Variáveis dependentes.....	44
4.7.3. Variáveis independentes	45
4.7.4. Propriedades do modelo estatístico.....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46

5.1. Velocidade do ar no túnel de vento e velocidade do eixo do ventilador.....	46
5.2. Determinação do espectro da população de gotas.....	47
5.3. Comportamento do espectro da população de gotas produzidas pela ponta XR-VP 110-02 na pressão de 300 kPa dentro do túnel de vento	49
5.3.1. Influência das condições climáticas no diâmetro da mediana volumétrica (Dv 50).....	49
5.3.2. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor que 100 micrometros [$V (\%) < 100 \mu\text{m}$]	51
5.3.3. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro entre 100 e 200 micrometros [$100 \mu\text{m} < V (\%) < 200 \mu\text{m}$].....	53
5.3.4. Influência das condições climáticas na amplitude relativa (SPAN)	56
5.3.5. Influência das condições climáticas no diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 10% do volume total de líquido pulverizado (Dv 10).....	58
5.3.6. Influência das condições climáticas no diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 90% do volume total de líquido pulverizado (Dv 90).....	60
5.3.7. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro entre 100 e 200 micrometros [$200 \mu\text{m} < V (\%) < 300 \mu\text{m}$].....	62
5.3.8. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro entre 300 e 400 micrometros [$300 \mu\text{m} < V (\%) < 400 \mu\text{m}$].....	64
5.3.9. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro maior que 400 micrometros [$V (\%) > 400 \mu\text{m}$]	66
6. CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios das velocidades do ar no interior do túnel de vento em diferentes frequências do inversor	46
Tabela 2 – Caracterização do espectro da população de gotas da ponta hidráulica XR VP 110-02 submetidas à pressão de 300 kPa.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura metálica do túnel de vento.	20
Figura 2 – Montagem do túnel de vento.	21
Figura 3 – Parte superior frontal do túnel de vento, fechada com vidro.....	22
Figura 4 – Túnel de vento em vista isométrica e seus acessórios.	22
Figura 5 – Vista do túnel de vento para saída do ar durante a pulverização.	23
Figura 6 – Vista superior do analisador de partículas a laser.	24
Figura 7 – Sensor de umidade relativa e temperatura Vaisala.....	25
Figura 8 – Termopar do tipo K (A) e fios de medição (B).	26
Figura 9 – Sistema de aquisição de dados fixado na parte superior do túnel de vento...	27
Figura 10 – Sistema de pulverização.	28
Figura 11 – Cilindro de CO ₂	28
Figura 12 – Ponta XR utilizada para a pulverização dentro do túnel de vento.....	29
Figura 13 – Parte interna do sistema de pulverização.	30
Figura 14 – Sistema de aquecimento conectado ao túnel de vento, com sensor do tipo termopar do tipo K fixado.....	31
Figura 15 – Lança-chamas para o aquecimento do ar no interior do túnel de vento.	32
Figura 16 – Display do sensor de velocidade e da temperatura ÔMEGA FM 1000 preso ao túnel.....	33
Figura 17 – Sonda utilizada para as aferições de velocidade de ar (em destaque a marcação das profundidades de medições).....	33
Figura 18 – Inversor de frequência para variação da velocidade angular do eixo do motor.	34
Figura 19 – Sonda do ÔMEGA FM 1000 sendo introduzida na parte superior do túnel de vento para verificações de velocidades.	35
Figura 20 – Diagrama da medição das velocidades de ar utilizando a sonda do sensor ÔMEGA FM 1.000.	35
Figura 21 – Sistema de transmissão de potência do ventilador ligado ao motor.....	37
Figura 22 – Tacômetro manual para aferição de rotação.....	37
Figura 23 – Bancada de calibração de manômetro, com a presença do manômetro de referência e do manômetro a ser calibrado.	40
Figura 24 – Malvern Spraytec Instruments Ltd. com dados gerados pós-pulverização.	43
Figura 25 – Perfil de calibração dos manômetros utilizados no experimento.	47

Figura 26 – Influência dos DPVs no Dv50, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h ⁻¹ .	50
Figura 27 – Influência dos DPVs no Dv50, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h ⁻¹ .	50
Figura 28 – Influência dos DPVs no Dv50, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h ⁻¹ .	51
Figura 29 – Influência dos DPVs no V (%) < 100 μm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h ⁻¹ .	52
Figura 30 – Influência dos DPVs no V (%) < 100 μm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h ⁻¹ .	53
Figura 31 – Influência dos DPVs no V (%) < 100 μm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h ⁻¹ .	53
Figura 32 – Influência dos DPVs em 100 μm < V (%) < 200 μm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h ⁻¹ .	54
Figura 33 – Influência dos DPVs em 100 μm < V (%) < 200 μm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h ⁻¹ .	55
Figura 34 – Influência dos DPVs em 100 μm < V (%) < 200 μm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h ⁻¹ .	55
Figura 35 – Influência dos DPVs no SPAN, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h ⁻¹ .	56
Figura 36 – Influência dos DPVs no SPAN, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h ⁻¹ .	57
Figura 37 – Influência dos DPVs no SPAN, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h ⁻¹ .	58
Figura 38 – Influência dos DPVs no Dv 10, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h ⁻¹ .	59
Figura 39 – Influência dos DPVs no Dv 10, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h ⁻¹ .	59
Figura 40 – Influência dos DPVs no Dv 10, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h ⁻¹ .	60
Figura 41 – Influência dos DPVs no Dv 90, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h ⁻¹ .	61
Figura 42 – Influência dos DPVs no Dv 90, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h ⁻¹ .	61
Figura 43 – Influência dos DPVs no Dv 90, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h ⁻¹ .	62
Figura 44 – Influência dos DPVs em 200 μm < V(%) 300 μm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h ⁻¹ .	63

Figura 45 – Influência dos DPVs em $200 \mu\text{m} < V (\%) < 300 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $10,0 \text{ km h}^{-1}$	63
Figura 46 – Influência dos DPVs em $300 \mu\text{m} < V (\%) < 400 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $3,0 \text{ km h}^{-1}$	65
Figura 47 – Influência dos DPVs em $300 \mu\text{m} < V (\%) < 400 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $7,0 \text{ km h}^{-1}$	65
Figura 48 – Influência dos DPVs no $V (\%) > 400 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $7,0 \text{ km h}^{-1}$	66

RESUMO

DIAS, Gustavo Luís Sant'Ana, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2019. **Deriva em túnel de vento em função das condições ambientais durante a pulverização agrícola.** Orientador: Mauri Martins Teixeira. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier e Antônio Policarpo de Souza.

A deriva é um dos efeitos colaterais da aplicação de agrotóxicos. Ela está diretamente condicionada à velocidade do vento, porém condições meteorológicas desfavoráveis para pulverização também acentuam esse tipo de fenômeno. Neste estudo, objetivou-se avaliar a interferência das condições ambientais na pulverização hidráulica, utilizando uma ferramenta capaz de registrar espectros de gotas pulverizadas, ou seja, um analisador de partículas a laser. O método que utiliza esse equipamento seguiu os protocolos para coleta dos dados, levando-se em conta a distância alcançada pelas gotas pulverizadas até o alvo e a combinação de diferentes déficits de pressão de vapor e velocidades. Para realização dos ensaios, um túnel de vento foi montado, constituído por: ponta hidráulica (XR-VP 100-02), pulverizador pressurizado com cilindro de CO₂, sistema de aquecimento a gás, sistema de ventilação dotado de ventilador axial de oito hélices e sensores de temperatura e umidade relativa. As condições ambientais durante os ensaios foram: déficits de pressão de vapor (DPV) de 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; 2,5 kPa e velocidades do ar de 3,0; 7,0; e 10,0 km h⁻¹. As análises dos dados obtidos foram realizadas empregando-se uma regressão múltipla, e os resultados foram relacionados usando-se uma metodologia de superfície de resposta. Constatou-se que a velocidade do vento associada ao DPV provocou alta deriva das gotas pulverizadas, no entanto a velocidade do vento foi o principal fator de influência na deriva. Comparando o comportamento da ponta hidráulica em diferentes déficits de pressão de vapor, distâncias e velocidades de vento de 3,0 a 10,0 km h⁻¹, na menor velocidade do ar, constatou-se que a variável $D_v 50$ sofreu um acréscimo de 76,14 μm em seu valor médio; que para a variável $100 \mu\text{m} > V\%$ o diâmetro médio dessa classe de gotas aumentou em 9,12 μm ; que a variável $100 \mu\text{m} < V\% < 200 \mu\text{m}$ teve um aumento de 20,99 μm em sua média; e que os valores coletados de SPAN não ultrapassaram 1,5, garantindo, assim, boa homogeneidade durante a pulverização.

ABSTRACT

DIAS, Gustavo Luís Sant'Ana, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2019. **Spray drift influence on agricultural spraying due to meteorological conditions.** Advisor: Mauri Martins Teixeira. Co-advisors: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier and Antônio Policarpo de Souza.

The drift is one of the collateral effects the application of pesticides. It is conditioned directly the wind speed, however unfavorable weather conditions for spraying also accentuate this type of phenomenon. In front of the proposed, was objectified to evaluate the interference of meteorological conditions in hydraulic spraying, using a tool able for drift collet, that is a laser particle analyzer. The method using this kind of equipment followed the same routines for data collection, considering to the distance achieved by the spray drop until the target and the combination of different vapor pressure deficits and velocities. It was evaluated how the analysis variables from spraying presented different results if spray droplets were doing their way until your arrival on target under the influence of different psychrometric conditions. For realization of the tests, a wind tunnel was installed, and consists of hydraulic Tip (XR-VP 100-02), research spray linked CO₂ cylinder, gas heating system, ventilation system equipped with an axial fan of eight propellers, climatic chamber with the objective to maintain a desired an internal psychrometric condition to develop the experiment, flow homogenizer, and temperature and relative humidity sensors. The meteorological conditions for both works were comprehend by vapor pressure deficits (VPD) of 5; 7; 10; 15 and 25 hPa and air velocities of 3; 7; and 10 km h⁻¹. The statistics of the work were realized through a multiple regression, and the data were related through the response surface methodology. The wind velocities associated to VPD provokes high spraying drops drift, although the first one appears like the main influence factor in the drift. Comparing the behavior the hydraulic tips in differences vapor pressure deficit, distances and wind velocities of 3,0 km h⁻¹ to 10,0 km h⁻¹, in the lower wind velocities: it found out the variable D_v 50 that suffered an increase of 13,2 µm in its average value; it turned out that for the variable 100 µm > V% has got 1,19 µm; it was observed that the variable 100 µm < V% < 200 µm got increase of 1,93 µm in its average; and the SPAN collected values does not exceed 1,5, insure a good homogeneity during the spraying.

1. INTRODUÇÃO

Os defensivos agrícolas têm grande importância na cadeia produtiva, mas seu uso, muitas vezes indiscriminado, tem sido alvo de questionamento de pesquisadores, da sociedade e de autoridades. Eles são importantes porque têm potencial químico, físico e biológico sobre os alvos que se deseja controlar. Um dos grandes problemas do manejo desses produtos é o fato de seu controle não ser tratado de maneira individual, e sim como receita pronta. Isso ocorre quando os fatores ambientais locais são desconsiderados no momento da aplicação, uma vez que eles são tão importantes como a escolha da tecnologia correta para pulverizar, a escolha correta do agrotóxico a ser aplicado e a utilização de uma rotina já conhecida importada de outras localidades.

A tecnologia de aplicação tem como objetivo a deposição da quantidade certa de produto no alvo desejado, com máxima eficiência e da maneira mais econômica possível, reduzindo assim, minimamente, a contaminação ecológica. Quando se aborda o tema de contaminação ambiental, nos referimos quase sempre ao descarte das embalagens dos produtos químicos de maneira inadequada após a pulverização. No entanto, esse é um procedimento que depende somente de obedecer a uma série de protocolos já estabelecidos em legislação. O maior problema no que se refere à contaminação ambiental é, na verdade, a deriva proveniente das aplicações de agrotóxicos.

Entre os fatores que mais prejudicam a eficiência da aplicação de defensivos encontra-se a deriva, que consiste no transporte das gotas pulverizadas pela ação do vento (DE SCHAMPHELEIRE et al., 2009). Ela pode ainda ser conceituada como o movimento de um produto no ar, durante ou depois da aplicação, para um local diferente do planejado, ou como o conjunto de todas as gotas que contêm ingredientes ativos que são depositadas fora do alvo. Esse é também um dos principais motivos de perdas de agrotóxicos para o ambiente.

Associadas ao pequeno tamanho das gotas (que geralmente é inferior a 200 μm), as condições climáticas são consideradas os principais fatores causadores da deriva (MOTA, 2011). Velocidades acima de 2,78 m s^{-1} (10 km h^{-1}) e gotas menores que 100 μm propiciam alta deriva (NASCIMENTO et al., 2013). Quanto menor o diâmetro da gota e maior a velocidade do vento, maior é a distância percorrida por ela até atingir o solo (ARVIDSSON; BERGSTRÖM; KREUGER, 2011).

Segundo Villalba e Hetz (2010), em temperatura do ar maior que 30°C, umidade relativa do ar menor que 55% e velocidade do vento menor que 0,55 m s⁻¹ ou maior que 3,0 m s⁻¹, as perdas tendem a ser elevadas, pois a grande velocidade do vento e a combinação de altas temperaturas com baixas umidades relativas do ar causam deriva por deslocamento e evaporação das gotas, respectivamente. Como consequência, aplicações nessas condições pouco favoráveis podem comprometer sobremaneira culturas adjacentes. Isso se torna mais agravante em regiões que fazem intenso uso de agrotóxicos para obter elevada produtividade.

A associação do índice de deriva com a ponta hidráulica a ser utilizada é fortemente afetada pelo tamanho das gotas: gotas pequenas, que não têm incidência no dossel das culturas, se deslocam a grandes distâncias na atmosfera pela corrente de ar, (MACIEL, 2016). Quanto menor o tamanho da gota, maior sua suscetibilidade para sofrer deriva.

Pouca atenção era dada ao tamanho e à uniformidade das gotas produzidas durante a aplicação de produtos fitossanitários, pois o que interessava era “molhar” bem a cultura, o que se conseguia mediante um volume de calda bastante alto. O uso de menor volume de calda aumenta a autonomia e a capacidade operacional dos pulverizadores, o que pode aumentar os riscos de contaminação ambiental.

O conhecimento das características técnicas das pontas de pulverização é importante, pois determina a condição ótima de trabalho, aumentando, assim, a eficiência da pulverização. Na maioria das vezes, dá-se muita importância ao produto fitossanitário a ser aplicado e pouca atenção à técnica de aplicação. Não basta conhecer o produto a ser aplicado, também é fundamental conhecer a forma de aplicação, e para isso é necessário ter uniformidade de aplicação e espectro de gotas adequado.

O tipo de bico, a vazão nominal, o ângulo de descarga, a pressão de operação e as características do líquido de aplicação são fatores que determinam o espectro da população de gotas. Com a obtenção de gotas de diâmetro pequeno, tem-se como consequência maior densidade de gotas depositadas sobre o alvo, para um mesmo volume de aplicação. Gotas com ar no seu interior têm o comportamento modificado, resultando em retenção e cobertura semelhantes às de gotas finas, porém são menos propensas à deriva. Vale ressaltar que o bico é composto pelo conjunto de componentes ou estruturas até a fixação na barra (corpo, filtro, ponta hidráulica e capa), enquanto a ponta hidráulica corresponde a um dos componentes do bico, responsável pela formação das gotas (GURGACZ, 2013).

A deriva pode ser primária (*primary drift*) ou secundária (*secondary drift*). A primária ocorre quando o tipo de adjuvante e o tipo de formulação utilizados influenciam o potencial de deriva, porém o ingrediente ativo usado não influencia esse potencial, ou seja, o ingrediente ativo presente em qualquer composto agroquímico apresenta reduzido potencial de deriva, mas os adjuvantes ou as formulações inseridas dentro do produto para otimizar o seu desempenho fazem com que o seu potencial de deriva seja aumentado.

Já a deriva secundária fundamenta-se na pressão de vapor específica de cada produto e dos produtos diluídos à base de óleo e dos diluídos à base de água, bem como em suas respectivas volatilidades devido a esse aspecto.

Outra alternativa para a redução de deriva, além da seleção de uma ponta correta, é o uso de adjuvantes, uma vez que sua presença na calda altera as propriedades físicas do líquido a ser pulverizado. Adjuvante é qualquer composto que, adicionado a uma formulação ou incorporado ao tanque de pulverização, facilita a mistura, a aplicação e/ou a eficácia daquele produto (OLIVEIRA, 2011). Durante anos discutiu-se se os adjuvantes deveriam ou não ser considerados um adendo na Lei nº 7.802/89 dos Agrotóxicos (regulamentada pelo Decreto nº 4.074/02), e por isso estarem submetidos aos mesmos processos de registro. Essa pendência jurídica foi encerrada com a publicação do Ato nº 104 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), em 20 de novembro de 2017, que cancela a obrigatoriedade de os adjuvantes serem registrados como agrotóxicos, já que previamente não havia qualquer consideração sobre eles na Lei nº 7.802 e no Decreto nº 4.074. Os adjuvantes referentes a cada tipo de defensivo, visando ao aumento positivo na eficiência da pulverização, podem produzir gotas maiores (SASAKI, 2014).

Todos os anos acontecem inúmeros casos de queixas e denúncias de prejuízos decorrentes da deriva das pulverizações de agrotóxicos. Apesar dos limitados esforços de agricultores e profissionais da área, os problemas vêm crescendo ano a ano, pela falta de conhecimento.

A divulgação de trabalhos científicos envolvendo o deslocamento das gotas devido à deriva provocada por inadequadas condições meteorológicas comprova a grande importância do conhecimento dessas perdas para garantir um controle fitossanitário adequado e ambientalmente saudável. Entretanto, muitas perguntas ainda carecem de respostas, assim como a quantificação dessas perdas, o que justifica intensificar os estudos nessa área.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

O objetivo deste estudo foi quantificar e avaliar o potencial de deriva sob condições meteorológicas controladas, representadas pelo déficit de pressão de vapor-d'água e pela velocidade do ar em túnel vento. Para gerar os resultados, foi utilizada uma metodologia envolvendo um analisador de partículas a laser, fazendo a leitura de gotas em suspensão.

2.2. Específicos

- Construir um protótipo experimental de um túnel de vento para simular as pulverizações agrícolas;
- Determinar as perdas por deriva nas pulverizações no interior do túnel de vento;
- Avaliar os espectros de gotas de uma ponta hidráulica em diferentes condições meteorológicas, caracterizadas pelo déficit de pressão de vapor-d'água no ar e pela velocidade do vento, e as distâncias a jusante da pulverização, empregando-se o analisador de partículas a laser;
- Ajustar um modelo estatístico para estimar a influência do ambiente semicontrolado no espectro de gotas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Perdas por deriva durante as pulverizações

Entre os fatores climáticos que afetam a qualidade de uma pulverização, destaca-se a velocidade do vento. Esse fator define o potencial risco de deriva de agrotóxico no momento da pulverização (HUANG et al., 2012).

A deriva é conceituada de forma similar, por vários autores. Hilz e Vermeer (2013) definiram-na como o transporte das gotas pulverizadas pela ação do vento. Ela pode ainda ser conceituada como o movimento de um produto no ar, durante ou depois da aplicação, para um local diferente do planejado (DONKERSLEY; NUYTTENS, 2011), ou como o conjunto de todas as gotas que contêm ingredientes ativos que são depositadas fora do alvo.

A velocidade terminal é o fator que explica por que algumas gotas pulverizadas podem sofrer deriva. Ela estima a distância que uma gota pode alcançar, considerando sua altura de lançamento e o quanto sua massa específica consegue amenizar os efeitos de sua aceleração em queda. Por isso, menores diâmetros de gotas, como gotas de até 100 μm , são mais suscetíveis à deriva, pois sua massa específica é menor e não influencia o efeito de sua aceleração em queda.

Cunha (2008), com base na equação clássica da velocidade terminal, determinou a distância horizontal teórica percorrida por gotas de tamanho conhecido, submetidas a diferentes alturas de lançamento e velocidades do vento. A análise dos dados gerados permitiu estimar a distância horizontal percorrida por gotas de pulverização, em diversas condições de lançamento, estando os resultados simulados altamente correlacionados com o diâmetro das gotas e com a velocidade de deslocamento horizontal.

Apesar da velocidade inicial das gotas poder ser maior que a sua velocidade terminal, em geral, para as gotas com maior problema de deriva (diâmetro inferior a 100 μm), essas velocidades se igualam muito rapidamente, em virtude da resistência do ar (MATTHEWS, 2000). Considerando, então, tempos de aceleração pequenos, admite-se que a gota se desloca com velocidade constante tanto na vertical (equação 1) quanto na horizontal.

$$X = Y \frac{V_h}{V_t} \quad (1)$$

em que X = distância percorrida na horizontal (m); Y = distância percorrida na vertical (m); v_h = velocidade horizontal (m s^{-1}); e v_t = velocidade terminal (m s^{-1}).

Nas condições avaliadas, Cunha (2008) constatou que a distância horizontal máxima percorrida pelas gotas foi inferior a 40 m. O autor, avaliando a eficiência de zonas de segurança na redução do arraste das gotas, concluiu que essa zona influencia a redução de deriva.

A deriva realmente influencia a qualidade da aplicação, e em muitos casos é preciso identificá-la no momento da aplicação, primeiramente coletando-a e analisando-a em função do déficit de pressão de vapor e da velocidade do vento (OZKAN; DERKSEN, 2016).

Butler Ellis e Miller (2010) ressaltaram o temor com o crescente uso de produtos fitossanitários nas últimas décadas, em particular a preocupação com a saúde humana e a contaminação ambiental, tanto em áreas rurais quanto em urbanas, sendo o ar o principal meio de contaminação.

Analisando as várias formas de avaliação em que a modelagem de deriva pode ser aplicada, Butler Ellis et al. (2010) desenvolveram e validaram um modelo que apresentou novos dados de contaminação para seres humanos, em aplicações com pontas de pulverização comumente utilizadas no Reino Unido. Os autores avaliaram a distância entre o operador e o pulverizador convencional em três trabalhos, com velocidade de deslocamento do pulverizador de 12 a 16 km h^{-1} , altura de barra de 0,5 a 1,1 m acima da cultura e volume de aplicação de 75 a 120 L ha^{-1} . Eles encontraram respostas divergentes ao analisarem uma única linha de pulverização, e concluíram que os dados coletados indicam uma relação empírica, podendo ser utilizados no mapeamento da deriva.

