

CHRISTIAM FELIPE SILVA MACIEL

**PERDA POR EVAPORAÇÃO NA PULVERIZAÇÃO EM FUNÇÃO DAS
CONDIÇÕES PSICROMÉTRICAS DO AR**

Dissertação 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*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M152p
2013

Maciel, Christiam Felipe Silva, 1986-

Perda por evaporação na pulverização em função das condições psicrométricas do ar / Christiam Felipe Silva Maciel. – Viçosa, MG, 2013.

vii, 71f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Mauri Martins Teixeira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Equipamento de pulverização. 2. Pulverização.
3. Produtos químicos agrícolas - Aplicação. 4. Evaporação.
5. Gotas. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

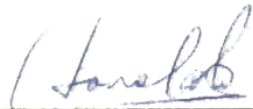
CDD 22. ed. 631.3

CHRISTIAM FELIPE SILVA MACIEL

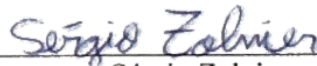
PERDA POR EVAPORAÇÃO NA PULVERIZAÇÃO EM FUNÇÃO DAS
CONDIÇÕES PSICROMÉTRICAS DO AR

Dissertação 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*.

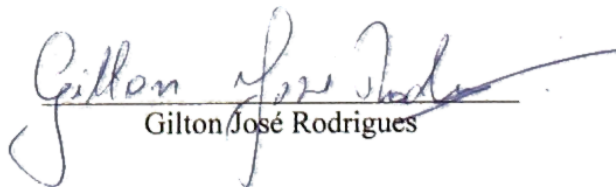
APROVADA: 19 de julho de 2013.



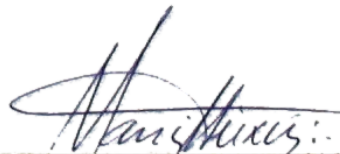
Haroldo Carlos Fernandes
(Coorientador)



Sérgio Zolnier
(Coorientador)



Gilton José Rodrigues



Mauri Martins Teixeira
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força para concluir mais esta fase da minha vida.

Aos meus pais, Ermano (*in memoriam*) e Dorinha, aos meus irmãos, Zenália, William e Natália, e aos meus padrinhos, Roque e Graça, pelo apoio, conselhos e incentivos dados durante toda a minha vida.

Ao professor Mauri Martins Teixeira, pela orientação, paciência, ajuda e pelos valiosos ensinamentos a mim passados.

A todos os amigos que conviveram comigo durante estes dois anos, principalmente aos amigos da Mecanização Agrícola e aos da república Jogatina, por terem sido fundamentais em todos os momentos.

À minha linda namorada Sheila, pelo apoio, conselhos, força e carinhos.

Aos professores Haroldo, Sérgio, Cecon e Edney, pelo ensinamento e auxílio na execução deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade me dada para realizar o curso de Pós-Graduação.

BIOGRAFIA

Christiam Felipe Silva Maciel, filho de Ermano Peixoto Maciel e Maria das Dores Silva Maciel, nasceu na cidade de Piranga – MG, no dia 20 de dezembro de 1986. Em março de 2005 ingressou-se no curso de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, vindo a formar em janeiro de 2010. Em março do mesmo ano, mudou-se para a cidade de Loudon – NH, Estados Unidos, para realização de estágio na empresa Pleasant View Gardens, permanecendo até fevereiro de 2011. Em agosto deste ano, iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em julho de 2013.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
Objetivo geral.....	vii
Objetivos específicos	vii

ARTIGO I - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS PONTAS HIDRÁULICAS LD 11002 E MAG-2

RESUMO	2
ABSTRACT	3
INTRODUÇÃO.....	4
MATERIAL E MÉTODOS.....	6
RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
CONCLUSÕES	22
BIBLIOGRAFIA.....	22

ARTIGO II - EFEITO DO DÉFICIT DE PRESSÃO DE SATURAÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA NO AR NO ESPECTRO DE GOTAS PULVERIZADAS

RESUMO	27
ABSTRACT	28
INTRODUÇÃO.....	29
MATERIAL E MÉTODOS.....	31
RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
CONCLUSÕES	42
BIBLIOGRAFIA.....	43

ARTIGO III - EFEITO DO DÉFICIT DE PRESSÃO DE SATURAÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA NA EVAPORAÇÃO DO LÍQUIDO PULVERIZADO

RESUMO	48
ABSTRACT	49
INTRODUÇÃO.....	49
MATERIAL E MÉTODOS.....	52
RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
CONCLUSÕES	67
BIBLIOGRAFIA.....	68

RESUMO

MACIEL, Christiam Felipe Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2013, **Perda por evaporação na pulverização em função das condições psicrométricas do ar**. Orientador: Mauri Martins Teixeira. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier, Paulo Roberto Cecon e Edney Leandro da Vitoria.

A perda por evaporação de líquido pulverizado causa ineficiência da aplicação de agrotóxicos, além de causar impacto ambiental e intoxicação de pessoas. Portanto, para garantir uma aplicação de agrotóxicos segura, com máxima eficiência e mínimo impacto ambiental, objetivou-se com este trabalho realizar a caracterização de pontas hidráulicas de pulverização, determinar o espectro de gotas em função das condições psicrométricas do ar, e estimar e modelar a perda de agrotóxicos por evaporação em função das condições psicrométricas do ar. Durante a caracterização da ponta hidráulica foram utilizados dois modelos de pontas para obtenção do perfil e da uniformidade de distribuição, além do espectro de gotas produzido por estas pontas. A simetria de distribuição também foi verificada a partir dos valores do perfil de distribuição. A determinação do espectro de gotas, e a estimativa e modelagem da perda de agrotóxicos por evaporação em função das condições psicrométricas do ar foram realizadas dentro de uma câmara climática para permitir a obtenção de vinte déficits de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}). A determinação do espectro de gotas foi feita empregando-se o analisador de partículas a laser modelo Spraytech. As pontas hidráulicas LD 11002 e MAG-2 não apresentaram uniformidade de distribuição satisfatória à altura de trabalho recomendada. A ponta LD 11002 apresentou assimetria e esta foi influenciada pela pressão de trabalho. O diâmetro de gotas produzido pelas pontas LD 11002 e MAG-2 reduziu com o aumento da pressão de trabalho. O aumento do DPV_{ar} aumentou o DMV, o Dv_{90} , o SPAN e a porcentagem do volume pulverizado composta por gotas maiores que $600 \mu m$, em contrapartida reduziu a porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e $200 \mu m$, entre 200 e $300 \mu m$, entre 300 e $400 \mu m$, entre 400 e $500 \mu m$ e entre 500 e $600 \mu m$. Mesmo obedecendo às condições climáticas recomendadas para a aplicação de agrotóxicos, houve perda do volume aplicado por evaporação. Para a ponta LD 11002 e pressão de trabalho de 300 kPa, a perda de agrotóxicos por evaporação pode alcançar 27% aproximadamente sob condições meteorológicas caracterizadas por baixa velocidade do ar, alta temperatura e baixa umidade relativa do ar.

ABSTRACT

MACIEL, Christiam Felipe Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July of 2013, **Pesticides evaporation depending on air psychrometric conditions**. Advisor: Mauri Martins Teixeira. Co-advisors: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier, Paulo Roberto Cecon and Edney Leandro da Vitoria.