Outra modelagem conhecida para estimativa de deriva que possibilita escolher e definir as melhores condições de pulverização, como também minimizar o arraste das gotas durante a aplicação, foi desenvolvida por Zhu et al. (1995): o DRIFT SIM, no USDA Agricultural Research Service (Serviço de Pesquisa Agrícola Americano) da Universidade de Ohio. Essa modelagem também é baseada na equação da velocidade terminal da gota. Os autores desenvolveram um programa de computador capaz de prever as distâncias da deriva de gotículas sob uma ampla variedade de condições. Ao

contrário de outros softwares de simulação em computador, o Drift SIM não requer habilidades especiais para sua operação, e seus requisitos de sistema são mínimos. Somente é necessário possuir alguns dados de entrada para que o sistema possa gerar a simulação.

Outras pesquisas têm comparado as coletas da deriva fora da área-alvo com o depósito dentro da área-alvo, realizado por distintos tipos de coletores, tanto os naturais, com as folhas, quanto os artificiais, a exemplo do cartão Mylar, dos papéis hidrossensíveis, das placas de vidro, entre outros (FRITZ et al., 2011; THOMSON; WOMAC; MULROONEY, 2013).

Associadas ao pequeno tamanho das gotas (geralmente inferiores a 200 μm), as condições climáticas são os principais fatores causadores da deriva. Velocidades acima de 2,78 m s^{-1} (10 km h^{-1}) e gotas menores que 100 μm propiciam alta deriva (FRITZ; HOFFMANN; BAGLEY, 2012). Segundo Maybank, Yoshida e Grover (1978), a existência de deslocamento de agroquímicos por ventos ou evaporação é proveniente do perfil da massa de gotas formadas na pulverização e da possível tendência de evaporação de agrotóxicos. Os fatores climáticos entram em segundo plano de análise para os autores.

As condições climáticas que influenciam a deriva de agrotóxicos têm sido estudadas por diversos autores, dentre eles Arvidsson, Bergström e Kreuger (2011), que pesquisaram as influências das condições ambientais na deriva de agrotóxicos. Nos ensaios realizados em um campo aberto, foi utilizado um pulverizador de barras de 12 m, cujas pontas foram caracterizadas com o auxílio de um analisador de partículas a laser *Malvern 2600*. A análise de deriva de agrotóxicos até a distância de 50 m da área pulverizada foi realizada em diferentes condições operacionais. Para a análise de deposição, utilizaram-se alvos artificiais e o traçador fluorescente Uvitex LV, na concentração de 0,1 g L^{-1} . As condições ambientais no momento da pulverização foram monitoradas, com os ensaios sendo feitos em diferentes dias, selecionados de tal forma que o céu estivesse pelo menos 70% encoberto por nuvens, visando manter a homogeneidade das condições meteorológicas durante a pulverização.

Arvidsson, Bergström e Kreuger (2011) ainda constataram que, na pulverização com a ponta XR 110 01 VS na pressão de 4,5 bares gerando gotas finas, a altura da barra, a velocidade do vento, a temperatura do ar, o déficit de pressão de vapor-d'água e a velocidade de trabalho influenciaram a deriva de agrotóxicos. Em média, a deriva total foi de 5%. De modo geral, a deriva aumentou na ordem de 0,91% a

cada elevação de 0,1 m na altura da barra; 0,94% a cada aumento de 1 m s⁻¹ na velocidade do vento; e 0,2% para cada °C que se aumentou a temperatura do ar. Quanto à velocidade de trabalho, houve aumento na deriva de 1% a cada aumento na velocidade de 1 m s⁻¹.

Os autores observaram uma alta correlação entre a porcentagem do volume de gotas < 102 µm e o total da fração de gotas que sofreu deriva. Eles verificaram também que a porcentagem do volume de gotas < 102 µm é o melhor parâmetro para prever o risco de deriva, comparado ao parâmetro Diâmetro Médio Volumétrico (DMV) (diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 50% do volume total de líquido pulverizado). Relataram ainda que, ao utilizar pontas do tipo leque com pré-orifício e indução de ar, ocorreu redução da deriva na ordem de 50 e 75%, respectivamente. Partículas de menor tamanho geradas pelas pontas favorecem a deriva e a volatilidade de agroquímicos (NUYTTENS et al., 2009; GIMENES et al., 2013; CHECHETTO et al., 2013; GANDOLFO et al., 2014).

Segundo Al Heidary et al. (2014), para se ter uma visão geral das limitações que ocorrem em uma aplicação devido à deriva, comenta-se muito que a sua redução, na prática, é vista como um fato difícil de ocorrer, porque todos os estudos são feitos em ambientes controlados e, portanto, de difícil adaptação e repetibilidade no campo, pelo impacto dos fatores climatológicos.

Em discordância com essa afirmação, Nuyttens et al. (2011) monitoraram, durante cinco anos, a deriva a partir de pulverizadores de campo usando uma abordagem integrada única: indireta (a qualidade da pulverização e sua deriva dentro do túnel de vento) e direta (experiências de campo). Em ambos os métodos foram elaborados modelos específicos para a sua medição, a fim de avaliar os efeitos da técnica de aplicação por pulverização, as características de gotas, as zonas de amortecimento, as condições meteorológicas, as propriedades líquidas utilizadas e o comportamento da cultura na deriva. Os autores observaram que as medições de deriva pelo método indireto podem ser uma alternativa valiosa para experimentos em nível de campo. A partir disso, um modelo conhecido como dinâmica de fluidos computacionais (CFD ou *dynamic fluids computer*) foi desenvolvido e adaptado para 3D, para ser usado em um estudo sistêmico de diferentes fatores de influência. Esse modelo foi reduzido a uma versão mais básica, em 2D, passando a ser útil como uma ferramenta de mão para se trabalhar com deriva no campo.

Com base nesse estudo e com essas ferramentas, Nuyttens et al. (2011) disponibilizaram protocolos e dados, portanto o modelo CFD pode ser adaptado, de maneira a permitir compreender e reduzir os fenômenos complexos de deriva na pulverização.

Como mencionado, as pontas com assistência de ar reduziram a deriva de pulverização, e o maior impacto para as pulverizações ocorreu com a utilização de pontas que geraram gotas mais finas, o que aumentou a velocidade de seu deslocamento. Os potenciais de redução de deriva observados foram geralmente inferiores aos valores encontrados na literatura revisada, porque os experimentos foram realizados em uma região plana de prado capinado, o que difere de uma cultura desenvolvida.

O importante efeito das condições meteorológicas sobre a quantidade de deriva concentrando-se na área de prado foi quantificado a partir dos modelos de deriva e de seus resultados de medições no campo (NUYTTENS et al., 2011).

Nuyttens, Zwertvaegher e Dekeyser (2017) desenvolveram um banco de testes para avaliar o risco de deriva gerado por pulverizadores de barra. O método baseia-se no princípio de que o potencial de deriva está diretamente ligado ao volume aplicado no início da pulverização e às partículas que permanecem suspensas no ar, depois que o pulverizador encerra sua atividade.

O potencial de deriva foi avaliado em 16 pulverizadores de barra, com diferentes técnicas desse banco de teste de mensuração de deriva, sob condições internas de um espaço de pulverização totalmente automatizado, além da presença de traçadores à base de quelato mineral. Os potenciais de redução de deriva constatados foram então comparados com os resultados de outros três métodos consagrados de avaliação de deriva (em campo, túnel de vento e analisador de partículas a laser (PDPA)). Os ensaios com o banco de testes para deriva confirmaram o que já se imaginava, ou seja, que os efeitos do tipo de bico, a pressão e a altura de trabalho interferem no potencial de deriva, no entanto nos mesmos ensaios o tamanho da ponta e a velocidade de aplicação não mostraram muito influência.

Embora o banco de testes de deriva tenha mostrado tendências semelhantes às de outros métodos de avaliação de deriva já divulgados, houve grandes variações, e até mesmo resultados contraditórios foram observados. Portanto, o banco de testes pode ser considerado uma alternativa possível para medir o potencial de deriva de pulverizadores de barra, porém estudos futuros devem se concentrar no sentido de se reduzir as fontes

de variação e avaliar se a metodologia é capaz de testar os efeitos do impacto da velocidade de aplicação na deriva.

3.2. Perdas por evaporação durante as pulverizações

Evaporação remete à passagem de moléculas atômicas do estado líquido para o estado gasoso, de forma gradual, o que, segundo Thompson e Ley (1983), pode ter influência sobre as gotas pulverizadas em temperaturas superiores a 30°C e umidade relativa abaixo de 40%, principalmente quando essas gotas estão finas. Na utilização de defensivos agrícolas, a evaporação, assim como a deriva, é comprovadamente um dos fatores que mais comprometem a eficiência de uma pulverização (HUITINK; WALKER; LAVY, 1990).

Com relação às condições meteorológicas, deve-se atentar principalmente para o déficit de pressão de vapor-d'água no ar (DPVar) e para a velocidade do vento no momento da pulverização (SALYANI; CROMWELL, 1992). Segundo esses autores, quanto maior o DPVar, maior a chance de ocorrer evaporação das gotas provenientes da aplicação, podendo haver eficiência da aplicação e, provavelmente, menos eficácia de controle.

Altas temperaturas na pré e na pós-pulverização aumentam a penetração de agrotóxicos através da cutícula da folha do vegetal, assim como aumentam a volatilização dos líquidos e podem aumentar a evaporação das gotas a um ponto de cessar a penetração do agrotóxico (HULL; DAVIS; STOLZENBERG, 1982; REED; HALL; RICK, 1992).

Em uma pulverização, as condições atmosféricas são um fator incontrolável, além de elas serem passíveis de constantes alterações, o que requer do aplicador ajustes em tempo real, com base na sua experiência e nas condições observadas (PICOT et al., 1993). Uma variável atmosférica que influencia a eficiência da pulverização é a inversão térmica. Segundo Salyani e Cromwell (1992), esse fenômeno ocorre quando há massas de ar com diferentes densidades ao longo da altitude, ou seja, existe um gradiente térmico do ar, formando uma camada de proteção, que deixa as gotas pulverizadas suspensas no ar, ficando mais suscetíveis à deriva e à evaporação. Thompson e Ley (1983) afirmaram que na aplicação de agrotóxicos a inversão é mais comum na pulverização aérea, pois a altura em relação ao solo onde ocorre a inversão geralmente se dá nas proximidades da altura de lançamento das gotas.

Apesar de se conhecer o efeito da inversão térmica durante a pulverização, observa-se a carência de trabalhos relacionados ao tema. Cuidados especiais durante a pulverização devem ser tomados, quando se realiza a pulverização sob uma condição de inversão térmica, em que as gotas permanecem mais tempo no ar, ficando propensas à ocorrência de deriva e de evaporação. Segundo Ozkan e Derksen (2016), não se deve pulverizar na ausência de vento, em razão do risco de ocorrência de inversão térmica e de corrente convectiva de ar, prejudiciais na deposição de pequenas gotas sobre o alvo.

O efeito das condições psicrométricas do ar na evaporação das gotas foi constatado por Xu et al. (2010). Os autores proporcionaram aos especialistas de pulverização uma ideia do comportamento da gota sobre a folha e, também, da evaporação que pode ocorrer no momento da aplicação. O efeito da pulverização que atinge o alvo é influenciado pelas condições climáticas locais, sendo assim há de se compreender fatores específicos regionais que afetam o movimento das gotas (MATTHEWS, 1992).

Vários estudos têm comparado aplicações em diferentes horários, e seus resultados indicam que a deposição do produto químico tem sido inferior ao que se esperava à medida que o déficit de pressão é aumentado (NASCIMENTO et al., 2012; ALVARENGA et al., 2013).

A evaporação pode ocorrer pela exposição da gota ao ar, ou quando a gota entra em contato com o solo nu. A instabilidade ou a estabilidade da atmosfera é o que condiciona as gotas a serem depositadas em seu alvo ou a permanecerem em suspensão na atmosfera, sofrendo deriva ou evaporação. Para ratificar tal fato, Tepper (2012), em um ensaio de campo, demonstrou que quando a gota pulverizada se aproxima do solo descoberto, a temperatura do ambiente aumenta gradativamente e o potencial de evaporação das gotas passa a ser elevado.

Para exemplificar essas condições, Sasaki (2014) relatou que a aplicação fitossanitária, quando feita em altas temperaturas e em baixa umidade relativa, pode acarretar a evaporação da gota e a perda de produto para o meio ambiente, causando contaminação atmosférica. Para avaliar o efeito das condições ambientais do ar, o autor desenvolveu e analisou diferentes sistemas de resfriamento adiabáticos na pulverização de agrotóxicos, visando reduzir perdas por evaporação.

Todo o experimento foi realizado a partir do desenvolvimento de um protótipo composto pela junção de um ventilador axial e um homogeneizador de fluxo, sensores de umidade relativa e temperatura, ponta hidráulica e um sistema de aquecimento de ar

a gás. Uma vez montado o sistema, foi integrado a ele um equipamento de precisão, o analisador de partículas a laser da Malvern Spraytec Instruments Ltd., para avaliar as características da ponta e gerar seu espectro de gotas. A ponta utilizada foi a JSF 11002 e os parâmetros avaliados foram $Dv\ 0,1$, $Dv\ 0,5$, $Dv\ 0,9$, Span e o espectro da população de gotas.

Sasaki (2014) avaliou quatro sistemas de resfriamento evaporativo: nebulizadores de baixa pressão; um sistema de nebulização intermitente dotado de pontas de baixa pressão; placas de celulose; e nebulizadores de alta pressão. Cada sistema foi testado para quatro condições ambientais do ar. As diferentes condições ambientais do ar proporcionaram perdas por evaporação durante as pulverizações. Com a ponta JSF 11002, houve redução no diâmetro das gotas na ordem de 0,0759, 0,518 e 1,514 μm , para as variáveis de $Dv\ 0,1$, DMV e $Dv\ 0,9$, respectivamente.

O melhor sistema de resfriamento adiabático foram os nebulizadores de alta pressão, porque proporcionaram redução do DPV de até 1,97 kPa, não apresentaram problemas quanto ao escorrimento de líquido e quedas na velocidade do ar, além de terem reduzido as perdas por evaporação (SASAKI, 2014).

Na mesma linha, Maciel (2016) avaliou a interferência das condições ambientais compreendidas pelos déficits de pressão de vapor (DPV) de 0,5; 0,94; 2,0; 3,06; e 3,5 kPa e velocidades do ar de 2; 3,6; 7,4; 11,2; e 12,8 km h^{-1} . O vento favorece as maiores perdas por evaporação, apesar do DPV ser a variável mais importante nesse processo físico.

Assim, devem-se buscar horários do dia com condições meteorológicas mais adequadas, com valores baixos de DPV, para reduzir ao máximo as perdas durante o percurso ponta-alvo.

O déficit de pressão de vapor nada mais é que a diferença entre a pressão parcial de vapor-d'água e a pressão de saturação do vapor-d'água. Em outras palavras, é a pressão exercida pela quantidade de vapor-d'água existente no ar e a pressão máxima que pode ser exercida pelo mesmo vapor, nas mesmas condições ambientais. Cada combinação de temperatura e umidade relativa ocorre a uma determinada pressão de vapor (BISCARO, 2007), porém, quanto maior a temperatura, maior a sua pressão de vapor saturado, ou seja, mais água o ar pode conter. A umidade relativa é o fator que menos interfere no déficit de pressão de vapor-d'água.

A umidade relativa do ar é um fator atmosférico que expressa a relação entre a umidade absoluta e o ponto de saturação, ou seja, é a relação da quantidade de água

existente no ar e da quantidade máxima que esse mesmo ar consegue reter de água. Fisicamente, o fenômeno da evaporação ocorre quando as moléculas de um líquido vencem a força de atração entre si e escapam de uma lâmina-d'água, passando à forma de vapor (VILLALBA; HETZ, 2010). A umidade relativa é um termo frequentemente utilizado na divulgação de previsões meteorológicas, além de ser um indicador das condições temporais de um local.

Essa umidade presente no ar, que é uma mistura de vários gases, é decorrente de uma das fases do ciclo hidrológico, que é o processo de evaporação da água. Portanto, quando se diz que a umidade relativa do ar é de 60%, significa que o ar está com 60% da sua capacidade máxima de água. Abaixo desse ponto de saturação, há o ponto de orvalho, que é quando a umidade se acumula sob a forma de gotículas ou neblina. Acima desse ponto de saturação, há o ponto de precipitação, que é quando se acumula na forma de chuvas.

Os adjuvantes são uma alternativa moderna que comprovadamente reduzem o índice de deriva e a evaporação em aplicações de fitossanitários. Com a alteração dos adjuvantes em uma mesma ponta, é possível analisar vários níveis de deriva e de evaporação, uma vez que esse fato ocorre devido à alteração das propriedades físico-químicas das caldas promovidas pelos adjuvantes (MATTHEWS, 1992). Algumas pesquisas têm sido realizadas com a adição de adjuvantes à calda, entretanto ainda não se sabe o comportamento da gota ao adicionar esses componentes químicos à calda. A maioria dos adjuvantes tem sido lançada no mercado com a finalidade de reduzir a deriva e as perdas por evaporação e de melhorar a cobertura do alvo (XU et al., 2011). Contudo, com a adição de surfactantes à calda, o líquido, ao cair na folha, dissolve e rompe as estruturas cuticulares hidrofóbicas, resultando em espalhamento da gota.

Atualmente são utilizados alguns modelos matemáticos para os estudos com deriva e evaporação, sendo essa técnica conhecida como *modelagem de deriva*, que também aponta índices de evaporação. Essas modelagens são baseadas na metodologia de Laplace, que interliga duas variáveis através de um eixo x e y, em função de um delta adaptado. Uma variação desse tipo de modelagem foi o random-walk (1989), que deu suporte para posteriores modelos na mesma linha de trabalho: o IDEFICS (*IMAG program for drift evaluation from field sprayers by computer simulation*) de 1997 e o AgDrift de 2004.

Uma importante ferramenta para o estudo da quantificação de deriva e de evaporação, ou do potencial risco de ambas, é o túnel de vento, que simula as condições

de vento observadas em campo, permitindo, assim, selecionar e desenvolver técnicas de aplicação, como pontas de pulverização, adjuvantes e simulação de boas condições meteorológicas, que reduzem o impacto ambiental e econômico causado pela perda de agrotóxicos (DERKSEN et al., 1999; PHILLIPS; MILLER, 1999).

3.3. Pontas hidráulicas usadas na pulverização

O sucesso de uma aplicação de agrotóxicos está relacionado à seleção das pontas de pulverização, ao ajuste do volume de calda, aos parâmetros operacionais, às condições ambientais favoráveis e ao momento correto da aplicação, devendo-se sempre levar em consideração as recomendações agronômicas de cada produto (HOFFMANN et al., 2010). O uso de pontas de indução de ar é um método comumente empregado como estratégia para redução de deriva na aplicação de produtos sistêmicos (MOTA; ANTUNIASSI, 2013).

Vários pesquisadores consideram que gotas menores que 100 μm são facilmente carregadas pelo vento, sofrendo mais intensamente a ação dos fenômenos climáticos (CHECHETTO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013). De acordo com Justino, Martins e Lomba (2015), gotas com diâmetro acima de 500 μm têm pouco problema de deriva e de evaporação.

O conhecimento das características de trabalho das pontas de pulverização é importante, pois determina a condição ótima de trabalho, aumentando assim a eficiência da pulverização (GIL et al., 2014). O tipo de bico, a vazão nominal, o tamanho das gotas, o ângulo de descarga, a pressão de operação e as características do líquido de aplicação são fatores que determinam o espectro da população de gotas. Segundo Van de Zande et al. (2010), gotas pequenas, que não têm incidência no dossel das culturas, deslocam-se a grandes distâncias na atmosfera pela corrente de ar, devido ao seu tamanho reduzido. Esse é também um dos principais motivos de contaminação ambiental.

Nuyttens et al. (2010) compararam os riscos de deriva produzidos por dez diferentes tipos de ponta, utilizando três métodos de avaliação: dois indiretos, representados por um túnel de vento e por um analisador de partículas a laser, e outro direto, realizado em condições naturais de campo. O tamanho da ponta foi baseado nas normas ISO 5682/1 e ISO 10625, e os tipos de bico foram leque plano padrão (*standart*

flat-fan), leque de impacto com pré-orifício plano (*pre-orifice flat-fan*) e leque com indução de ar (*air-induction*).

Os autores testaram as características de gotas e o potencial de deriva para que essas pontas fossem estudadas. Eles compararam os resultados das medições dos riscos indiretos (*indirect drift risk assessment*) e diretos de deriva (*direct risk assessment*), a fim de avaliar o seu potencial e prever as perdas que ocorrem devido à dispersão dos agrotóxicos a partir de pulverizações.

No total, foram 46 experimentos em túnel de vento e 61 experimentos de campo, realizados com 10 diferentes tipos de bicos de pulverização, a uma pressão de 300 kPa, e um bico ou lança com altura de 0,50 m e velocidade de 8 km h⁻¹. Os resultados demonstraram que, com as avaliações de risco de deriva indireta (túnel de vento e com medição do laser PDPA), os experimentos podem ser realizados com diferentes sistemas de pulverização, em condições diretamente comparáveis e repetíveis, e que ambos os métodos são adequados para avaliações de riscos relativos à deriva.

Para os mesmos tamanhos de ponta, as pontas leque com indução de ar têm os maiores valores de *Drift Reduction Potencial Field* (DPRP), que é o potencial de redução de deriva com base na medição dos desvios de até 20 m das zonas pulverizadas, e *Drift Reduction Pontecial Wind Tunnel* (DPRT), que é o potencial de redução de deriva com base em medições no túnel de vento, seguidas, respectivamente, pelas pontas leque de impacto com pré-orifício plano e pelas pontas leque plano padrão. Para o padrão e os bicos de leque plano que seguem as normas ISO, os valores de deriva foram altos, e no caso dos bicos com pré-orifício, os valores de DPRT e DPRP foram mais elevados.

Ao comparar os resultados do laser PDPA e as medições em túnel de vento, pode-se concluir que o método de avaliação de risco de deriva indireta mais adequado para representar as avaliações de características mais próximas às de campo foi o de túnel de vento. Já as medições feitas a laser somente servem para estimar o efeito dos tipos de ponta, o tamanho e a pressão. Os valores de DPRP e DRPT aumentam com os valores do diâmetro das gotas, e as características de velocidade das mesmas gotas crescem ou diminuem com o aumento da porcentagem de gotas de menor tamanho, sendo esse o melhor indicador para se estabelecer a quantidade de deriva proveniente de pulverização no campo.

Fritz et al. (2011) relataram que uma das formas mais eficientes de reduzir a deriva nas aplicações é a escolha correta de pontas de pulverização e pressão de trabalho, além da escolha correta de equipamentos de aplicação e adjuvantes de calda.

Ferguson et al. (2015) avaliaram algumas pontas referentes a seis marcas diferentes, para verificação da redução de deriva. Elas foram comparadas para as distribuições de tamanho de gotas, mediante o uso de três líquidos com diferentes tensões superficiais dinâmicas, em um túnel de vento da Universidade de Queensland, na Austrália. Os resultados demonstraram que alguns tipos de pontas são consistentes e apresentam resultados similares entre si, enquanto outros não. Os autores observaram também que algumas pontas são relativamente pouco afetadas pelo tipo de líquido a ser pulverizado, porém outras resultaram em mudança de tamanho das gotas de menor tamanho do DMV.

As pontas foram comparadas em três diferentes líquidos: água pura; herbicida graminicida da *Syngenta*, conhecido como pinoxadene; e outro herbicida denominado cloriparalid, com óleo mineral. Em cada tratamento foi aplicada uma pressão de 300 kPa. As pontas foram testadas no laboratório CPAS, sendo a velocidade do vento no estudo de 8 m s^{-1} .

Os tratamentos foram analisados por meio de um instrumento de difração de laser (Sympatec Helos Sympatec Inc.), para medir o tamanho das gotas e comparar cada tipo de bico por tratamento (FERGUSON et al., 2015). As caldas para pulverizações foram mantidas a 23 e 25°C. A calda contendo pinoxadene e cloriparalid com óleo mineral apresentou os menores desvios-padrão e CV em tipos de ponta. As pontas classificadas como uniformes tiveram CV igual ou inferior a 4%. Os efeitos da calda de pulverização foram aparentes em alguns casos, em que uma mudança na solução afetou o tamanho de gota em até $\pm 40 \text{ mm}$.

Os resultados encontrados por Ferguson et al. (2015) destacaram e corroboraram estudos anteriores, que mostram como o tipo de ponta pode influenciar o comportamento do líquido de acordo com as propriedades físico-químicas inerentes a cada produto.

Em estudo com outra classificação de pontas de pulverização, Torrent et al. (2017) avaliaram e compararam o potencial de deriva na pulverização e a capacidade do agrotóxico de se desviar do alvo em pomares de citros. Para isso, utilizaram bicos-padrão e bicos antideriva. Dois diferentes bicos-padrão de cone vazio (*hollow cone*) e cone cheio (*full cone*) e um bocal redutor antideriva (cone vazio) foram testados. O

potencial de deriva na pulverização foi medido por meio de um experimento com túnel de vento (método ISO 22856: 2008). Para estimar o índice de deriva proveniente da pulverização no campo, foram realizados dois ensaios, com cinco repetições cada (método ISO 22866: 2005), em dois pomares comerciais diferentes de tangerinas clementinas.

Os resultados mostraram que os bicos venturi reduziram significativamente a deriva, em ambas as metodologias. Além disso, o método do túnel de vento mostrou a mesma tendência que os resultados de campo. Com relação à deposição da deriva oriunda da pulverização, a variabilidade foi menor para os bicos venturi. Portanto, conclui-se que os bicos venturi podem ser recomendados para uso em pomares de citros, para prevenir contaminação humana e riscos ambientais, e que seu uso pode ser estendido de maneira apropriada para diferentes cenários em que o risco de deriva seja mitigado.

3.4. Tecnologia de aplicação

A tecnologia de aplicação, mais do que escolher aleatoriamente um artifício e aplicar determinado produto para controlar certo alvo, é, sim, a interação entre vários fatores biológicos, químicos e físicos, quando se busca um controle eficiente, com baixo custo e mínima contaminação ambiental (MATTHEWS, 2000). Por isso, o termo tecnologia de aplicação vem cada vez mais sendo substituído por engenharia de aplicação, porque envolve um conhecimento multidisciplinar para o controle dos mais variados agentes fitossanitários.

Para Durigan (1989) e Matuo (1990), a tecnologia de aplicação consiste no emprego de todos os conhecimentos científicos para que seja feita a colocação do produto biologicamente ativo no alvo, na quantidade necessária e de forma economicamente viável, com o mínimo possível de contaminação ambiental.

Dentre os fatores que fazem parte do processo de engenharia de aplicação está a escolha do equipamento certo no momento de pulverização. Sua escolha é dependente do alvo a ser controlado, das condições ambientais e do tipo de produto a ser utilizado. Por isso existem no mercado diversos tipos de pulverizadores.

Ainda com relação à escolha do equipamento correto a ser utilizado em função do quê, de quando e de como se pretende controlar um alvo, Guazzelli (2018) testou um

pulverizador pneumático em uma lavoura de tomateiro, planta muito suscetível ao ataque de patógenos, a fim de verificar a eficiência de suas aplicações.

Variando a velocidade do ar e o fluxo de líquido, o autor determinou a velocidade mínima do ar para fragmentar o líquido em gotas, e observou que quanto maior o fluxo de ar, menor o tamanho das gotas, e que quanto maior o fluxo de líquido, maior o tamanho médio das gotas. A uniformidade de distribuição de líquido foi analisada mediante o uso do coeficiente de variação (%), sendo observado que a citada uniformidade variou de 28,40 a 63,89%.

O espectro de gotas foi caracterizado com o uso de um analisador de partículas a laser, tendo o espectro apresentado 75,10 a 47,05% de gotas menores que 100 μm . Para avaliação da qualidade da pulverização, Guazzelli (2018) utilizou etiquetas de papel hidrossensível para determinar a porcentagem de área coberta (%) e a densidade de gotas (gotas cm^{-2}). A densidade de gotas variou de 77,22 a 429,78 gotas cm^{-2} para os terços e as profundidades do tomateiro.

Além dos diferentes modelos de equipamentos disponíveis no mercado, Carvalho et al. (2013) também ressaltou os estudos sobre as taxas de aplicação e coberturas dos alvos, as pontas e os equipamentos de pulverização e os adjuvantes de caldas como tecnologias integrativas da engenharia de pulverização de defensivos agrícolas.

Para estudar a relação entre a característica física da calda e o espectro de gotas formadas com o uso de adjuvantes, Santiago (2011) montou um ensaio constituído de três adjuvantes, três intervalos de temperatura e quatro concentrações de cada um dos três adjuvantes, mais um controle (água) em DIC, com três repetições para cada teste. Em relação à característica física da calda, o autor avaliou o comportamento dos adjuvantes adicionados a ela, mediante a análise da tensão superficial e da viscosidade do líquido.

Os ensaios demonstraram diferenças no espectro de gotas para cada condição, devido à alteração das características físicas da calda estudadas. Para analisar o espectro de gotas, e outros parâmetros que avaliam a pulverização, o autor montou um sistema de pulverização aérea utilizando um ventilador radial, e sua quantificação foi feita com o auxílio de um analisador de partículas a laser *Spraytec*. Os resultados indicaram que a tensão superficial e a viscosidade do líquido foram alteradas com a presença do adjuvante, principalmente com o aumento da concentração.

Por fim, cabe ressaltar que a pulverização aérea na agricultura é, atualmente, um pilar e um dos símbolos da tecnologia de aplicação, que segundo Bueno (2011), permite o uso de baixas taxas de aplicação nas lavouras das propriedades, além de aumentar seu rendimento operacional.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado nas instalações do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV) – campus Viçosa, situado na cidade de Viçosa, MG (altitude: 648, 74 m; latitude: 20°45'14"S; longitude: 42°52'53"W; coordenadas UTM (m): 7.703.630 N e 720.570 E). De acordo com a classificação de Koeppen (1948), o clima de Viçosa é do tipo Cwa, ou seja, mesotérmico (clima temperado quente), com verões chuvosos e invernos secos, e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C.

4.1. Confeção e desenvolvimento do túnel de vento

Para avaliar e quantificar as perdas por deriva, assim como para a coleta do espectro de gotas, foi construído um túnel de vento (Figura 1), com o objetivo de evitar que as condições ambientais internas fossem alteradas pelas condições ambientais externas no momento da pulverização. Posto de outro modo, o objetivo do túnel de vento foi possibilitar que as trocas de temperatura e umidade relativa com as gotas geradas pelo pulverizador somente ocorressem quando o ventilador fosse acionado. Portanto, as condições dentro do túnel de vento foram basicamente os DPV_{Sar} (ou DPVs) gerados pela câmara de combustão no momento da pulverização.



Figura 1 – Estrutura metálica do túnel de vento.

O túnel de vento foi construído com 7,0 m de comprimento, 1,7 m de largura e 1,5 m de altura, utilizando estruturas de perfil do tipo cantoneiras. As laterais, assim como as partes inferior e superior, foram revestidas com chapas de aço galvanizado (Figura 2). Após o revestimento, toda a parte externa da câmara foi coberta com placas de isopor, para conferir um isolamento térmico dentro do túnel.

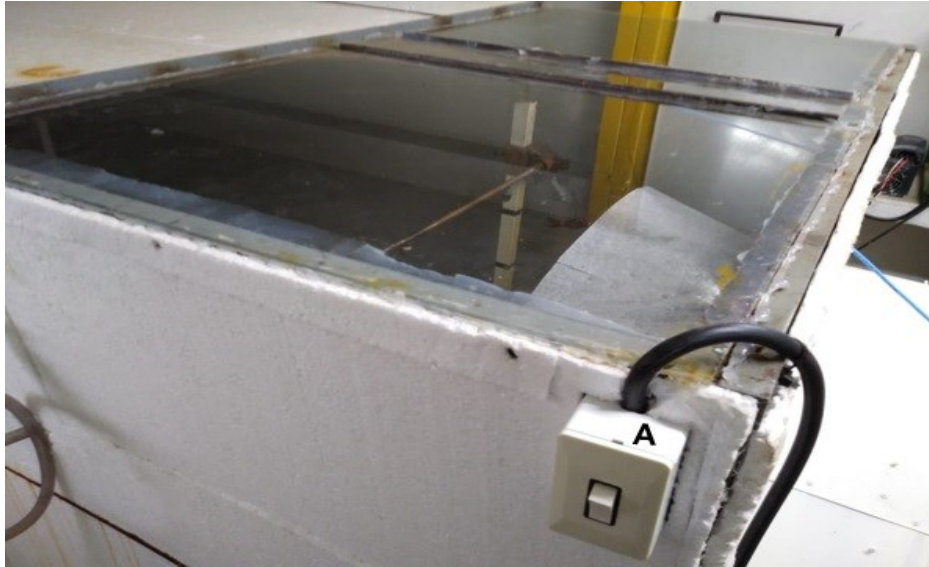


Figura 2 – Montagem do túnel de vento.

As dimensões selecionadas para este experimento foram as mesmas utilizadas por Nuyttens et al. (2009), com exceção da altura. Neste ensaio foi utilizado 1,5 m, enquanto Nuyttens e seus colaboradores utilizaram o dobro da altura, ou seja, 3,0 m.

A parte superior do túnel foi coberta, nos seus primeiros 0,8 m, com placas de vidro (Figura 3), com a finalidade de permitir a ampliação visual do interior da unidade experimental e, especialmente, observar as condições do sistema de pulverização em funcionamento.

O túnel de vento (Figura 4) é composto dos seguintes componentes: um sistema de ventilação constituído por um ventilador axial, uma câmara de aquecimento e um homogeneizador de ar.



(A) Botão de acionamento do sistema de pulverização.

Figura 3 – Parte superior frontal do túnel de vento, fechada com vidro.

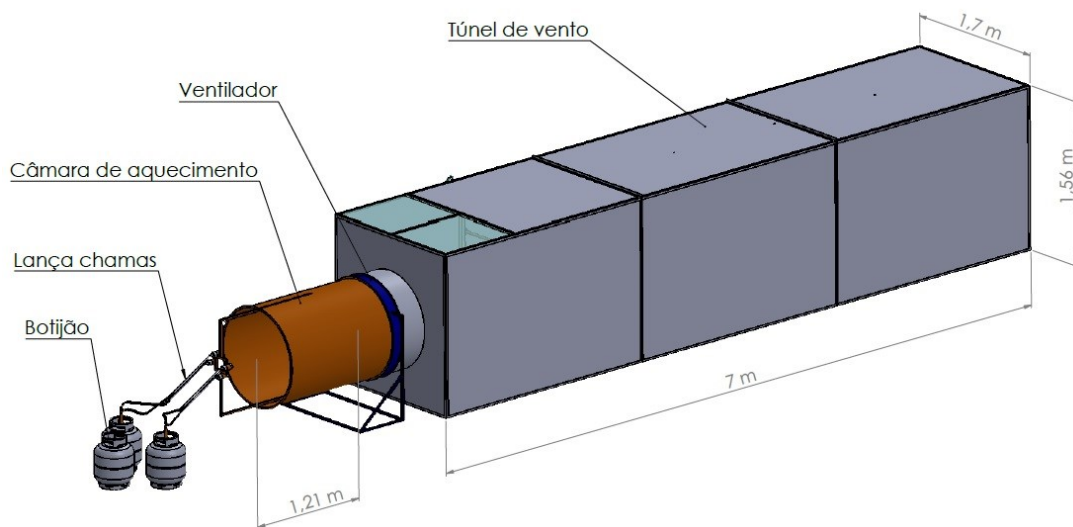


Figura 4 – Túnel de vento em vista isométrica e seus acessórios.

Uma vez construído o túnel de vento, criou-se uma saída para o fluxo de ar proveniente do sistema de ventilação no final do túnel. Essa saída, com 1,7 m de largura e 1,5 m de altura, é idêntica à do próprio túnel de vento (Figura 5). A porta no final do túnel de vento permaneceu aberta durante toda a coleta de dados. Sua função era, exclusivamente, conferir maior proteção às ferramentas e aos acessórios presentes em seu interior.



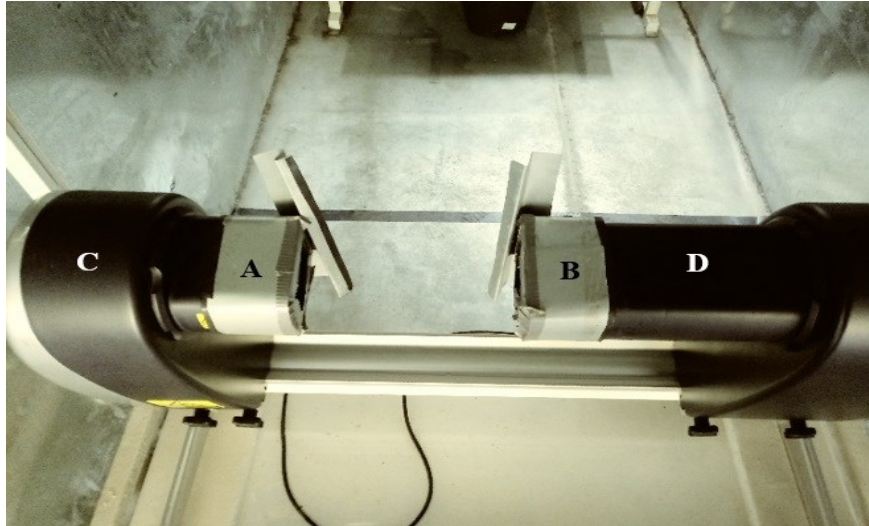
Figura 5 – Vista do túnel de vento para saída do ar durante a pulverização.

4.2. Equipamentos e instrumentação do sistema de coleta de dados

O analisador de partículas a laser (*Spraytec, Malvern Instruments Ltd.*) utilizado para mensurar o espectro de gotas produzidas pelas pontas hidráulicas de pulverização apresenta lentes focais de 0,75 m (Figura 6). Ele foi colocado em seis posições diferentes dentro do túnel de vento, tendo como referência a barra de pulverização contendo as pontas hidráulicas. As distâncias foram de 0,8; 1,9; 3,0; 4,1; 5,2; e 6,3 m, havendo uma equidistância entre os pontos, com exceção do primeiro ponto, cuja diferença para a ponta hidráulica de pulverização foi de 0,80 m.

O equipamento permite fazer a medição das distribuições das partículas e/ou gotas, que variam de milímetros a nanômetros. Esse sistema de difração a laser identifica e lê as gotas e/ou partículas com base na Teoria da Difusão de Mie. Essa teoria estabelece que, por meio da variação angular na intensidade da luz difundida, é possível identificar a interação do feixe laser com as gotas ou partículas dispersas na amostra.

Ele foi projetado para lidar com a caracterização de partículas e gotas, mensurando dados e reproduzindo-os numericamente, descrevendo o que acontece com as gotas pulverizadas. Esse analisador de partículas faz medições em uma ampla faixa, de 0,5 até 2.000 micras. A aquisição de dados é realizada em alta velocidade e sua medição é em tempo real, de até 2.500 Hz, podendo obter 10.000 leituras por segundo.



Lentes focais (A e B); torre receptora de dados (C); e torre emissora de dados (D).

Figura 6 – Vista superior do analisador de partículas a laser.

A principal função do analisador de partículas a laser é identificar o espectro de gotas e avaliar o comportamento das gotas de pulverização, conforme a distância percorrida, de acordo com a velocidade de vento e a variação do DPV_{ar} (ou DPV).

Como mencionado, o túnel possui 7 metros de comprimento, portanto foi possível dispor o analisador de partículas a laser em seis diferentes posições distantes da barra de pulverização e, conseqüentemente, do bico hidráulico, espaçadas entre si em 1,1 m na parte inferior do interior do túnel de vento.

Sensores de temperatura e umidade relativa do ar foram utilizados para determinação do déficit de pressão de vapor-d'água no ar. Os sensores usados no experimento foram os HMP60 Vaisala (Figura 6), próprios para atividades em que é necessário determinar a umidade relativa do ar e a temperatura de maneiras independentes. Foram utilizados três sensores HMP60 Vaisala, cada um em um ponto específico do túnel de vento.

Os sensores conjugados de temperatura e umidade relativa do ar foram conectados a um módulo de aquisição de dados (modelo I-7018Z-G/S, CR). O módulo possui dez canais de entradas analógicas de tensão com interface RS-485, além de configuração individual dos canais de medição.

O módulo realizou a conversão dos sinais analógicos dos sensores em valores decimais, utilizando uma placa com resolução de 16 bits. Os dados de temperatura e

umidade relativa do ar foram gerados no disco rígido do computador, por meio do programa SISDAUT.

A tomada de decisão com relação ao posicionamento adequado dos sensores dentro do túnel de vento foi realizada com base em uma pulverização prévia, com a velocidade de vento de 10 km h^{-1} , durante 10 minutos, para verificar a distância-limite alcançada pelas gotas pulverizadas. Adicionalmente, os três sensores HMP60, distribuídos ao longo do túnel, foram protegidos do contato das gotículas provenientes das pulverizações por uma estrutura de acrílico e envolvidos por um tecido de malha poroso.

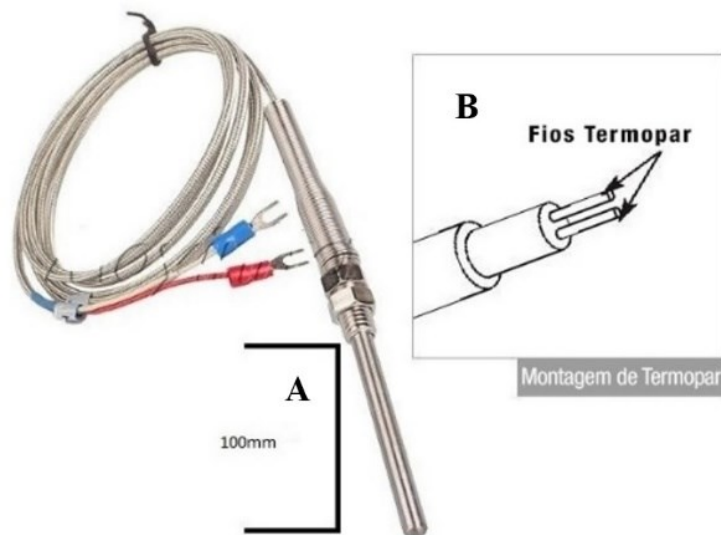
Uma vez verificada a distância apropriada, os sensores foram instalados, como descrito a seguir: o primeiro nas proximidades do sistema de pulverização, localizado a 0,75 m da entrada do túnel de vento; o segundo a 1,70 m de distância do primeiro sensor; e o último a 1,70 m de distância do segundo sensor. Os três sensores realizaram medições simultâneas, para obtenção das condições psicrométricas do ar ao longo do túnel de vento.

Um termopar do tipo K (Figura 7) foi instalado no início do sistema de aquecimento, com a finalidade de verificar a temperatura de entrada no início do túnel de vento. Em outras palavras, o termopar (Figura 8), que é uma liga metálica combinada na sua composição, mede a temperatura do ar gerada pelos lança-chamas dentro da câmara de combustão, que posteriormente entraria no túnel de vento.



Fonte: Vaisala (2016).

Figura 7 – Sensor de umidade relativa e temperatura Vaisala.



Fonte: Salcas (2015).

Figura 8 – Termopar do tipo K (A) e fios de medição (B).

A pulverização foi realizada somente após os três sensores dentro do túnel de vento estarem em ponto de equilíbrio, ou seja, de maneira estável e homogênea. O termopar mede a temperatura de saída, e os sensores Vaisala permitem avaliar a estabilidade para as condições psicrométricas do ar dentro do túnel de vento.

Os intervalos de medição dos sensores de psicrometria HMP60 é de -40 a 60°C, para temperatura, e de 0 a 100% para umidade relativa. Já o termopar K permite a medição de temperatura entre -100 e 1.300°C.

Um programa computacional foi desenvolvido para a aquisição de dados (Figura 9) dos sensores HMP60 e termopar do tipo K, sendo necessários seis canais de leitura. O programa foi implementado a partir da plataforma de programação C++ Builder versão 5.0. Após o término do desenvolvimento, o programa foi denominado SISDAUT. O SISDAUT pode ser executado em desktop e em notebook.

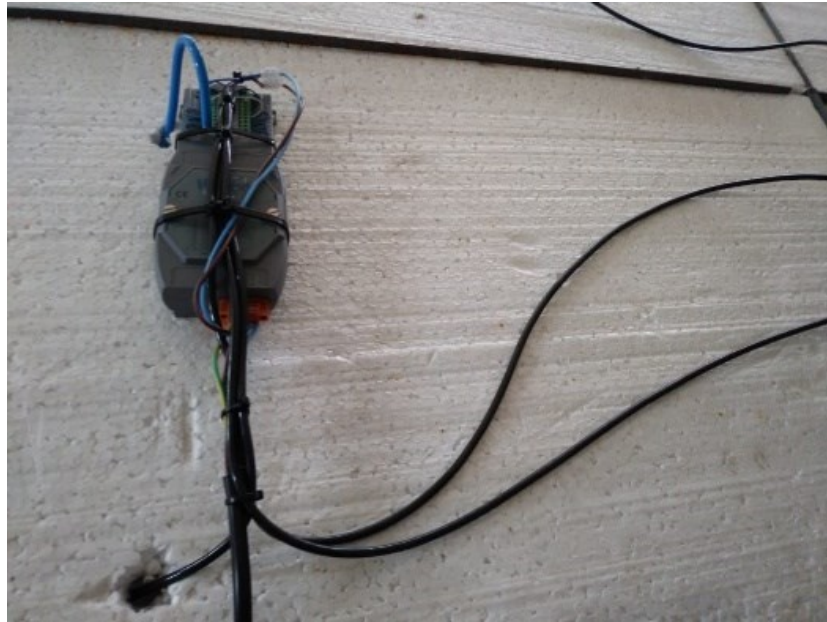


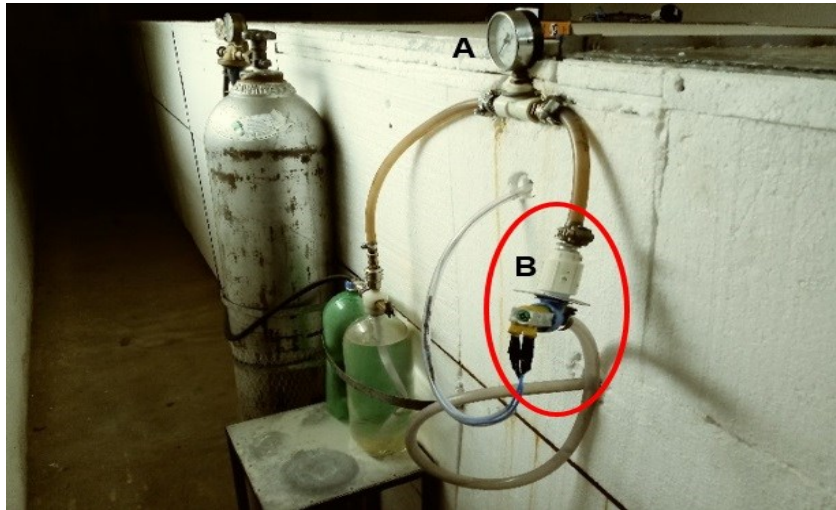
Figura 9 – Sistema de aquisição de dados fixado na parte superior do túnel de vento.

4.3. Sistema de pulverização e aquecimento e instalação do sistema de aquisição de dados

O pulverizador pressurizado acoplado ao cilindro de CO₂ (Figuras 10 e 11) é o mais utilizado em experimentos para a determinação da eficiência e das dosagens do produto comercial (NUYTTENS; ZWERTVAEGHER; DEKEYSER, 2017).

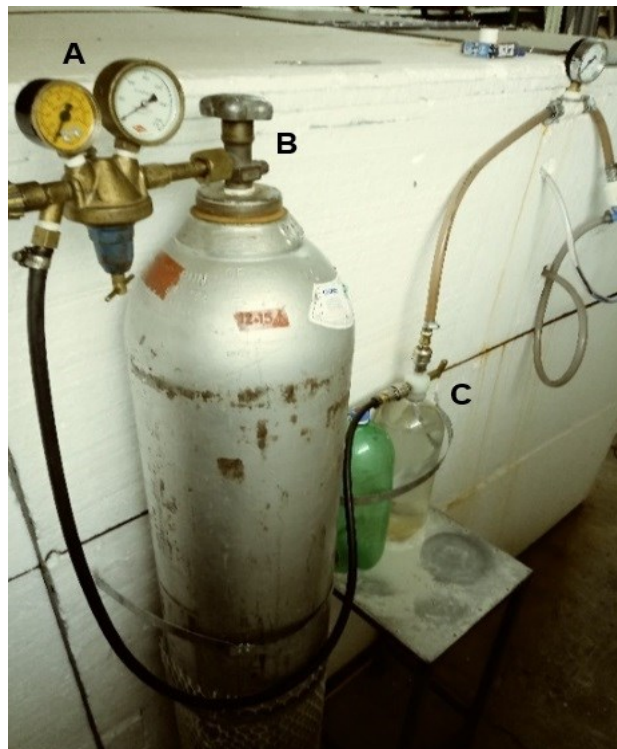
O cilindro de CO₂ utilizado apresentava capacidade volumétrica de aproximadamente 32 litros. Para regular a pressão de saída para o sistema, o cilindro possui uma válvula reguladora de pressão de CO₂, de modo a evitar a oscilação da pressão no sistema de pulverização. Essa válvula ajuda a garantir que a pressão de chegada nas pontas de pulverização seja exatamente a pressão escolhida para o trabalho, neste caso a pressão nominal de 300 kPa.

Além disso, uma válvula solenoide foi incorporada ao sistema de pulverização, para que, uma vez acionado o sistema de pulverização, ela abrisse, fechasse e regulasse a vazão de líquido durante a aplicação.



(A) manômetro; e (B) válvula solenoide.

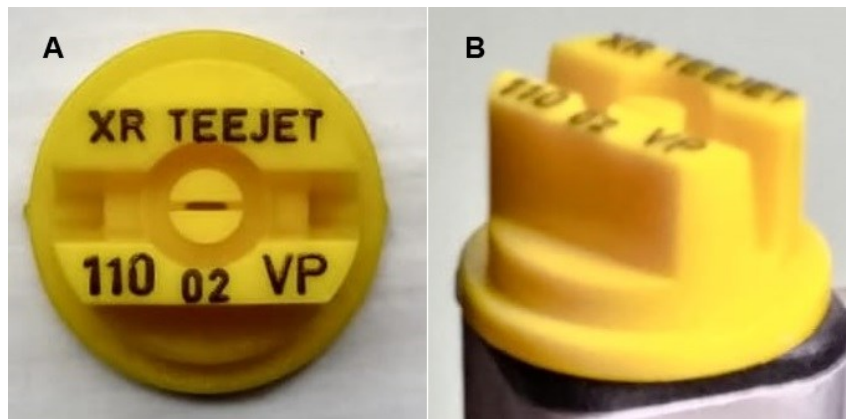
Figura 10 – Sistema de pulverização.



(A) manômetro; (B) válvula reguladora de pressão; e (C) garrafas PET utilizadas como reservatórios de água.

Figura 11 – Cilindro de CO₂.

A ponta hidráulica utilizada no experimento foi a XR 110-02 (Figura 12), em duas perspectivas do modelo leque simples, sendo o polímero o material de sua estrutura, um plástico de alta durabilidade, portanto muito resistente ao desgaste do uso cotidiano. A citada ponta é da cor amarela, trabalha bem com pressões de 100 a 400 kPa e possui vazão nominal de $0,79 \text{ L min}^{-1}$.



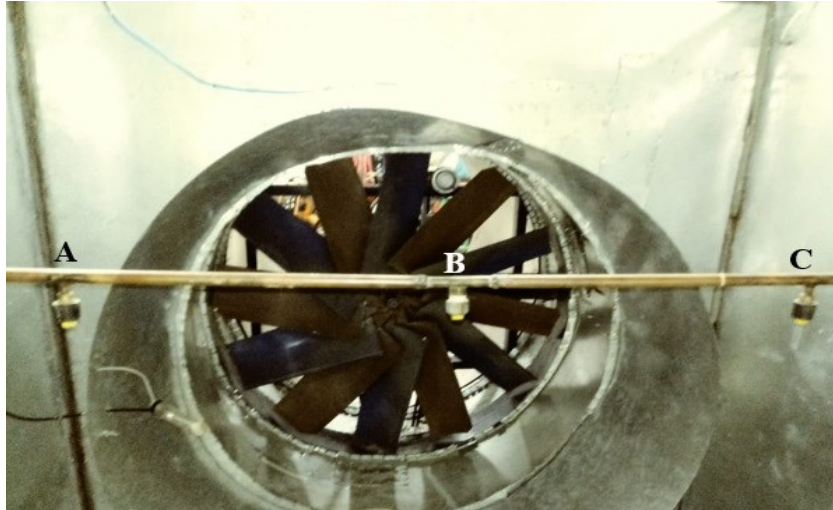
(A) vista superior da ponta; e (B) vista em perspectiva da ponta.

Figura 12 – Ponta XR utilizada para a pulverização dentro do túnel de vento.

Essa ponta apresenta excelente distribuição e trabalha bem com pressões de 1,0 a 4 bar. Ela reduz a deriva quando trabalha com pressões inferiores a 2 bar e produz gotas finas quando fragmenta líquidos nas pressões de 1,5 a 4 bar e gotas médias quando fragmenta líquidos na pressão de 1,0 bar.

A escolha da ponta de modelo XR teve o intuito de gerar o máximo possível de deriva dentro do túnel de vento, quando a simulação de velocidade do ar fosse superior à recomendada para uma pulverização ideal, além do fato de ser uma ponta hidráulica muito utilizada em outros experimentos envolvendo deriva, o que permite um maior número de comparação com outros resultados já obtidos.

No experimento, foram utilizados três bicos na barra de pulverização (Figura 13). O suporte da barra de pulverização tinha 1,60 m de comprimento, com os bicos espaçados entre si em 0,5 m. O bico hidráulico central da barra de pulverização foi fixado exatamente a 0,50 m de distância do homogeneizador de fluxo na saída do ventilador. Foi fixado também a 0,50 m de altura, acima do feixe onde passa o laser do analisador de partículas. Os três bicos foram operados sob a pressão de trabalho de 300 kPa (3 bar).



(A e C) barra de pulverização dentro do túnel de vento; e (B) bico hidráulico disposto ao longo da barra de pulverização.

Figura 13 – Parte interna do sistema de pulverização.

Um manômetro foi instalado para controlar a pressão do líquido nas três pontas. Esse manômetro se conecta a uma mangueira ligada à barra de pulverização, posicionada na parte interna do túnel de vento. Na parte externa do túnel, havia um segundo manômetro, próximo ao reservatório de líquido e ao cilindro de CO₂. Ambos os manômetros eram interligados por uma mangueira de 1/2" e serviam para controlar a pressão de trabalho.

As extremidades da barra de pulverização foram soldadas diretamente no túnel de vento, para conferir maior estabilidade à mangueira, ao manômetro e ao próprio jorro no momento da pulverização. O bico do centro da barra de pulverização foi o ponto de referência no posicionamento do analisador de partículas a laser, portanto o feixe do laser estava sempre paralelo a esse bico.

O sistema de aquecimento a gás foi acoplado à entrada do túnel de vento. A tubulação foi construída com chapas de aço de carbono de 3/4", que são mais resistentes e possuem espessura mais robusta, de modo a suportar altas temperaturas sem sofrer deformação. A chapa foi cortada no tamanho de 1,0 m de comprimento e 0,94 m de largura e depois soldada, de modo a ser uma peça circular, com o formato de um tubo (Figura 14).



Figura 14 – Sistema de aquecimento conectado ao túnel de vento, com sensor do tipo termopar do tipo K fixado.

Nesse tubo, foram soldadas peças em suas extremidades para suporte dos lança-chamas, que seriam utilizados como aquecedores da unidade operacional (Figura 15). O sensor termopar do tipo K foi colocado dentro desse tubo, para controlar a temperatura gerada pelos lança-chamas no momento na estabilização da câmara e, conseqüentemente, no momento da pulverização.



Figura 15 – Lança-chamas para o aquecimento do ar no interior do túnel de vento.

4.4. Mensuração das variáveis climatológicas

O ventilador axial, acoplado à câmara de combustão e ao túnel de vento, tinha 0,94 m de diâmetro e era constituído por um rotor de oito pás. O ventilador foi acionado por um motor trifásico de 4,93 hp, de dois polos, ligado a uma tensão de 220 V, que foi alimentado por um inversor de frequência para alterar, sempre que necessário, a rotação do ventilador. Assim, com o intuito de determinar as velocidades, foi conectado ao inversor de frequências um cabo transmissor ligado ao termoanemômetro ÔMEGA FMA 1000 (Figura 16), que registrava as velocidades do ar, na saída do ventilador, em tempo real (Figura 17).

O sensor utilizado foi o ÔMEGA, modelo FMA 1001 R-V1, série 1000, de cinco canais de saídas analógicas. O intervalo de medição do sensor ÔMEGA FMA 1000 é de -40 a 121°C, para temperatura, e de 0 a 5,08 m s⁻¹, para velocidade do ar. Com isso, foi possível o registro da velocidade do ar, assim como a frequência foi marcada no inversor no momento da conferência pré e pós-pulverização.



Figura 16 – Display do sensor de velocidade e da temperatura ÔMEGA FM 1000 preso ao túnel.

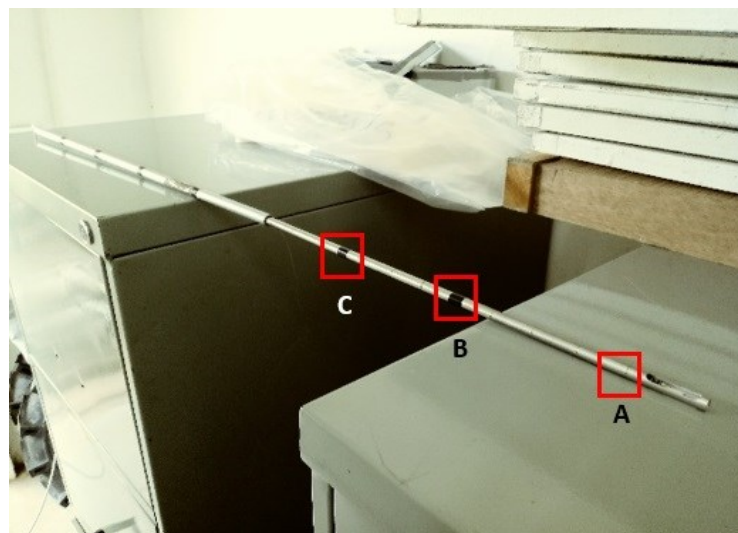


Figura 17 – Sonda utilizada para as aferições de velocidade de ar (em destaque a marcação das profundidades de medições).

Primeiramente, fixou-se em 15 Hz a frequência mínima do inversor, que foi, então, aumentada progressivamente, até atingir a frequência correspondente à velocidade máxima, ou seja, de 60 Hz. Obtidos os valores de velocidades máximas e mínimas, e suas frequências correspondentes, foi possível a determinação das velocidades intermediárias, de acordo com o que foi preestabelecido no projeto (Figuras

18). O motor trifásico utilizado, que trabalhou em tensão de 220 volts, tem potência de 5,42 hp, rendimento de 85% e amperagem de 14 ohms.

Os pontos de velocidades do ar dentro do túnel de vento foram obtidos com o termoanemômetro de fio quente ÔMEGA FM 1000. As três velocidades do ar foram medidas em cada um dos três pontos estabelecidos, com a introdução da sonda do sensor ÔMEGA FM 1000 em quatro profundidades diferentes: 0,7; 0,6; 0,5; e 0,4 m.



Figura 18 – Inversor de frequência para variação da velocidade angular do eixo do motor.

As velocidades do ar empregadas foram $0,83 \text{ m s}^{-1}$ (3 km h^{-1}), $1,94 \text{ m s}^{-1}$ (7 km h^{-1}) e $2,78 \text{ m s}^{-1}$ (10 km h^{-1}). Foram escolhidos três pontos para a medição dessas velocidades do ar, no último meio metro do túnel de vento (6,6 m). Os pontos demarcados se encontravam na lateral esquerda, na lateral direita e na parte superior do túnel de vento (Figura 19), e eles foram obtidos por meio de uma perfuração no próprio túnel de vento, de modo que permitisse que a sonda do sensor ÔMEGA FM 1000 conseguisse ultrapassar essa perfuração para realizar as medições. Os três pontos de medição foram posicionados de maneira paralela, portanto estavam dispostos em linha, apesar de cada um deles estar em uma face do túnel de vento, exatamente a 0,4 m do fim do túnel, mantendo padrão de referência (Figura 20).

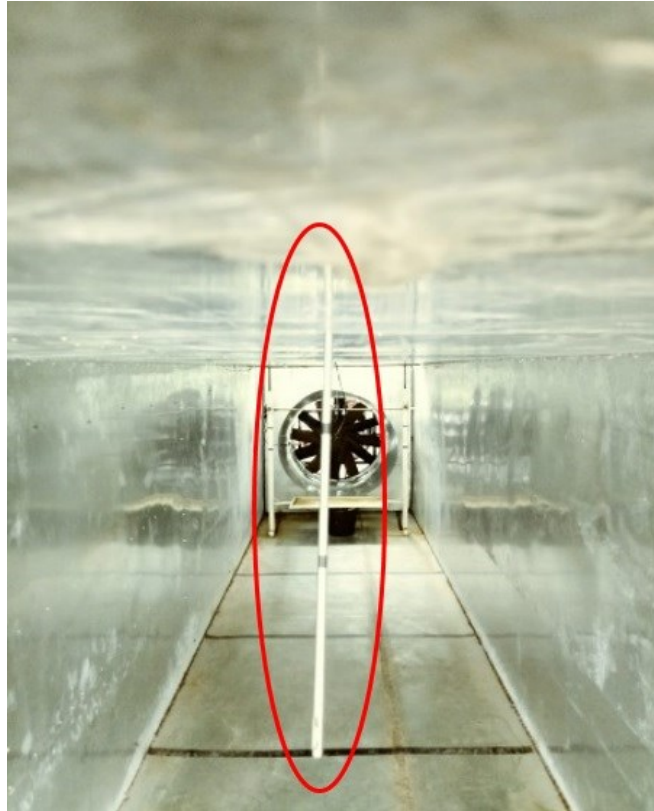


Figura 19 – Sonda do ÔMEGA FM 1000 sendo introduzida na parte superior do túnel de vento para verificações de velocidades.

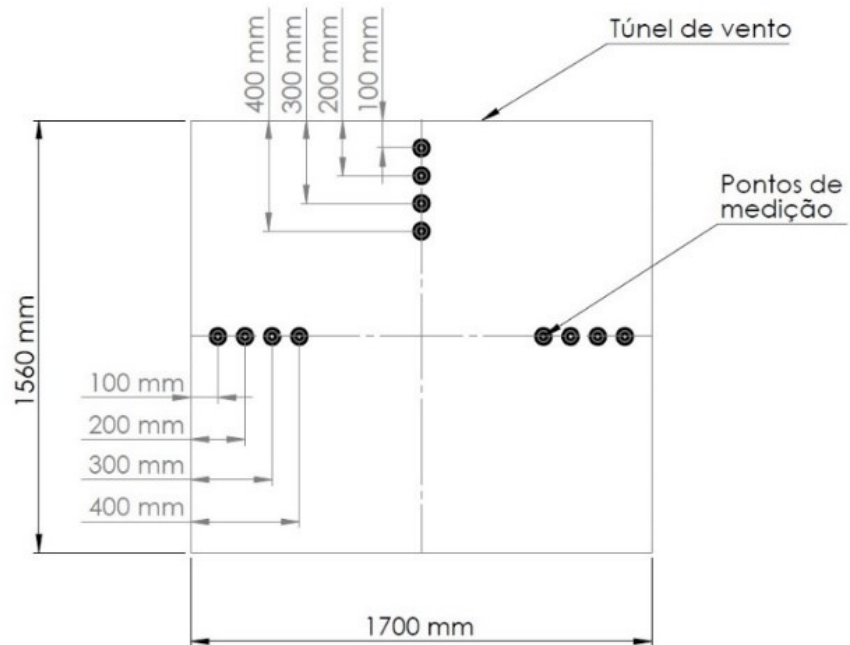


Figura 20 – Diagrama da medição das velocidades de ar utilizando a sonda do sensor ÔMEGA FM 1.000.

A sonda foi introduzida em cada uma dessas profundidades por três vezes (três repetições), e, então, foi feita a média das velocidades de trabalho em cada uma das faces do túnel de vento. Uma vez obtidas as médias para cada uma das velocidades (0,83, 1,94 e 2,78 m s⁻¹), em cada um dos três pontos de medição, calculou-se uma única média para cada velocidade, para verificar se ela apresentava valor igual ou próximo ao das velocidades preestabelecidas para condução do experimento.

A função do inversor de frequência ligado ao ventilador foi variar a velocidade do ar do túnel. O ventilador possuía duas polias acionadas por uma correia trapezoidal de perfil A e comprimento igual a 22 polegadas em seu eixo de transmissão de potência (Figura 21). A primeira polia tinha 300 mm de diâmetro, e a segunda, 100 mm de diâmetro, constituindo uma relação de transmissão de 3:1, como descrito em Barger et al. (1966). Esses valores são obtidos ao calcular a relação de transmissão pela equação da velocidade periférica (equação 2):

$$D_1N_1 = D_2N_2 \quad (2)$$

em que D_1 = diâmetro da polia menor (mm); D_2 = diâmetro da polia maior (mm); N_1 = número de voltas por minuto da polia menor (rpm); e N_2 = número de voltas por minuto da polia maior (rpm).

Logo, pode-se afirmar que $V_1 = V_2$. Esse eixo de transmissão de potência, quando acionado pelo motor, é o que causa o giro das pás do ventilador, conseqüentemente é o responsável pela velocidade desprendida pelo ventilador.

A medição da velocidade angular nesse eixo foi feita com um tacômetro digital TDR-100 (Figura 22). Para medição dessa velocidade, colocou-se um adesivo branco na parte externa de uma das polias do eixo do ventilador e, por meio de um feixe laser direcionado para esse adesivo, determinou-se a velocidade angular dessa polia. Após alguns segundos de medição, a velocidade angular no eixo se estabilizou, o que permitiu determinar a rotação. O cálculo da velocidade do eixo de transmissão de potência foi feito para as três velocidades do ar utilizadas no experimento, ou seja, 0,83, 1,94 e 2,78 m s⁻¹ (3,0, 7,0 e 10,0 km h⁻¹).



Figura 21 – Sistema de transmissão de potência do ventilador ligado ao motor.



Figura 22 – Tacômetro manual para aferição de rotação.

Segundo Budynas e Nisbett (2011), consegue-se calcular a vazão de ar medindo-se previamente a área da seção de um local e, posteriormente, a velocidade de escoamento (equação 3), que são grandezas dimensionais.

$$Q = VA \quad (3)$$

em que Q = vazão de um fluxo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); A = área de uma seção normal (m^2); e V = velocidade de escoamento (m s^{-1}).

Sendo a velocidade máxima proposta no experimento de 10 km h^{-1} ($2,78 \text{ m s}^{-1}$) e a área da seção da câmara de $2,55 \text{ m}^2$ ($1,7 \text{ m}$ de largura x $1,5 \text{ m}$ de altura), a vazão máxima com a qual se trabalhou foi de $7,089 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

O ventilador usado tinha oito pás e uma velocidade angular no seu eixo igual a $14,8 \text{ km h}^{-1}$.

Os DPVs utilizados no experimento foram 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; e 2,5 kPa, e todos eles foram calculados a partir da equação proposta por Tetens (1930), sendo obtidos pela diferença entre a pressão de saturação de vapor-d'água no ar (e_s) e a pressão parcial de vapor-d'água (e_a).

No cálculo de e_s foi levado em consideração o valor da temperatura do ar, conforme a equação 4 (RODRIGUES et al., 2011).

$$e_s = 6,108 (10)^{\frac{7,5t}{237,3+t}} \quad (4)$$

em que e_s = pressão de saturação de vapor-d'água no ar (kPa); e t = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Na sequência, o valor de e_a foi encontrado a partir da umidade relativa do ar e do valor de e_s (RODRIGUES et al., 2011), como indicado na equação 5.

$$e_a = \frac{\text{UR } e_s}{100} \quad (5)$$

em que e_a = pressão parcial de vapor-d'água no ar (kPa); e UR = umidade relativa do ar (%).

Por fim, obteve-se o DPV_{ar} usando a diferença entre e_s e e_a , conforme a equação 6 (RODRIGUES et al., 2011).

$$\text{DPV}_{\text{ar}} = e_s - e_a \quad (6)$$

em que DP_{Var} = déficit de pressão de saturação de vapor-d'água no ar (kPa); e_s = pressão de saturação de vapor-d'água no ar (kPa); e e_a = pressão parcial de vapor-d'água no ar (kPa).

Como mencionado, um algoritmo foi empregado na central onde os sensores de temperatura e umidade relativa do ar foram conectados, e eles registravam os DPVs utilizados no experimento toda vez que o sistema de aquecimento alterava as condições ambientais no interior do túnel de vento.

4.5. Caracterização da ponta hidráulica

Uma vez adquirida e escolhida a ponta que poderia apresentar os melhores resultados no experimento, alguns testes prévios (descritos a seguir) ao início dos trabalhos tiveram que ser realizados: calibração de manômetros, vazão de líquido da ponta hidráulica e espectro de gotas da ponta hidráulica.

4.5.1. Calibração de manômetros

O primeiro teste envolveu a calibração dos manômetros a serem empregados nos ensaios (Figura 23). Os manômetros foram aferidos na bancada de calibração, onde um manômetro de referência permaneceu fixado à bancada, como parâmetro de comparação com os manômetros a serem avaliados. Um volante de injeção de pressão foi girado para a direita, e à medida que isso acontecia uma quantidade de glicerina era inserida no sistema, fazendo com que a pressão de ambos os manômetros fosse alterada.

Um manômetro em boas condições é aquele que acompanha as mesmas alterações do manômetro de referência. Como os manômetros utilizados no túnel de vento eram novos, sua marcação acompanhou a marcação do manômetro de referência, não sendo, portanto, necessária a utilização da metodologia de Dornelles et al. (2011) para a correção dos manômetros.



Figura 23 – Bancada de calibração de manômetro, com a presença do manômetro de referência e do manômetro a ser calibrado.

4.5.2. Vazão de líquido da ponta hidráulica

O segundo teste envolvendo a ponta de pulverização foi a determinação da vazão da ponta XR-VP 110-02, onde durante 60 segundos mediu-se a vazão de líquido, e com o auxílio de uma proveta e de um cronômetro digital determinou-se a vazão de água coletada. Esse procedimento foi repetido três vezes com cada uma das três pontas utilizadas no experimento, e todas elas apresentaram vazão similar ou próxima a $0,75 \text{ L min}^{-1}$, corroborando o padrão ASAE S572.1, ou seja, nenhuma delas excedeu o limite inferior ou superior de 10% do seu volume. A ponta foi avaliada em um ensaio padronizado de acordo com a norma ISO 5682-1 para pontas de pulverização (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1996), sendo a pressão de trabalho a mesma que utilizada no experimento, ou seja, pressão nominal de 300 kPa (3 bar).

4.5.3. Espectro de gotas da ponta hidráulica

O terceiro e último teste envolvendo a ponta de pulverização foi para a determinação do espectro de gotas da ponta. Com a ajuda do analisador de partículas a laser e de um sistema de pulverização contendo água pura em seu reservatório, foi possível determinar o espectro de gota da ponta XR-VP 110-02.

A determinação do espectro de gotas foi feita pelos seguintes parâmetros, considerando que as gotas foram ordenadas de menor para maior volume: $D_v 10$ (diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 10% do volume total de líquido pulverizado); $D_v 50$ (diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 50% do volume total de líquido pulverizado); $D_v 90$ (diâmetro da gota abaixo da qual se encontra 90% do volume total de líquido pulverizado); amplitude relativa ou índice Span; e porcentagem do volume pulverizado composto por gotas com diâmetro menor que $100 \mu\text{m}$ ($\%V < 100$), entre 100 e $200 \mu\text{m}$ ($100 \mu\text{m} < \%V < 200 \mu\text{m}$), entre 200 e $300 \mu\text{m}$ ($200 \mu\text{m} < \%V < 300 \mu\text{m}$), entre 300 e $400 \mu\text{m}$ ($300 \mu\text{m} < \%V < 400 \mu\text{m}$), entre 400 e $500 \mu\text{m}$ ($400 \mu\text{m} < \%V < 500 \mu\text{m}$), e por gotas com diâmetro maior que $500 \mu\text{m}$ ($\%V > 500 \mu\text{m}$).

A ponta XR-VP 110-02 foi posicionada a 0,30 m de distância em relação ao feixe luminoso emitido pelo analisador de partículas, altura que é recomendada pelos padrões da ANSI/ASAE S572.1 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS, 2009). A ponta girava em torno do eixo de pulverização, para garantir que todo o jorro passasse transversalmente pelo feixe laser.

4.6. Condução do experimento dentro do túnel de vento

O experimento foi realizado seguindo o mesmo protocolo proposto no projeto e utilizando a ferramenta para obtenção dos dados: utilização do analisador de partículas a laser da marca *Malvern Spraytec*.

4.6.1. Utilização do analisador de partículas a laser

O analisador de partículas foi configurado para contabilizar gotas de 2,0 a $2.000 \mu\text{m}$ na taxa de aquisição de 2,5 kHz e tempo de leitura de 2 segundos. Esse equipamento, que analisa as gotas oriundas da pulverização quando ainda estão suspensas no ar, foi posicionado dentro do túnel de vento. Esse túnel, como

mencionado, tem 7 m de comprimento, o que possibilitou realizar, na parte inferior do túnel, seis marcações espaçadas (0,8; 1,9; 3,0; 4,1; 5,2; e 6,3 m), correspondentes às distâncias entre a ponta hidráulica utilizada para pulverizar e os pontos selecionados para coletar as informações relacionadas à deriva dentro do túnel.

Com exceção do primeiro ponto, cuja diferença para a ponta hidráulica era de 0,80 m, os outros pontos estavam equidistantes entre si, portanto a diferença de uma marcação para outra foi de 1,10 m. Os seis pontos foram avaliados previamente, empregando-se etiquetas hidrossensíveis e o analisador de partículas a laser, para verificar o ponto máximo que a deriva alcançaria. Com o procedimento da etiqueta, constatou-se que a distância máxima que a deriva atingiu dentro da câmara na velocidade de 10 km h⁻¹ foi até o quinto ponto, que corresponde à distância de 5,2 m mais afastado da ponta de pulverização.

Essa pulverização, como foi parte de um teste prévio, durou cerca de 10 minutos, porém na coleta de dados do experimento o tempo de pulverização foi somente de 9 segundos. O tempo de 9 segundos mostrou-se ótimo para que os feixes do laser do analisador de partículas pudessem fazer a aferição das gotas provenientes do sistema de pulverização, assim como foi tempo suficiente para que não ocorresse umedecimento completo das etiquetas hidrossensíveis que estivessem nas primeiras posições de medição.

Embora os ensaios com analisador de partículas a laser e os ensaios com as etiquetas hidrossensíveis tivessem o mesmo tipo de metodologia no momento da geração de dados, esses foram coletados separadamente, para que os resultados de um não impactassem os do outro, o que futuramente comprometeria a análise.

Após os ensaios prévios, partiu-se para o experimento de fato, com o analisador laser coletando as informações pertinentes a cada posição marcada no piso do túnel. Em cada posição de deslocação do analisador laser, ele gerava as informações sobre as gotas que eram pulverizadas sob uma combinação de velocidades de vento e déficits de pressão de vapor, que no total resultaram em 15 simulações de condições meteorológicas (três velocidades de vento x cinco DPVs) para cada posição na qual o analisador de partículas foi deslocado ao longo da câmara climática.

Como o analisador de partículas a laser só permitiu realizar leituras até o quarto ponto da câmara climática, ou seja, até a distância de 4,1 m, para o ensaio foi possível realizar um total de 60 tratamentos, com três repetições cada, até completar todos os pontos demarcados dentro da câmara climática.

Após a pulverização e o tempo de leitura, o próprio analisador de partículas a laser gerou, em sua plataforma, uma planilha contendo todas as medições a serem analisadas posteriormente (Figura 24).

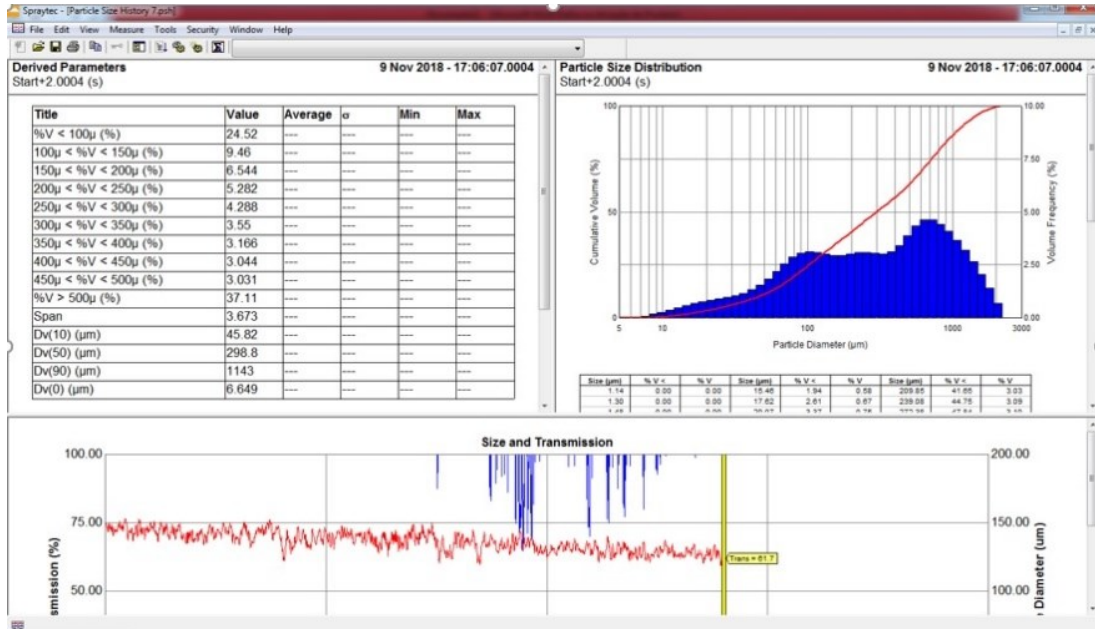


Figura 24 – Malvern Spraytec Instruments Ltd. com dados gerados pós-pulverização.

4.6.2. Perdas por deriva no túnel de vento

Com o intuito de determinar as perdas por deriva dentro de um ambiente semiclimatizado, onde as condições ambientais podem ser parcialmente controladas, estimaram-se as perdas por deriva utilizando os dados gerados no analisador de partículas a laser.

4.6.3. Influência das condições climáticas na deriva da população de gotas

A influência das condições climáticas na deriva durante a pulverização hidráulica foi avaliada empregando-se as análises dos resultados dos espectros da população de gotas obtidos com o emprego do analisador de partículas a laser, levando-se em conta o déficit de pressão de vapor e a velocidade do ar em cada uma das distâncias dentro do túnel de vento. Portanto, foi possível identificar se houve perda ou ganho nos valores dos parâmetros avaliados em cada um dos trechos.

4.7. Ajuste de modelo estatístico para estimar a deriva em ambiente controlado

Foi utilizada a metodologia de superfície de resposta, mais especificamente o Modelo de Regressão Linear Múltipla (MRLM), para ajustar um modelo capaz de estimar a quantificação da deriva em todos os seus parâmetros. A metodologia da regressão múltipla serve para testar a significância dos coeficientes de regressão. Os dados foram analisados, adotando-se os níveis de 5 e 1% de probabilidade.

4.7.1. Modelo estatístico

Nessa regressão, a finalidade principal é obter uma relação matemática entre uma das variáveis estudadas (variável dependente ou resposta) e o restante das variáveis que descrevem o sistema (variáveis independentes ou explicativas), o que permite a detecção dos principais padrões de similaridade e a associação e correlação entre as variáveis (equação 7):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p + e \quad (7)$$

em que X_x = x-ésima variável observada; B_x = coeficiente associado x-ésima variável; e e = erro da regressão que apresenta distribuição normal, com média zero e variância σ^2 .

Portanto, a variável-resposta avaliou os parâmetros da deriva, e a partir dela todas as outras variáveis envolvidas geraram valores e coeficientes.

4.7.2. Variáveis dependentes

As variáveis dependentes mensuradas foram: Dv 10 (diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 10% do volume total de líquido pulverizado); Dv 50 (diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 50% do volume total de líquido pulverizado); Dv 90 (diâmetro da gota abaixo da qual se encontra 90% do volume total de líquido pulverizado); Índice SPAN ou Amplitude relativa; porcentagem do volume pulverizado composto por gotas com diâmetro menor que 100 μm ($\%V < 100 \mu\text{m}$); porcentagem do volume pulverizado composto por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm ($100 \mu\text{m} < \%V < 200 \mu\text{m}$); porcentagem do volume pulverizado composto por gotas com diâmetro entre 200 e 300 μm ($200 \mu\text{m} < \%V < 300 \mu\text{m}$); porcentagem do volume pulverizado

composto por gotas com diâmetro entre 300 e 400 μm ($300 \mu\text{m} < \%V < 400 \mu\text{m}$); e porcentagem do volume pulverizado composto por gotas com diâmetro maior que 400 μm ($\%V > 400 \mu\text{m}$).

4.7.3. Variáveis independentes

As variáveis independentes avaliadas foram: DPV (0,5; 0,7; 1,0; 1,5; e 2,5 kPa); velocidade do ar (2,98; 6,94; e 9,90 km h^{-1}) e distâncias (0,8; 1,9; 3,0; 4,1 m).

4.7.4. Propriedades do modelo estatístico

O experimento foi organizado em delineamento inteiramente casualizado (DIC), para evitar que um determinado tratamento experimental fosse favorecido ou prejudicado por uma condição específica. A análise estatística foi realizada utilizando o software GENES (CRUZ, 2001), que, de maneira integrada a outro software, denominado R, permitia que os gráficos fossem gerados por uma versão livre do próprio R, conhecido como R *Studio* (MELLO; PETERNELLI, 2013).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sequência estão os resultados prévios no início dos ensaios e a descrição de como foram feitas a identificação e a caracterização do espectro da população de gotas dentro do Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas (LADA) e a obtenção das médias das velocidades do ar dentro do túnel de vento. Após a obtenção dos dados gerados com o analisador de partículas a laser e das etiquetas amostradoras hidrossensíveis, serão apresentados os resultados devido à influência das condições ambientais na deriva durante a pulverização e a análise estatística dos tratamentos realizados.

5.1. Velocidade do ar no túnel de vento e velocidade do eixo do ventilador

O sensor de velocidade do ar (modelo FMA 1001R-V1, ÔMEGA, Stanford-CI) foi utilizado para aferição dos valores médios de velocidade de deslocamento do ar precisados nos tratamentos. O sensor foi instalado a 6,5 m a jusante do ventilador, no interior do túnel de vento. Com esse equipamento, foram obtidos os valores médios da velocidade de referência e suas respectivas frequências no inversor (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores médios das velocidades do ar no interior do túnel de vento em diferentes frequências do inversor

Frequência do inversor (Hz)	Rotação do eixo do ventilador		Velocidade média do ar	
	(rad s ⁻¹)	(rpm)	(m s ⁻¹)	(km h ⁻¹)
38,30	49,69	474	0,83	2,98
46,60	58,33	557	1,93	6,94
58,50	71,21	680	2,75	9,90

Os dados gerados na Tabela 1 foram medidos com o intuito de estimar, na prática, as velocidades iguais ou próximas às que foram estipuladas para se trabalhar nos ensaios. Na teoria, as velocidades com as quais se pretendia trabalhar foram definidas no projeto inicial, porém, na prática, os valores médios que se conseguiu

atingir utilizando o inversor de frequências foram os apresentados nesse quadro. Esses valores são os mais próximos daqueles se desejava trabalhar dentro do túnel de vento.

O inversor de frequência serviu para variar a rotação do eixo do motor trifásico, obtendo-se velocidades cada vez maiores à medida que sua frequência era aumentada. As velocidades do ar dentro do túnel de vento foram obtidas pelas rotações do eixo do ventilador, medidas com o tacômetro TDR-100.

A velocidade do ar de $2,75 \text{ m s}^{-1}$ está acima da ideal para fazer a pulverização. A velocidade de $1,93 \text{ m s}^{-1}$ é considerada ótima para a pulverização, quando necessária. A velocidade do ar de $0,83 \text{ m s}^{-1}$ encontrada nos ensaios coincidiu com a preestabelecida no projeto, como sendo a velocidade abaixo da ideal para pulverizar.

5.2. Determinação do espectro da população de gotas

O primeiro passo para a determinação do espectro de gotas foi a calibração do manômetro que seria utilizado para obtenção do espectro da população de gotas no laboratório e, posteriormente, na barra de pulverização dentro do túnel de vento. Durante os ensaios para a calibração do manômetro, verificou-se que não houve diferença entre o manômetro classe A (manômetro de referência) e o ensaiado, sendo gerado um gráfico (Figura 25) para demonstrar essa aferição.

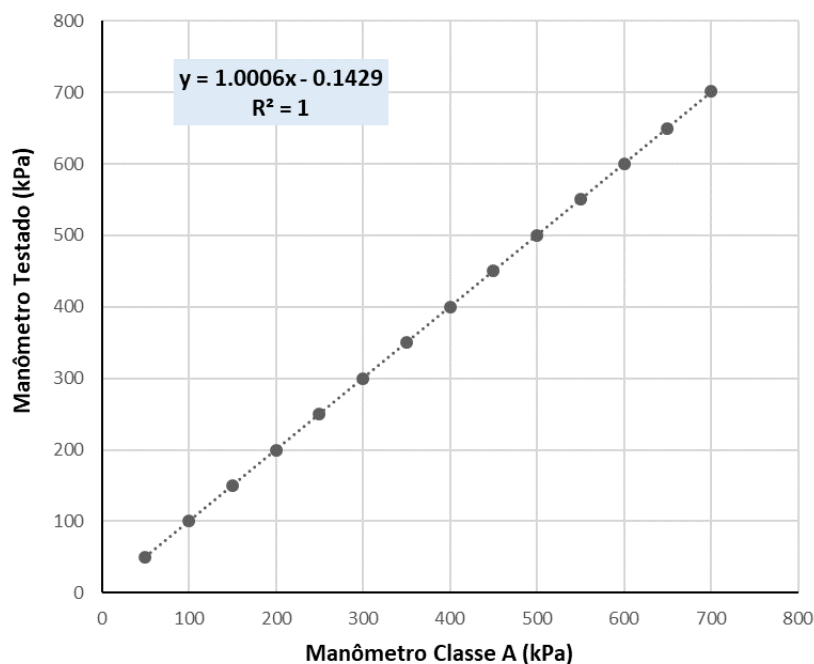


Figura 25 – Perfil de calibração dos manômetros utilizados no experimento.

O manômetro ensaiado foi utilizado na estrutura da barra de pulverização que, juntamente com o analisador de partículas a laser, seria utilizado para a caracterização técnica de uma ponta hidráulica de acordo com o padrão ASAE S572.1 e sem a influência das condições ambientais (Tabela 2).

Tabela 2 – Caracterização do espectro da população de gotas da ponta hidráulica XR VP 110-02 submetidas à pressão de 300 kPa

Fator do espectro	Leitura				Média
	1	2	3	4	
Dv (50) (µm)	145,00	144,60	141,80	145,50	144,23
Dv (10) (µm)	73,87	70,88	71,31	74,48	72,64
Dv (90) (µm)	291,40	299,10	280,20	293,10	290,95
Span	1,50	1,58	1,74	1,50	1,58
V (%) < 100 µm	24,12	25,33	25,67	23,81	24,73
100 µm < V (%) < 200 µm	48,23	46,34	48,24	48,30	47,78
200 µm < V (%) < 300 µm	18,56	18,41	18,24	18,62	18,46
300 µm < V (%) < 400 µm	5,81	6,08	5,60	5,97	5,86
400 µm < V (%) < 500 µm	1,63	1,77	1,58	1,77	1,68
V (%) > 500 µm	1,65	2,07	0,68	1,53	1,48

O DMV médio dessa ponta é 144,23 µm, o que indica que a categoria desse espectro de gotas é classificada como gotas finas, segundo o padrão ASAE S-572. Essas gotas têm como vantagem a facilidade de sua penetração durante a pulverização, no entanto possuem como desvantagem a sua alta suscetibilidade à deriva no momento da aplicação. Este fato é confirmado ao analisar a porcentagem média do volume de gotas abaixo de 100 µm e a porcentagem média do volume de gotas entre 100 e 200 µm. Em todas as leituras realizadas, o somatório desses espectros de gotas corresponde a mais de 70% de todo volume pulverizado, o que corrobora a afirmação de sua alta tendência apresentar deriva durante as aplicações.

O SPAN registrado indica uma boa uniformidade no tamanho das gotas. Todas as leituras foram realizadas no Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas (LADA) da UFV, e um termo-higroanemômetro registrou condições ambientais de 22°C, umidade relativa de 70% e velocidade de vento de 0,31 m s⁻¹, valores medidos no momento dos ensaios.

5.3. Comportamento do espectro da população de gotas produzidas pela ponta XR-VP 110-02 na pressão de 300 kPa dentro do túnel de vento

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos dentro do túnel de vento, por meio de um analisador de partículas a laser, que registrou o espectro da população de gotas em condições ambientais, nas quais foram avaliados cinco níveis do déficit de pressão de vapor (0,5; 0,7, 1,0; 1,5; e 2,5 kPa), associado a três velocidades do ar (3,0; 7,0; e 10 km h⁻¹) e ao longo de quatro distâncias (0,8; 1,9; 3,0; e 4,1 m).

5.3.1. Influência das condições climáticas no diâmetro da mediana volumétrica (Dv 50)

O diâmetro da mediana volumétrica (Dv 50) apresentou suas maiores médias nos menores DPVs e nas maiores velocidades, ocorrendo o auge de sua média (ponto de máxima) na velocidade de 7,0 km h⁻¹ (159,21 µm) e o seu declínio (ponto de mínima) na velocidade de 3,0 km h⁻¹ (77,69 µm). Portanto, 50% do volume pulverizado encontra-se abaixo dessa média, predominando gotas classificadas como finas e muito finas, segundo a ASAE/ASABE S572.1 (ASABE, 2009).

Nas velocidades de 7,0 e 10,0 km h⁻¹ (Figuras 26 e 27), os modelos matemáticos são parecidos e a influência do DPV (efeito quadrático positivo), quando seus valores estão abaixo de 0,7 kPa, gera acréscimos nas médias do diâmetro da mediana volumétrica (DMV) no centro do túnel de vento. Huang et al. (2012) relataram que as gotas de maiores diâmetros tendem a reduzir seu tamanho e a se acumularem em uma posição central do túnel de vento, na qual existe uma maior estabilidade do fluxo de ar.

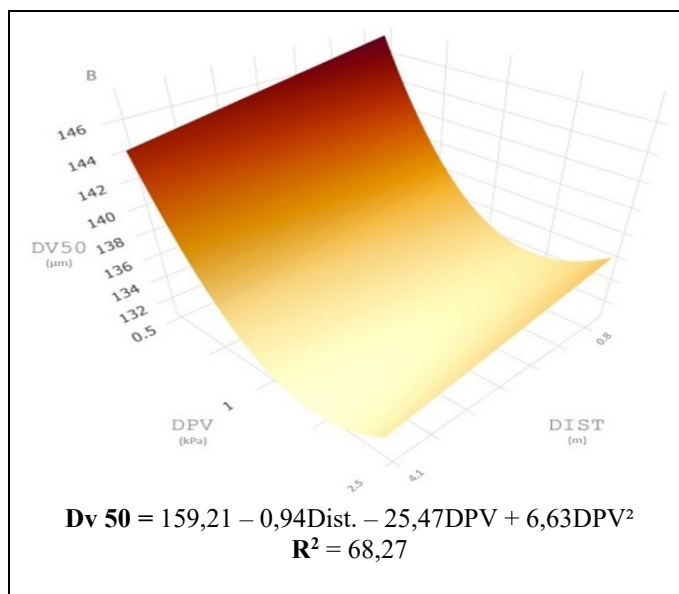


Figura 26 – Influência dos DPVs no Dv50, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h⁻¹.

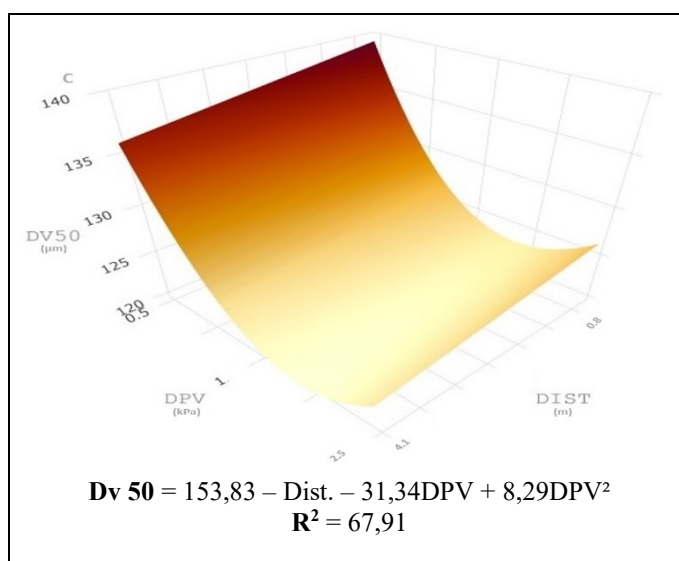


Figura 27 – Influência dos DPVs no Dv50, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h⁻¹.

Já na velocidade de 3,0 km h⁻¹ (Figura 28), observou-se um decréscimo das médias de Dv 50 à medida que a distância aumentou (efeito quadrático negativo), estando o DPV acima de 1,5 kPa ao longo do túnel de vento. Esse resultado é consonante com aquele observado por Ozkan e Derksen (2016), ou seja, o efeito das

condições meteorológicas interfere no diâmetro médio de Dv 50 e, conseqüentemente, no potencial risco de deriva, podendo ser perdido até 10% do volume total aplicado em condições adversas, como alto DPV e baixa velocidade de vento.

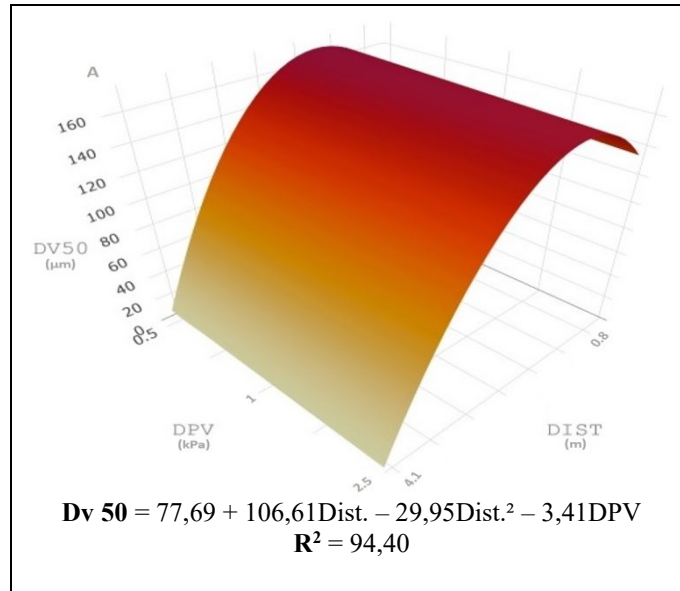


Figura 28 – Influência dos DPVs no Dv50, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h⁻¹.

5.3.2. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor que 100 micrometros [V (%) < 100 µm]

A porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor do que cem micrometros [V (%) < 100 µm] apresentou modelos diferentes, quando avaliada nas três distintas velocidades, e em duas delas a variável déficit de pressão de vapor foi a que mais influenciou o comportamento da citada variável-resposta.

Na velocidade de 3,0 km h⁻¹ (Figura 29), a distância (efeito quadrático negativo) e os DPVs acima de 1,0 kPa alteraram o comportamento de V (%) < 100 µm, promovendo a redução das porcentagens de V (%) < 100 µm no centro do túnel de vento (ponto de mínima). Segundo Matthews (2000), gotas menores que 100 µm são arrastadas com facilidade pelo vento, razão pela qual são as principais causadoras de situações de deriva.

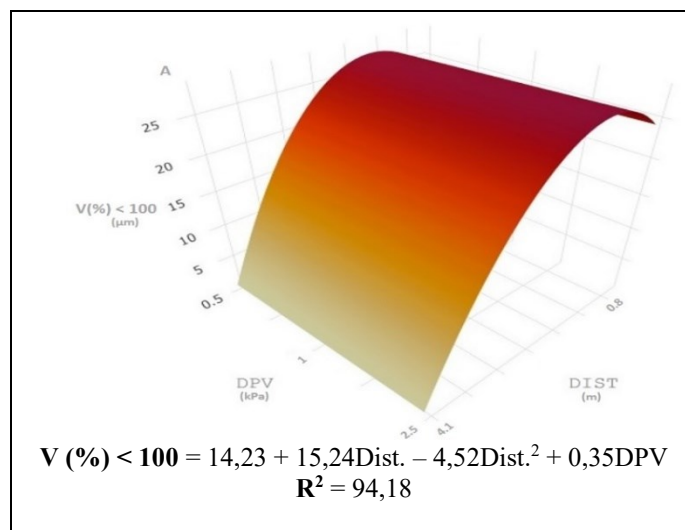


Figura 29 – Influência dos DPVs no $V (\%) < 100 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $3,0 \text{ km h}^{-1}$.

Na velocidade de $7,0 \text{ km h}^{-1}$ (Figura 30), também se observou redução das porcentagens de $V (\%) < 100 \mu\text{m}$ com o aumento do DPV, porém em menor intensidade, já que essa velocidade é maior que 3 km h^{-1} . Em DPVs inferiores a $0,7 \text{ kPa}$, ocorreu acréscimo nas porcentagens de $V (\%) < 100 \mu\text{m}$. Ressalta-se, ainda, que na velocidade de $7,0 \text{ km h}^{-1}$ o DPV (efeito quadrático positivo) foi o que mais contribuiu para o aumento das porcentagens de $V (\%) < 100 \mu\text{m}$, comportamento esse também constatado por Nuyttens, Zwertvaegher e Dekeyser (2017). Os autores observaram que a deriva está diretamente relacionada com a porcentagem de volume de gotas com menos de $100 \mu\text{m}$, e que quanto menor a porcentagem de volume com gotas menores que $100 \mu\text{m}$, menores foram as porcentagens de depósito de deriva.

Na velocidade de $10,0 \text{ km h}^{-1}$ (Figura 31), observou-se estabilização das porcentagens de $V (\%) < 100 \mu\text{m}$, ao longo do túnel de vento, sem alternâncias de influência da distância ou dos DPVs. A porcentagem dessa classe de gotas nas maiores velocidades foi de $23,55\%$, enquanto na menor representou $14,23\%$ de todo volume pulverizado.

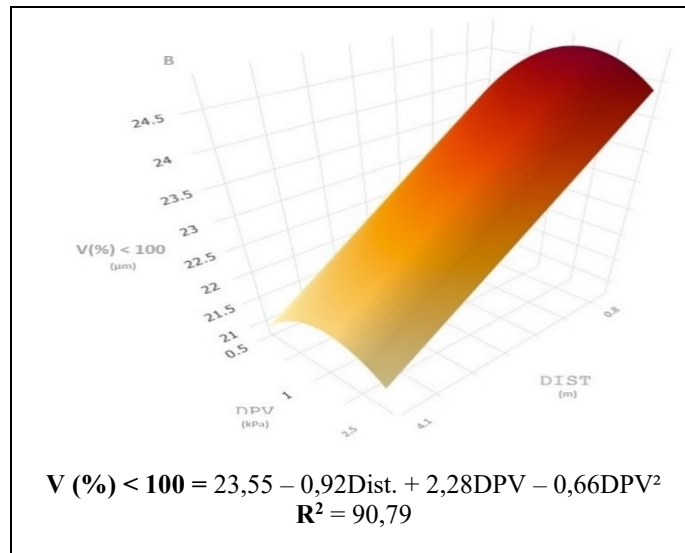


Figura 30 – Influência dos DPVs no $V (\%) < 100 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $7,0 \text{ km h}^{-1}$.

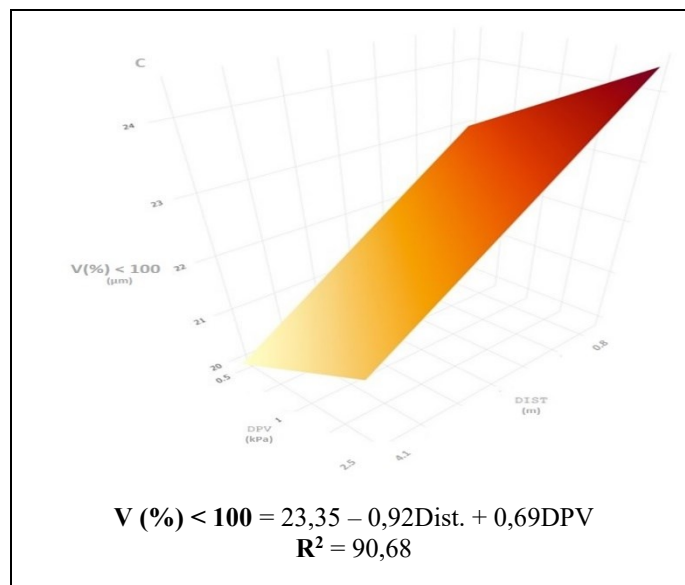


Figura 31 – Influência dos DPVs no $V (\%) < 100 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $10,0 \text{ km h}^{-1}$.

5.3.3. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro entre 100 e 200 micrometros [$100 \mu\text{m} < V (\%) < 200 \mu\text{m}$]

A porcentagem do volume de gotas com diâmetro entre 100 e 200 micrometros [$100 \mu\text{m} < V (\%) < 200 \mu\text{m}$], quando avaliada na velocidade de $3,0 \text{ km h}^{-1}$ (Figura 32),

foi majoritariamente influenciada pela distância (efeito quadrático negativo) e pelo DPV, quando esse se encontrava acima de 1,0 kPa. Nessa situação, as porcentagens de $100 \mu\text{m} < V (\%) < 200 \mu\text{m}$ sofreram uma queda, principalmente no centro do túnel de vento (ponto de mínima).

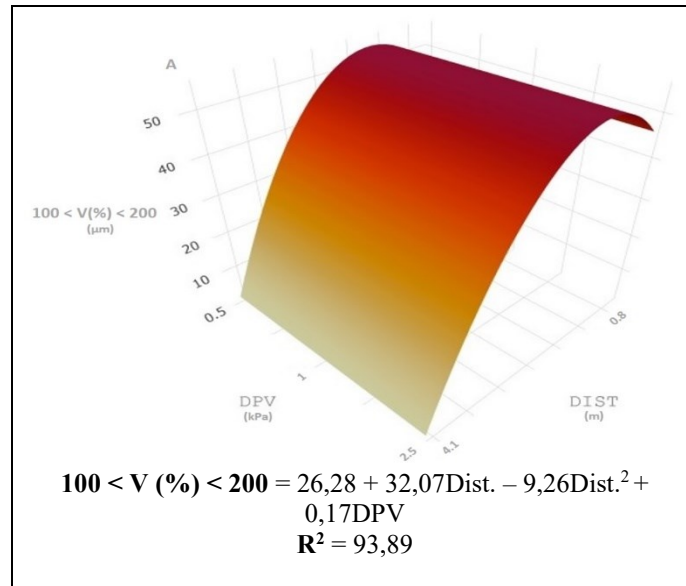


Figura 32 – Influência dos DPVs em $100 \mu\text{m} < V (\%) < 200 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $3,0 \text{ km h}^{-1}$.

O mesmo ocorreu com essa variável-resposta nas velocidades de $7,0$ e $10,0 \text{ km h}^{-1}$ (Figuras 33 e 34), que possuem modelos similares.

É importante frisar que nesse caso, o DPVs acima de $1,0 \text{ kPa}$, combinados com o aumento das distâncias (efeito linear interativo), ocasionaram essas pequenas perdas nos percentuais de $100 \mu\text{m} < V (\%) < 200 \mu\text{m}$, principalmente na extremidade final do túnel de vento (ponto de mínima). Ferguson et al. (2015) relataram que todas as gotas que compõem o espectro podem evaporar, e com isso o percentual de gotas que pertencem a essa classificação de parte do volume pulverizado passa a compor uma nova classe de menores gotículas ($\%V < 100 \mu\text{m}$).

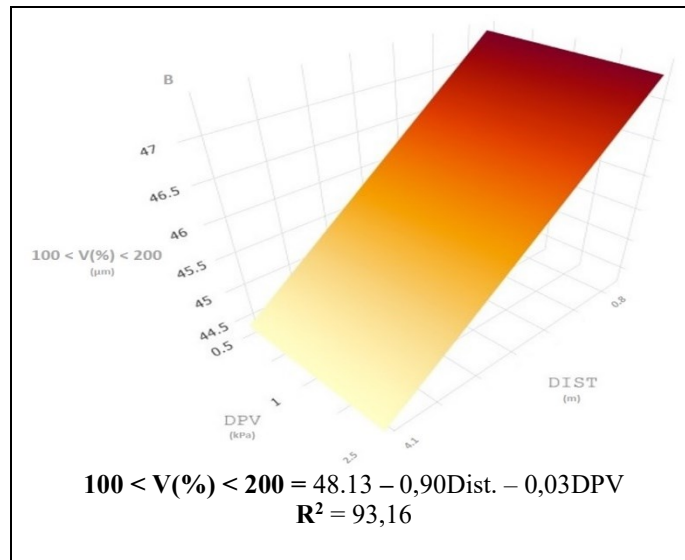


Figura 33 – Influência dos DPVs em $100 \mu\text{m} < V(\%) < 200 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $7,0 \text{ km h}^{-1}$.

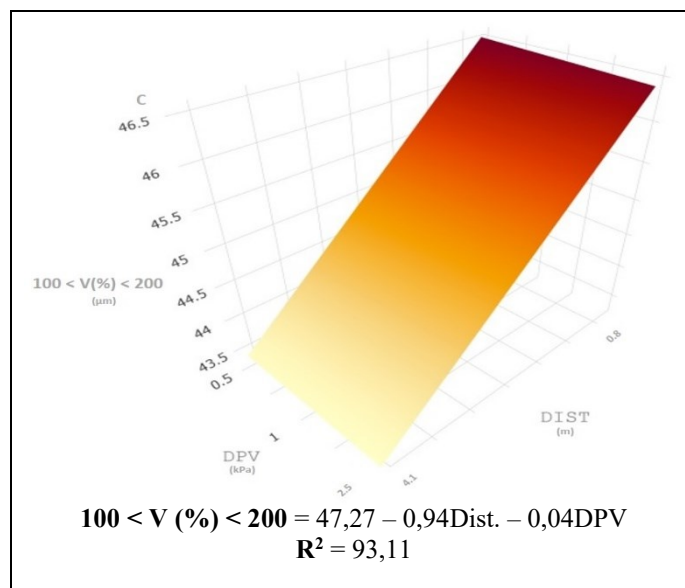


Figura 34 – Influência dos DPVs em $100 \mu\text{m} < V(\%) < 200 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $10,0 \text{ km h}^{-1}$.

Por outro lado, quando as maiores velocidades foram inversamente proporcionais ao DPV (principalmente em DPVs abaixo de $0,7 \text{ kPa}$), houve aumento no porcentual dessa classe de gotas, que culminou com seus picos na extremidade inicial

do túnel de vento. Esse resultado se alinha ao encontrado por Hilz e Vermeer (2013). Os autores constataram que as gotas pertencentes às classes acima de 100 µm (%V < 100 µm) tendem a sofrer cada vez menos influência do DPV. O percentual dessa classe de gotas, nas maiores velocidades, representou 48,10%, enquanto nas menores representou 26,28% de todo volume pulverizado.

5.3.4. Influência das condições climáticas na amplitude relativa (SPAN)

A amplitude relativa ou índice SPAN, avaliado em três velocidades, apresentou diferenças entre si, porém em todas elas apresentou valores abaixo de 1,5. Isso indica uma homogeneidade de aplicação e do comportamento do espectro de gotas ao longo do túnel de vento, nos três modelos. Gil et al. (2014) ressaltaram que a parametrização desse índice se dá quando seu valor tende a zero, aumentando, assim, a homogeneidade do espectro de gotas.

Na velocidade de 3,0 km h⁻¹ (Figura 35), o SPAN apresentou as maiores oscilações entre as três velocidades aferidas. Essas oscilações, que se concentraram na extremidade inicial do túnel de vento, ocorreram em virtude do aumento da distância (efeito quadrático negativo). Todavia, o valor dessa oscilação foi de 1,04, portanto não comprometeu a homogeneidade da aplicação como um todo.

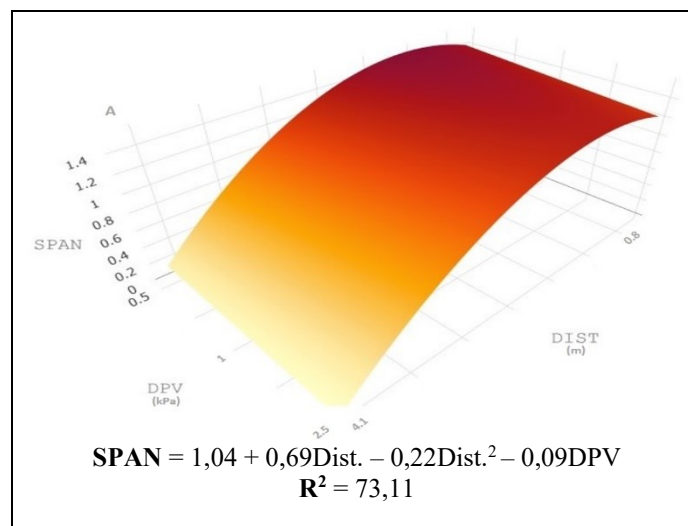


Figura 35 – Influência dos DPVs no SPAN, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h⁻¹.

Na velocidade de 7,0 km h⁻¹ (Figura 36), o SPAN apresentou oscilações que se concentraram no centro do túnel de vento. Essas oscilações ocorreram em virtude das turbulências muito frequentes observadas no centro do túnel, e não das alterações dos valores das variáveis DPV e distância.

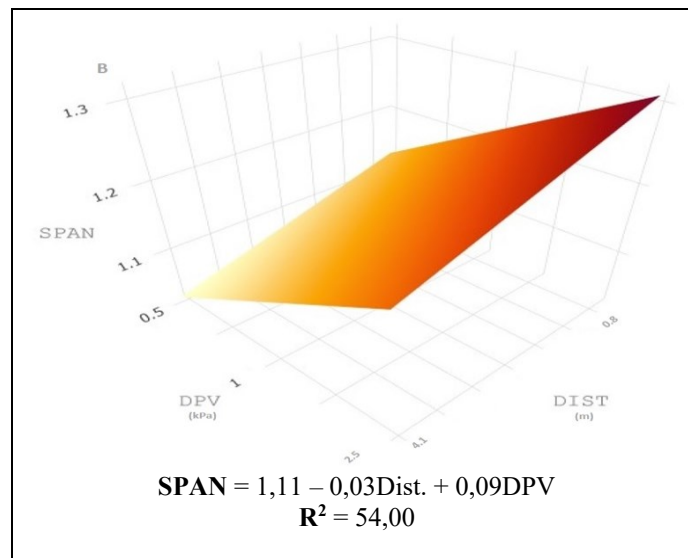


Figura 36 – Influência dos DPVs no SPAN, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h⁻¹.

Na velocidade de 10,0 km h⁻¹ (Figura 37), o SPAN tendeu a zero ao longo do túnel de vento, independentemente das oscilações presentes da distância e do DPV. Esse comportamento, conseqüentemente, atesta a otimização desse índice, quando avaliado nessas condições. Resultado semelhante foi auferido por [Baker \(2014\)](#) Derksen et al. (1999), que constatou, também, que o aumento da velocidade do ar é seguido de redução do índice de amplitude relativa dentro do túnel de vento.

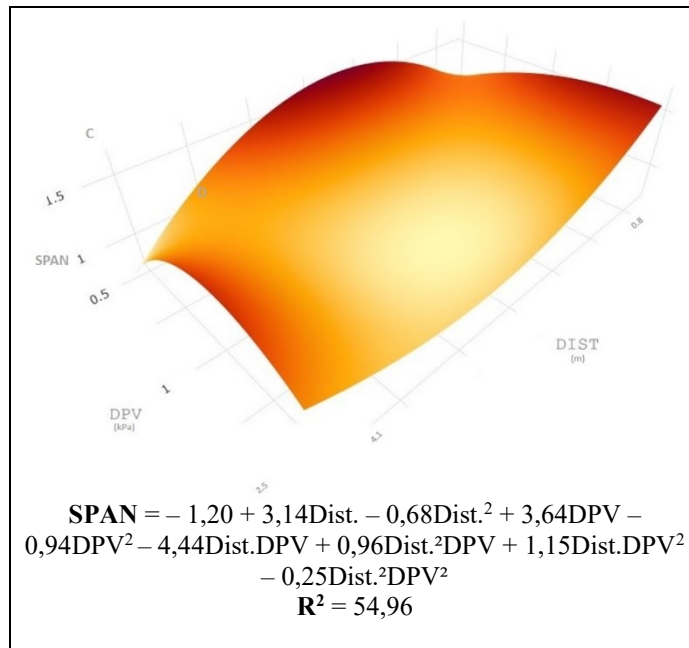


Figura 37 – Influência dos DPVs no SPAN, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h⁻¹.

5.3.5. Influência das condições climáticas no diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 10% do volume total de líquido pulverizado (Dv 10)

O diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 10% do volume total de líquido pulverizado (Dv 10) apresentou suas maiores médias nos menores DPVs e nas maiores velocidades, com seu ponto de máxima (84,21 µm) ocorrendo na velocidade de 7,0 km h⁻¹ (Figura 38), e de mínima (50,84 µm), na velocidade de 3,0 km h⁻¹ (Figura 39). Portanto, 10 % do volume pulverizado se encontrava abaixo dessa média, com presença de gotas classificadas como extremamente finas na menor velocidade e muito finas nas maiores, segundo a ASAE/ASABE S572.1 (ASABE, 2009).

A variável-resposta Dv 10 apresentou modelos similares, quando avaliada nas velocidades de 7,0 e 10,0 km h⁻¹ (Figura 40). Quando os valores de DPV estavam abaixo de 0,7 kPa e sendo as velocidades superiores a 7,0 km h⁻¹, observou-se aumento das médias de Dv 10. Em condições análogas de ensaio, aumentos dos coeficientes de Dv 10 também foram obtidos por Maciel (2016).

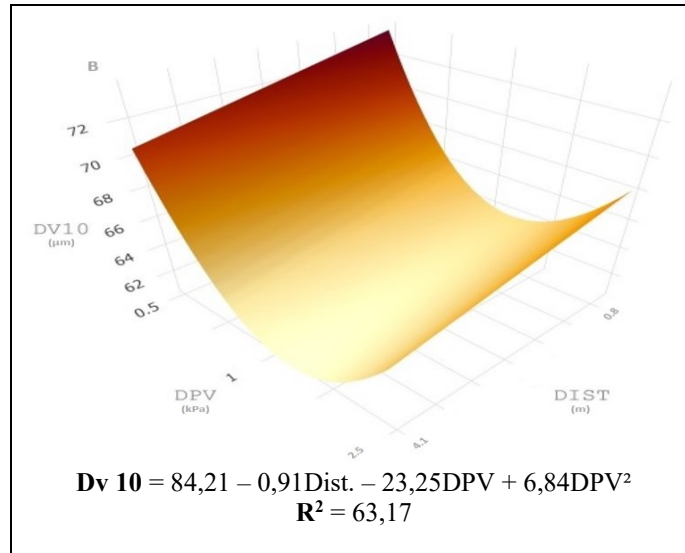


Figura 38 – Influência dos DPVs no Dv 10, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h⁻¹.

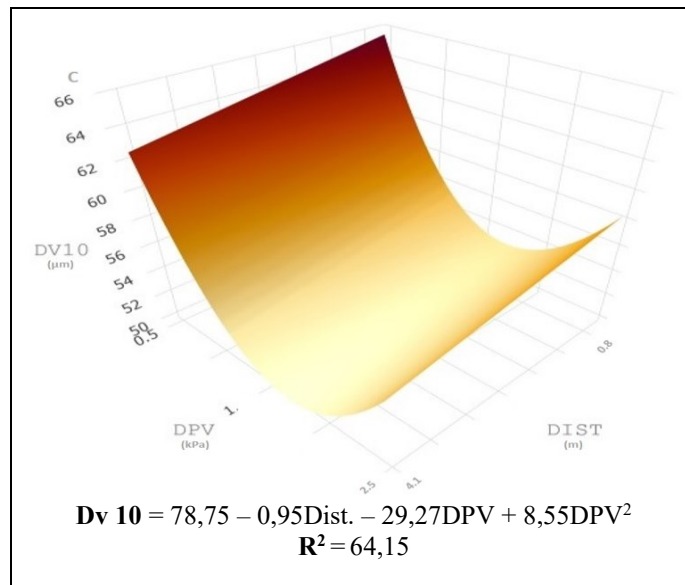


Figura 39 – Influência dos DPVs no Dv 10, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h⁻¹.

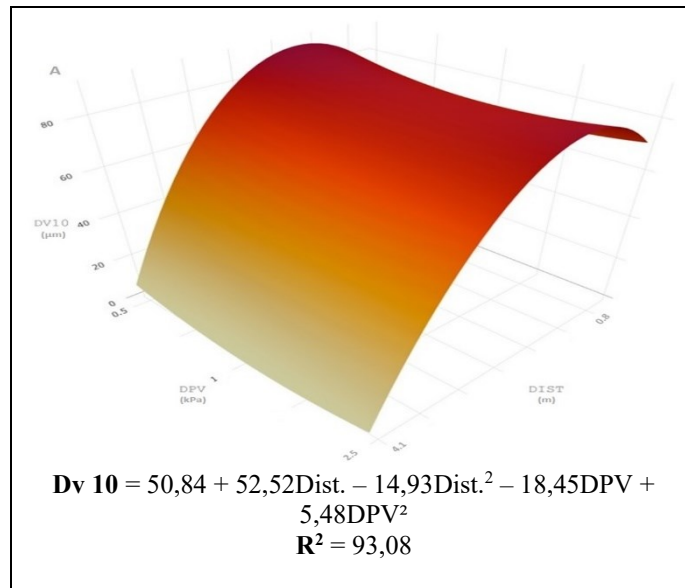


Figura 40 – Influência dos DPVs no Dv 10, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h⁻¹.

Por outro lado, para um DPV igual ou superior a 1,0 kPa, em velocidades acima de 3,0 km h⁻¹, observou-se redução das médias de Dv 10 à medida que se aumentava o binômio distância e DPV, de forma proporcional dentro do túnel de vento. Yu et al. (2013), em ensaio semelhante, também obtiveram redução dos índices de Dv 10, sob condições de velocidades moderadas, acompanhadas de um alto valor de DPV.

5.3.6. Influência das condições climáticas no diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 90% do volume total de líquido pulverizado (Dv 90)

Ao analisar o diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 90% do volume total de líquido pulverizado (Dv 90), observou-se uma similitude dos modelos, fato que ocorrera também para Dv 10, como descrito anteriormente. As maiores médias de Dv 90 foram obtidas em velocidades acima de 7,0 km h⁻¹ (Figura 41), associadas a DPVs (efeito quadrático positivo) inferiores a 0,7 kPa. Esse fato ocorreu, também, quando a variável-resposta Dv 90 foi aferida em velocidade de 10,0 km h⁻¹ (Figura 42), pois nessa velocidade ela apresentou modelo similar àquele encontrado na velocidade de 7,0 km h⁻¹. Sasaki (2014), em estudos de evaporação, também obteve aumentos na média dessa variável-resposta em condições análogas.

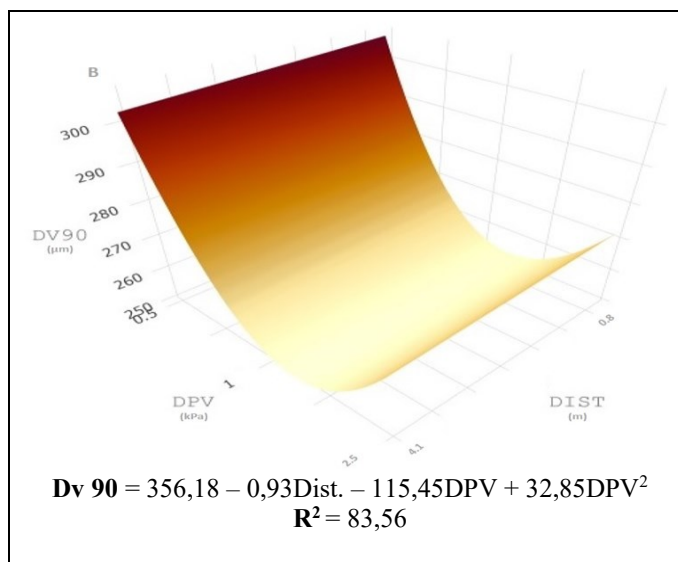


Figura 41 – Influência dos DPVs no Dv 90, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h⁻¹.

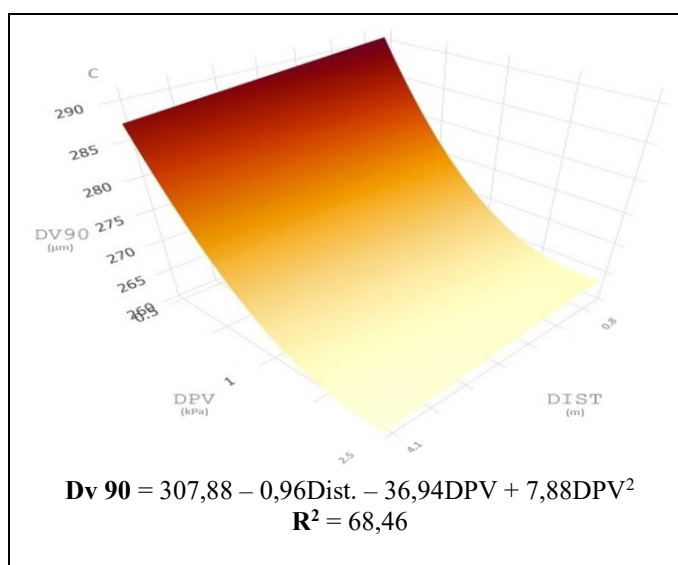


Figura 42 – Influência dos DPVs no Dv 90, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h⁻¹.

Nota-se, portanto, à semelhança de Dv 10, que a Dv 90 também apresentou suas maiores médias na velocidade de 7,0 km h⁻¹ (356,18 µm), que é seu ponto de máxima, e seu declínio (307,88 µm) na velocidade de 3,0 km h⁻¹ (Figura 43), seu ponto de mínima. Assim, 90% do volume pulverizado se encontrava abaixo dessa média, havendo presença de gotas classificadas como médias na menor velocidade, e outras

classificadas como grossas na maior velocidade, segundo ASAE/ASABE S572.1 (ASABE, 2009).

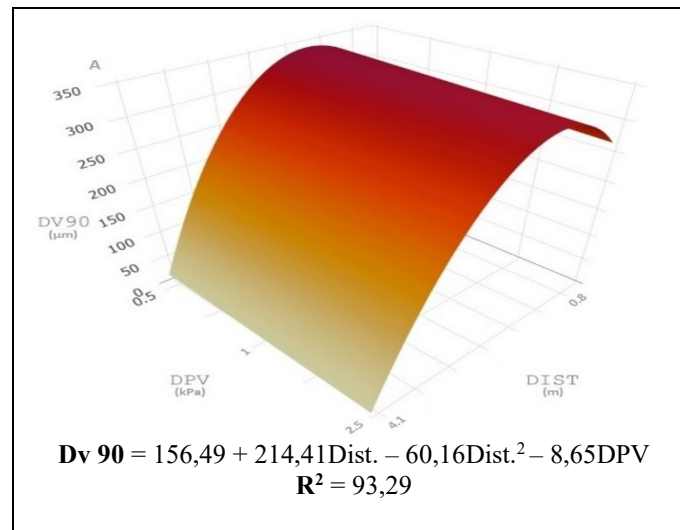


Figura 43 – Influência dos DPVs no Dv 90, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 3,0 km h⁻¹.

Na velocidade de 3,0 km h⁻¹, ocorreu redução das médias de Dv 90, principalmente à medida que os valores da distância (efeito quadrático negativo) aumentavam e com a presença de DPVs superiores a 1,0 kPa, dentro do túnel de vento. Xu et al. (2014) consideram que valores descompensados de Dv 10 e de Dv 90 são responsáveis pelo aumento dos índices de amplitude relativa durante a aplicação.

5.3.7. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro entre 100 e 200 micrometros [200 µm < V (%) < 300 µm]

A porcentagem do volume de gotas com diâmetro entre duzentos e trezentos micrometros [200 µm < V (%) < 300 µm], nas consideradas velocidades de 7,0 (Figura 44) e 10,0 km h⁻¹ (Figura 45), apresentou modelos semelhantes.

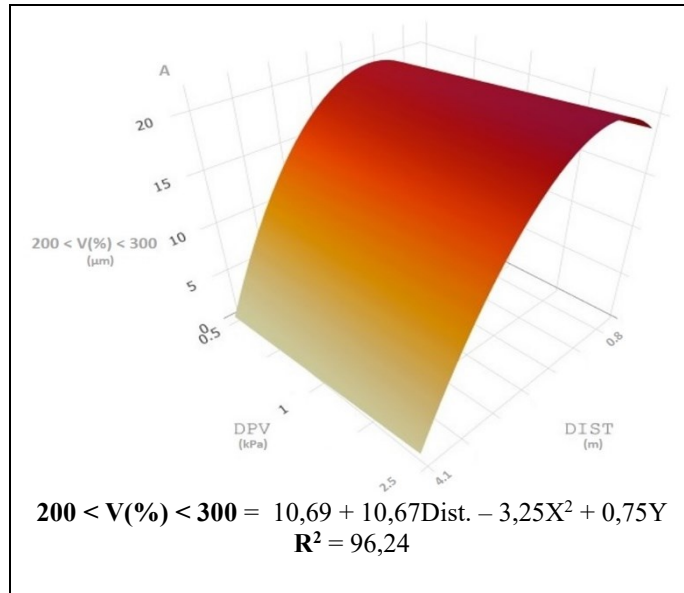


Figura 44 – Influência dos DPVs em 200 μm < V(%) 300 μm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h⁻¹.

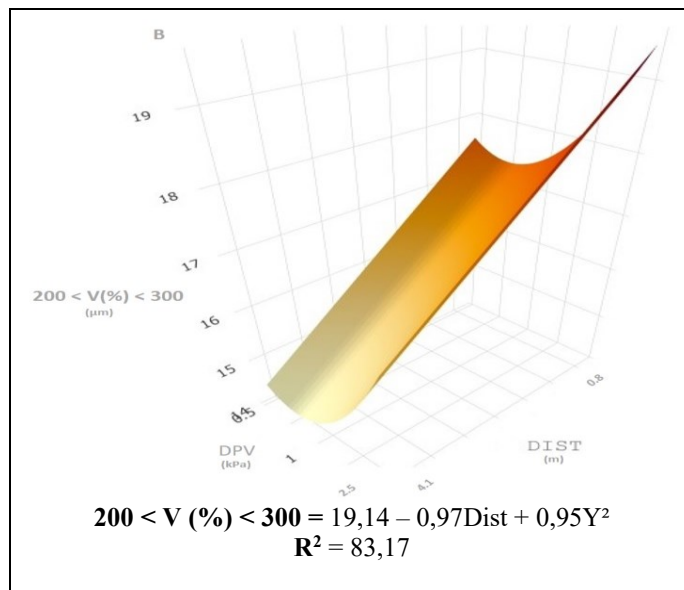


Figura 45 – Influência dos DPVs em 200 μm < V (%) 300 μm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 10,0 km h⁻¹.

Em ambas as velocidades, essa variável-resposta alcançou seus maiores percentuais registrados na extremidade final do túnel de vento (ponto de máxima). A influência do DPV (efeito quadrático positivo) abaixo de 1,0 kPa, nessas velocidades, foi confirmada nessa variável-resposta, tendo sido observado aumento nos valores do percentual dessa classe de gotas.

Em velocidade acima de 7,0 km h⁻¹, constatou-se que quanto menor o DPV, maior o incremento nos valores de 200 µm < V (%) < 300 µm. A diferença de porcentagem dessa classe de gotas entre ambas as velocidades representou 1,05%. Ocorreu redução da suscetibilidade dessas gotas a deslocamentos após a aplicação, uma vez que elas têm diâmetro classificado como médio pela ASAE/ASABE S572.1 (ASABE, 2009). Essa averiguação está em consonância com os resultados de Murphy, Miller e Parkin (2000), que reportam que gotas superiores a 200 µm são menos predispostas a um desvio de percurso devido a condições adversas.

5.3.8. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro entre 300 e 400 micrometros [300 µm < V (%) < 400 µm]

A porcentagem do volume de gotas com diâmetro entre trezentos e quatrocentos micrometros [300 µm < V (%) < 400 µm], na velocidade de 7,0 km h⁻¹ (Figura 46), apresentou os seus maiores percentuais (ponto de máxima) no centro do túnel de vento. Já na velocidade de 3,0 km h⁻¹ (Figura 47), apresentou queda (ponto de mínima) na extremidade inicial do túnel de vento.

Ainda na velocidade de 3,0 km h⁻¹, a variável-resposta em questão sofreu redução nos valores de seus percentuais com o aumento da distância (efeito quadrático negativo) ao longo do túnel de vento, juntamente com DPVs acima de 1,5 kPa.

O fator que influenciou o comportamento do percentual dessa classe de gotas na velocidade de 7,0 km h⁻¹ foi o déficit de pressão de vapor (efeito quadrático negativo) abaixo de 1,0 kPa. Neste caso, a variável-resposta 300 µm < V (%) < 400 µm aumentou seus valores percentuais.

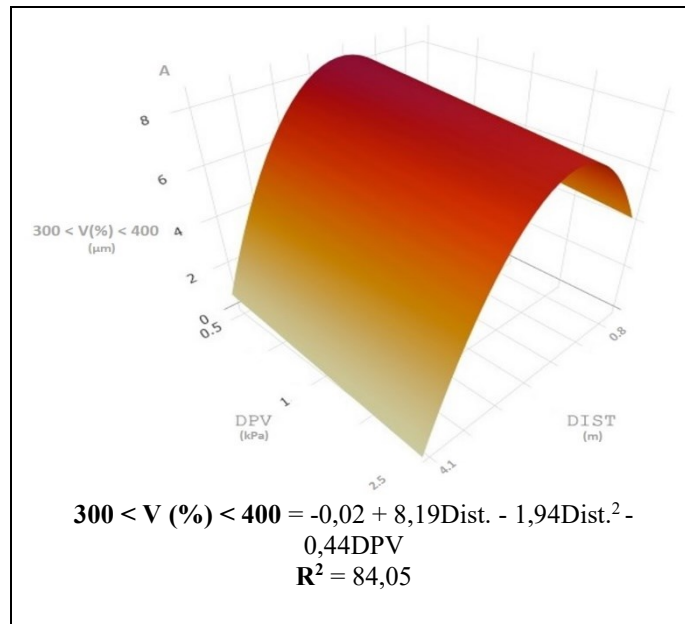


Figura 46 – Influência dos DPVs em $300 \mu\text{m} < V (\%) < 400 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $3,0 \text{ km h}^{-1}$.

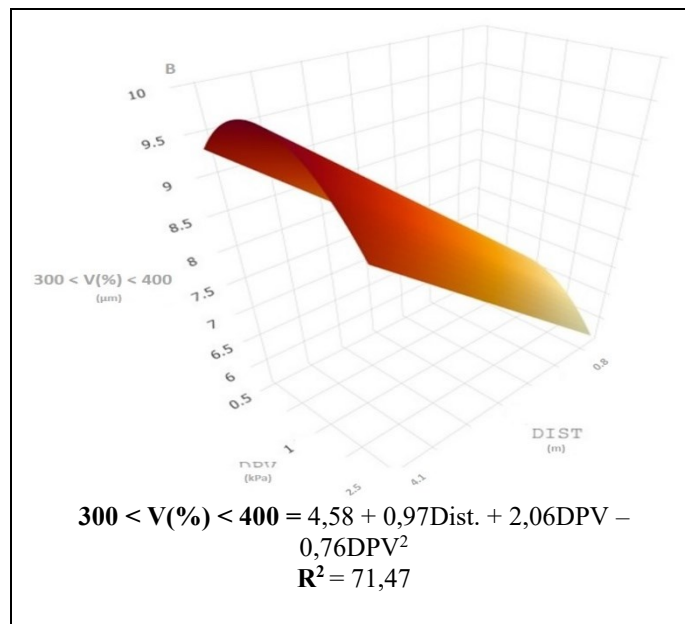


Figura 47 – Influência dos DPVs em $300 \mu\text{m} < V (\%) < 400 \mu\text{m}$, considerando as distâncias e a velocidade do ar de $7,0 \text{ km h}^{-1}$.

A diferença entre os percentuais das médias dessa variável, nas duas velocidades avaliadas, foi de 4,48%. Essa classe de gotas está sujeita a reduzidos deslocamentos pós- pulverização, uma vez que o diâmetro das gotas é classificado como grosso, segundo a ASAE/ASABE S572.1 (ASABE, 2009). Essas constatações convergem para as descritas por Tobi et al. (2011), autores que ressaltam que os percentuais dessa classe de gotas tendem a diminuir com o aumento do DVP, proporcionando uma evaporação que, por sua vez, reduz o diâmetro de suas gotas, alterando, assim, a classificação do espectro de gotas.

5.3.9. Influência das condições climáticas na porcentagem do volume de gotas com diâmetro maior que 400 micrometros [V (%) > 400 µm]

A porcentagem do volume de gotas com diâmetro maior que quatrocentos micrometros variável-resposta V (%) > 400 µm, na velocidade de 7,0 km h⁻¹ (Figura 48), apresentou seus maiores percentuais abaixo de 0,7 kPa e os menores acima de 1,5 kPa, uma vez que, nessa velocidade, o que influenciou o comportamento da variável-resposta foi o DPV. O percentual dessa classe de gotas estava praticamente isenta de deslocamentos após a aplicação, uma vez que elas apresentam diâmetro classificado como muito grosso, pela ASAE/ASABE S572.1.

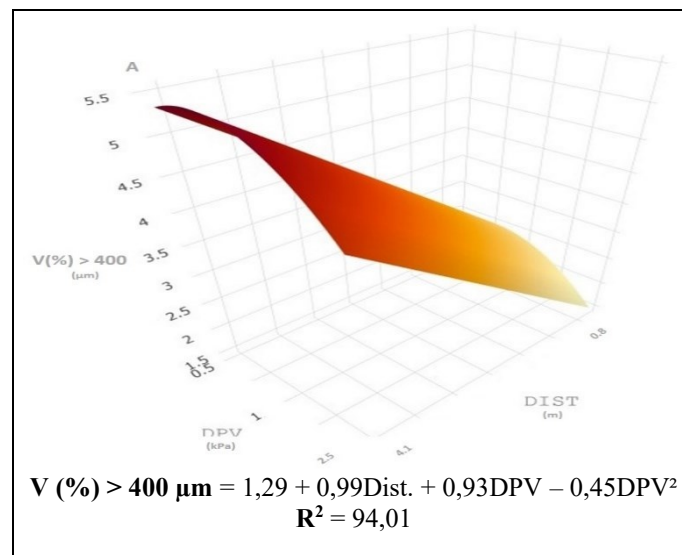


Figura 48 – Influência dos DPVs no V (%) > 400 µm, considerando as distâncias e a velocidade do ar de 7,0 km h⁻¹.

Arvidsson, Bergström e Kreuger (2011) concluíram que gotas classificadas como grossas, quando sofrem alterações de seus diâmetros por ações evaporativas, permanecem pouco suscetíveis a possíveis ações de deriva, visto que, embora a classificação de seu espectro seja alterada, essas gotas continuam sendo ainda de um tamanho ideal para evitar tais desvio. Esse porcentual correspondeu a 1,29 do volume aplicado, quando se avaliou essa porcentagem dessa classe de gotas.

6. CONCLUSÕES

As perdas por deriva chegaram a uma distância de 4,1 m, quando se utilizou o analisador de partículas a laser, sob dependência das condições ambientais momentâneas.

A velocidade do ar provocou alta deriva em gotas abaixo de 100 μm . As gotas associadas a altos valores de déficits de pressão de vapor influenciaram alguns parâmetros do espectro da população de gotas. A velocidade de vento é o principal fator de influência na deriva, mas o déficit de pressão de vapor também pode ser relevante nesse processo.

O diâmetro da mediana volumétrica (Dv_{50}) aumentou suas médias em combinações de DPVs abaixo de 0,7 kPa e velocidades acima de 7,0 km h^{-1} , e perdeu valores em condições de iguais velocidades e com DPVs acima de 1,5 kPa.

A porcentagem do volume pulverizado composto por gotas com diâmetro menor que 100 μm acarretaram perdas em suas porcentagens, quando expostas a velocidade de 3 km h^{-1} , e déficits de pressão de vapor acima de 1,0 kPa. Portanto, os altos valores do déficit de pressão de vapor influenciaram o comportamento dessa classe de gotas.

A porcentagem do volume pulverizado composto por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm acarretaram perdas em suas porcentagens, quando expostas às seguintes combinações: velocidade de 3 km h^{-1} e déficits de pressão de vapor acima de 1,0 kPa; e velocidades acima de 7,0 km h^{-1} e DPVs superiores a 1,5 kPa. Nesse caso, os altos valores do déficit de pressão de vapor também influenciaram o comportamento dessa classe de gotas.

A amplitude relativa sofreu constantes aumentos de seu valor no centro do túnel de vento, devido à pequena turbulência presente nessa região. Essa turbulência ocorreu pelo fato de o centro do túnel de vento ser a região onde a velocidade do ar atua com maior pressão, por ser um local afastado das saídas de ar presentes nas extremidades do próprio túnel.

Em combinações do déficit de pressão de vapor acima de 1,5 kPa e velocidade de 10 km h^{-1} , ocorreu redução do volume pulverizado. Portanto, velocidades acima da recomendada na pulverização podem reduzir o volume pulverizado durante a aplicação.

REFERÊNCIAS

AL HEIDARY, M.; DOUZALS, J. P.; SINFORT, C.; VALLET, A. Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: a literature review. **Crop Protection**, v. 63, p. 120-130, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.05.006>

ALVARENGA, Cleyton Batista de; TEIXEIRA, Mauri Martins; CECON, Paulo Roberto; SIQUEIRA, Dalmo Lopes de; SASAKI, Robson Shigueaki; RODRIGUES, Denilson Eduardo. Déficit de pressão de vapor d'água no ar na distribuição de líquido utilizando um pulverizador hidropneumático. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 2, p. 81-87, 2013. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.013>

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASABE S572.1 Droplet size classification**. St. Joseph, MI: ASABE, 2009. 4 p.

ARVIDSSON, Tommy; BERGSTRÖM, Lars; KREUGER, Jenny. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. **Pesticide Management Science**, v. 67, n. 5, p. 586-598, 2011. <https://doi.org/10.1002/ps.2114>

BARGER, E. L.; LILJEDHAL, J. B.; CARLETON, W. M.; McKIBBEN, E. G. **Tratores e seus motores**. São Paulo: Edgar Blücher, 1966. 398 p.

BISCARO, Guilherme Augusto. **Meteorologia agrícola básica**. Cassilândia: UNIGRAF, 2007. 87 p. (Série Engenharia, 1).

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. Uma visão geral sobre engrenagens. In: BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia**. 8.ed. São Paulo: McGraw Hill, 2011. p. 680-739.

BUENO, Mariana Rodrigues. **Tecnologia de aplicação aérea e terrestre na cultura da batata**. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

BUTLER ELLIS, M. C.; MILLER, P. C. H. The silsoe spray drift model: a model of spray drift for the assessment of non-target exposures to pesticides. **Biosystems Engineering**, v. 107, n. 3, p. 169-177, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.09.003>

BUTLER ELLIS, M. C.; LANE, A. G.; O'SULLIVAN, C. M.; MILLER, P. C. H.; GLASS, C. R. Bystander exposure to pesticide spray drift: new data for model development and validation. **Biosystems Engineering**, v. 107, n. 3, p. 162-168, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.05.017>

CARVALHO, Fernando Kassis; ANTUNIASSI, Ulisses Rocha; MOTA, Alisson Augusto Barbieri; CHECHETTO, Rodolfo Glauber; GANDOLFO, Ulisses Delvaz. Adjuvantes na deposição de aplicações aéreas e terrestres. **Energia na Agricultura**, v. 28, n. 4, p. 215-221, 2013. <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2013v28n4p215-221>

CHECHETTO, Rodolfo Glauber; ANTUNIASSI, Ulisses Rocha; MOTA, Alisson Augusto Barbieri; CARVALHO, Fernando Kassis; SILVA, Anne Caroline Arruda; VILELA, Caroline Michels. Influência de pontas de pulverização e adjuvantes no potencial de redução de deriva em túnel de vento. **Semina**, v. 34, n. 1, p. 37-46, 2013. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n1p37>

CRUZ, Cosme Damião. **Programa GENES - versão windows**: aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa: UFV, 2001. 648 p.

CUNHA, João Paulo Arantes Rodrigues da. Simulação da deriva de agrotóxicos em diferentes condições de pulverização. **Ciência e Agroecologia**. v. 32, n. 5, p. 1616-1621, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500039>

DE SCHAMPHELEIRE, Mieke; NUYTENS, David; BAETENS, Katrijn; CORNELIS, Wim; GABRIELS, Donald; SPANOGHE, Pieter. Effects on pesticide spray drift of the physicochemical properties of the spray liquid. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 409-420, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9089-6>

DERKSEN, R. C.; OZKAN, H. Erdan; FOX, R. D.; BRAZEE, R. D. Droplet spectra and wind tunnel evaluation of venturi and pre-orifice nozzles. **Transactions of the ASAE**, v. 42, n. 6, p. 1573-1580, 1999. <https://doi.org/10.13031/2013.13322>

DONKERSLEY, P.; NUYTENS, D. A meta analysis of spray drift sampling. **Crop Protection**, v. 30, n. 7, p. 931-936, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.03.020>

DORNELLES, Marçal Elizandro; SCHLOSSER, José Fernando; BOLLER, Walter; RUSSINI, Alexandre; CASALI, André Luis. Inspeção técnica de tratores e pulverizadores utilizados em pulverização agrícola. **Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 1, p. 36-43, 2011. <https://doi.org/10.13083/reveng.v19i1.222>

DURIGAN, J. C. **Comportamento de herbicidas no ambiente**. In: SEMINÁRIO TÉCNICO SOBRE PLANTAS DANINHAS E O USO DE HERBICIDAS EM REFLORESTAMENTO, 1989, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBS/ABRACAV/SIF, 1989.

FERGUSON, J. Connor; O'DONNELL, Chris C.; CHAUHAN, Bhagirath S.; ADKINS, Steve W.; KRUGER, Greg R.; WANG, Ruobing; FERREIRA, Pedro Henrique Urach; HEWITT, Andrew J. Determining the uniformity and consistency of droplet size across spray drift reducing nozzles in a tunnel. **Crop Protection**, v. 76, p. 1-6, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.06.008>

FRITZ, Bradley K.; HOFFMANN, W. Clint; BAGLEY, W. E.; HEWITT, Andrew. Field scale evaluation of spray drift reduction technologies from ground and aerial application systems. **Journal of ASTM International**, v. 8, n. 5, 2011. <https://doi.org/10.1520/stp153720120013>

FRITZ, Bradley K.; HOFFMANN, W. Clint; BAGLEY, W. E. Effects of spray mixtures on droplet size under aerial application conditions and implications on drift. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 26, n. 1, p. 21-29, 2012. <https://doi.org/10.13031/2013.29467>

GANDOLFO, Marco A.; CARVALHO, Fernando K.; CHECHETTO, Rodolfo G.; GANDOLFO, Ulisses D.; MORAES, Eder D. de. Effect of working pressure at different spray nozzles on drift quantification in wind tunnel. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 66-73, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000100008>

GIL, Emílio; BALSARI, Paolo; GALLART, Montserrat; LLORENS, Jordi; MARUCCO, Paolo; ANDERSEN, Per Gummer; FÀBREGAS, Xavier; LLOP, Jordi. Determination of drift potential of different flat fan nozzles on a boom aprayer using a teste bench. **Crop Protection**, v. 56, p. 58-68, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.10.018>

GIMENES, M. J.; ZHU, H.; RAETANO, C. G.; OLIVEIRA, R. B. Dispersion and evaporation of droplets amended with adjuvants on soybeans. **Crop Protection**, v. 44, p. 84-90, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.10.022>

GUAZZELLI, Tiago Mencaroni. **Pulverizador pneumático autopropelido controlado e monitorado à distância para o tratamento fitossanitário de tomateiros**. 2018. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

GURGACZ, Flavio. **Utilização de barra auxiliar de pulverização de água para reduzir a deriva de defensivos agrícolas**. 2013. 53 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.

HILZ, Emilia; VERMEER, Arnoldus W. P. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction. **Crop Protection**, v. 44, p. 75-83, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.10.020>

HOFFMANN, W. Clint; FRITZ, Bradley K.; THORNBURG, Jonathan W.; BAGLEY, W. E.; BIRCHFIELD, Norman B.; ELLENBERGER, Jay. Spray drift reduction evaluations of spray nozzles using a standardized testing protocol. **Journal of ASTM International**, v. 7, n. 6, p. 3-11, 2010. <http://dx.doi.org/10.1520/JAI102820>

HUANG, Y.; DING, W.; THOMSON, S. J.; REDDY, K. N.; ZABLOTOWICZ, R. M. Assessing crop injury caused by aerially applied glyphosate drift using spray sampling. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 3, p. 725-731, 2012. <https://doi.org/10.13031/2013.41504>

HUITINK, G.; WALKER, J. T.; LAVY, T. L. Downwind deposition of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide (2,4-D) in invert emulsion. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 4, p. 1051-1056, 1990. <https://doi.org/10.13031/2013.31437>

HULL, H. M.; DAVIS, D. G.; STOLZENBERG, G. E. Action of adjuvants on plant surfaces. In: HULL, H. M.; DAVIS, D. G.; STOLZENBERG, G. E. **Adjuvants for herbicides**. Champaign: WSSA, 1982. p. 26-67.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Equipment for crop protection – Spraying equipment – Part 1: test methods for sprayer nozzles – ISO 5682-1**. Geneva: ISO, 1996. 5 p.

JUSTINO, Agler Mayon; MARTINS, Vitor Jucá Santos; LOMBA, Luiz Fernando Delboni. Plataforma eletrônica para controle da deriva na pulverização de agrotóxicos. **Computer on the Beach**, p. 543-545, 2015.

<https://doi.org/10.14210/cotb.v0n0.p543%20-%20545>

KOEPPEL, Wilhelm. **Climatología**: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.

MACIEL, Christiam Felipe Silva. **Perda por evaporação durante a pulverização hidráulica em diferentes condições meteorológicas**. 2016. 69 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

MATTHEWS, G. A. **Pesticides application methods**. 2.ed. England: Longman Scientific & Technical, 1992. 405 p.

MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods**. Malden: Blackwell, 2000. 432 p.

MATUO, T. **Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas**. Jaboticabal: FUNEP, 1990. 139 p.

MAYBANK, John; YOSHIDA, Ken; GROVER, Raj. Spray drift from agricultural pesticide applications. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 28, n. 10, p. 1009-1014, 1978. <https://doi.org/10.1080/00022470.1978.10470699>

MELLO, Mário Pupin; PETERNELLI, Luiz Alexandre. Algo sobre o R. In: MELLO, Mário Pupin; PETERNELLI, Luiz Alexandre. **Conhecendo o R**: uma visão mais que estatística. Viçosa: UFV, 2013. p. 15-24.

MOTA, Alisson Augusto Barbieri. **Quantificação do ar incluído e espectro de gotas de pontas de pulverização em aplicações com adjuvantes**. 2011. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.

MOTA, Alisson Augusto Barbieri; ANTUNIASSI, Ulisses. Influência de adjuvantes no espectro de gotas de ponta com indução de ar. **Energia na Agricultura**, v. 28, n. 1, p. 1-5, 2013. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2013v28n1p01-05>

MURPHY, S. D.; MILLER, P. C. H.; PARKIN, C. S. The effect of boom section and nozzle configuration on the risk of spray drift. **Journal of Agricultural Engineering Resource**, v. 75, n. 2, p. 127-137, 2000. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0491>

NASCIMENTO, Alexandre Ballarotti; OLIVEIRA, Gustavo Migliorini de; BALAN, Marcelo Gonçalves; HIGASHIBARA, Leandro Ruyiuti; ABI-SAAB, Otavio Jorge Grigoli. Deposição de glifosato e utilização de adjuvante para diferentes pontas de pulverização e horário de aplicação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 5, n. 2, p. 105-110, 2012. <https://doi.org/10.5777/PAeT.V5.N2.08>

NASCIMENTO, Alexandre Ballarotti; OLIVEIRA, Gustavo Migliorini de; FONSECA, Inês Cristina de Batista; ABI-SAAB, Otavio Jorge Grigoli; CANTERI, Marcelo Giovanetti. Determinação do tamanho da amostra de papéis hidrossensíveis em experimentos ligados à tecnologia de aplicação. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 2687-2696, 2013.

NUYTTENS, David; TAYLOR, W. A.; DE SCHAMPHELEIRE, Mieke; VERBOVEN, P.; DEKEYSER, D. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 3, p. 271-280, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.001>

NUYTTENS, David; DE SCHAMPHELEIRE, Mieke; VERBOVEN, P.; SONCK, B. Comparison between indirect and direct spray drift assessment methods. **Biosystems Engineering**, v. 105, n. 1, p. 2-12, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.08.004>

NUYTTENS, David; DE SCHAMPHELEIRE, Mieke; BAETENS, K.; BRUSSELMAN, E.; DEKEYSER, D.; VERBOVEN, P. Drift from field crop sprayers using an integrated approach: results of a five-year study. **Transactions of the ASABE**, v. 54, n. 2, p. 409-416, 2011. <https://doi.org/10.13031/2013.36442>

NUYTTENS, David; ZWERTVAEGHER, Ingrid K. A.; DEKEYSER, Donald. Spray drift assessment of different application techniques using a drift test bench and comparison with other assessment methods. **Biosystems Engineering**, v. 154, p. 14-24, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.09.013>

OLIVEIRA, Rone Batista de. **Caracterização funcional de adjuvantes em soluções aquosas**. 2011. 134 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

OLIVEIRA, Rone Batista de; ANTUNIASSI, Ulisses R.; MOTA, Alisson A. B.; CHECHETTO, Rodolfo G. Potential of adjuvants to reduce drift in agricultural spraying. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 5, p. 986-992, 2013.

OZKAN, H. Erdal; DERKSEN, Richard C. **Effectiveness of turbodrop and turbo teejet nozzles in drift reduction**. 29 abr. 2016. Disponível em: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-524>. Acesso em: 13 set. 2019.

PHILLIPS, J. C.; MILLER, P. C. H. Field and wind tunnel measurements of the airborne spray volume downwind of single flat-fan nozzles. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 72, n. 2, p. 161-170, 1999. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0359>

PICOT, J. J. C.; KRISTMANSON, D. D.; MICKLE, R. E.; DICKISON, R. B. B.; RILEY, C. M.; WIESNER, C. J. Measurements of folial and ground deposits in forestry aerial spraying. **Transactions of the ASAE**, v. 36, n. 4, p. 1013-1024, 1993. <https://doi.org/10.13031/2013.28428>

REED, J. P.; HALL, F. R.; RICK, S. K. Influence of temperature and relative humidity on the performance of thifensulfuron with various surfactants. In: FOY, Chester L. **Adjuvants for Agrichemicals**. Boca Raton: CRC Press, 1992. p. 255-272.

RODRIGUES, Hernani José Brazão; COSTA, Rafael Ferreira da; RIBEIRO, João Batista Miranda; SOUZA FILHO, José Danilo da Costa; RUIVO, Maria de Lourdes Pinheiro; SILVA JÚNIOR, João de Athaydes. Variabilidade sazonal da condutância estomática em um ecossistema de manguezal amazônico e suas relações com variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 189-196, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000200003>

SALCAS. **Termopar tipo K**: sensor termopar de temperatura. 2015. Disponível em: <https://www.salcas.com.br/termopar-tipo-k-sensor-termopar-de-temperatura-tipo-k>. Acesso em: 21 out. 2015.

SALYANI, M.; CROMWELL, R. P. Spray drift from ground and aerial applications. **Transactions of the ASAE**, v. 35, n. 4, p. 1113-1129, 1992. <https://doi.org/10.13031/2013.28708>

SANTIAGO, Humberto. **Pulverização aérea com adição de adjuvante para o controle da lagarta falsa medideira (*Pseudoplusia includens*)**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

SASAKI, Robson Shigueaki. **Resfriamento adiabático do ar para reduzir perdas por evaporação em pulverização com assistência de ar na barra**. 2014. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

TEPPER, Graeme. **Weather essentials for pesticide application**: grower edition. Kingston, Australia: GRDC, 2012. Disponível em: <https://grdc.com.au/resources-and-publications/all-publications/publications/2022/weather-essentials-for-pesticide-application>. Acesso em: 16 jan. 2019.

TETENS, V. Otto. Über einige meteorologische. **Zeitschrift Geophysic**, v. 6, p. 297-309, 1930.

THOMPSON, N.; LEY, A. J. Estimating spray drift using a random-walk model of evaporating drops. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 28, n. 5, p. 419-435, 1983. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(83\)90134-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(83)90134-8)

THOMSON, Steven; WOMAC, Alvin R.; MULROONEY, Joseph E. Reducing pesticide drift by considering propeller rotation effects from aerial application near buffer zones. **Sustainable Agriculture Research**, v. 2, n. 3, p. 41-51, 2013. <https://doi.org/10.5539/sar.v2n3p41>

TOBI, Ibrahim; SAĞLAM, Ramazan; KÜP, Ferhat; ŞAHİN, Hasan; BOZDOĞAN, Ali Musa; PIŞKIN, Bülent; SAGLAM, Cevdet; FAZLA, Daha. Determination of accuracy level of agricultural spraying application in Sanliurfa/Turkey. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 28, p. 6064-6072, 2011. <http://doi.org/10.5897/ajar11.721>

TORRENT, Xavier; GARCERÁ, Cruz; MOLTÓ, Enrique; CHUECA, Patrícia; ABAD, Raquel; GRAFULLA, Carmen; ROMÁN, Carla; PLANAS, Santiago. Comparison between standard and drift reducing nozzles for pesticide application in citrus: Part I. Effects on wind tunnel and field spray drift. **Crop Protection**, v. 96, p. 130-143, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.02.001>

VAISALA. **Sensor de umidade relativa e temperatura**. 2016. Disponível em: <https://www.vaisala.com/pt>. Acesso em: 13 out. 2016.

VAN DE ZANDE, J. C.; STALLINGA, H.; MICHELSEN, J. M. G. P.; VAN VELDE, P. Effect of width of spray-free buffer zones, nozzle type and air assistance on spray drift. **Aspects of Applied Biology**, v. 99, p. 255-263, 2010.

VILLALBA, J.; HETZ, E. Deriva de productos agroquímicos – efecto de las condiciones ambientales. In: MAGDALENA, J. Carlos; CASTILLO HERRÁN, Bernardo; DI PRINZIO, Alcides; HOMER BANNISTER, Ian; VILLALBA, Juana. **Tecnología de aplicación de agroquímicos**. Alto Valle, Argentina: Red CYTED/INTA, 2010. p. 45-54.

XU, Linyun; ZHU, Heping; OZKAN, H. Erdal; THISTLE, Harold W. Evaporation rate and development of wetted area of water droplets with and without surfactants at different locations on waxy leaf surfaces. **Biosystems Engineering**, v. 106, n. 1, p. 58-67, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.02.004>

XU, Linyun; ZHU, Heping; OZKAN, H. Erdal; BAGLEY, William E.; KRAUSE, Charles R. Droplet evaporation and spread on waxy and hairy leaves associated with type and concentration of adjuvants. **Pest Management Science**, v. 67, n. 7, p. 842-851, 2011.

YU, Z.; XU, T.; LI, J.; XU, T.; YOSHINO, T. Computational analysis of droplet mass and size effect on mist/air impingement cooling performance. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2013, p. 1-8, 2013. <https://doi.org/10.1002/ps.2122>

ZHU, H.; REICHARD, D. L.; FOX, R. D.; OZKAN, H. Erdal; BRAZEE, R. D. DRIFTSIM, a program to estimate drift distance of spray droplets. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 365-369, 1995. <https://doi.org/10.13031/2013.25750>