Pesticides loss by evaporation causes inefficiency of spraying, besides causing environmental impacts and intoxications. Thus, to ensure a safe pesticides application, with maximum efficiency and minimum environmental impact, the aim of this work was to characterize the hydraulic spray nozzles, determine the droplet spectrum depending on air psychrometric conditions, and to estimate and to model pesticides evaporation depending on air psychrometric conditions. During the nozzle characterization two models of nozzle were used to obtain the pattern and uniformity of distribution, as well as the droplet spectrum. The symmetry of distribution was also obtained from the data of pattern of distribution. The determination of droplet spectrum, and the estimation and modeling of pesticides evaporation depending on air psychrometric conditions were carried out inside of a climatic chamber to obtain twenty air vapor pressure deficit (VPD_{air}) levels. The determination of droplet spectrum was performed by the laser particle analyzer model Spraytech. The nozzles LD 11002 and MAG-2 did not have good uniformity of distribution for the boom height specified by the manufacturer. The nozzle LD 11002 showed asymmetry and this was influenced by working pressure. The droplets diameter produced by the nozzles LD 11002 and MAG-2 reduced with increasing the working pressure. Increasing VPD_{air} , increased the VMD, the Dv_{90} , the SPAN and the percentage of sprayed volume comprised by droplets larger than 600 μm , on the other hand reduced the percentage of sprayed volume comprised by droplets with diameter between 100 and 200 μm , between 200 and 300 μm , between 300 and 400 μm , between 400 and 500 μm and between 500 and 600 μm . Even obeying the recommended climatic conditions for pesticides application, there is loss of sprayed volume by evaporation. For the spray nozzle LD 11002 and working pressure of 300 kPa, the pesticides loss by evaporation can reach approximately 27 % under weather conditions characterized by low wind velocity, high air temperature and low relative humidity.

Objetivo geral

Determinar o espectro de gotas e estimar a perda de agrotóxicos por evaporação em função das condições psicrométricas do ar, visando garantir uma aplicação de agrotóxicos eficaz e eficiente.

Objetivos específicos

1. Avaliar as características técnicas de pontas de pulverização hidráulica;
2. Determinar o espectro de gotas em função das condições psicrométricas do ar;
3. Estimar perdas de agrotóxicos por evaporação em função das condições psicrométricas do ar.

Artigo I

Características técnicas das pontas hidráulicas LD 11002
e MAG-2

Características técnicas das pontas hidráulicas LD 11002 e MAG-2

RESUMO

A ponta hidráulica de pulverização é o principal componente da pulverização hidráulica, assim uma eficiente aplicação de agrotóxico somente é possível quando se dispõe de pontas que propiciem distribuição volumétrica satisfatória e espectro de gotas uniforme. Deste modo, objetivou-se com este trabalho realizar a caracterização das pontas hidráulicas de pulverização LD 11002 e MAG-2. O ensaio da determinação do perfil e da uniformidade de distribuição do jorro foi montado em esquema fatorial $2 \times 3 \times 4$, constituído por dois modelos de pontas hidráulicas, três alturas da barra de pulverização e quatro pressões de trabalho, analisados em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições para o estudo da uniformidade de distribuição e quinze repetições para o perfil de distribuição. Com os valores do perfil de distribuição foi verificada a simetria de distribuição para a ponta LD 11002. O espectro de gotas foi determinado empregando-se o analisador de partículas a laser modelo Spraytech, e o ensaio foi montado em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (quatro pressões de trabalho) e com vinte e cinco repetições. As duas pontas não apresentaram distribuição satisfatória à altura de 0,5 m. A ponta LD 11002 apresentou assimetria e esta foi influenciada pela pressão de trabalho. O diâmetro de gotas produzido pelas pontas LD 11002 e MAG-2 reduziu com o aumento da pressão de trabalho.

Palavras-chave: Tecnologia de aplicação, pontas hidráulicas, espectro de gotas.

Technical characteristics of the spray nozzles LD 11002 and MAG-2

ABSTRACT

The spray nozzle is the main component of the hydraulic spraying, thus an efficient pesticides application is only possible with nozzles that provide satisfactory volumetric distribution and uniform droplet spectrum. Therefore, the aim of this work was to characterize the hydraulic spray nozzles LD 11002 and MAG-2. The experiment to determine the pattern and uniformity of distribution was arranged in a factorial scheme $2 \times 3 \times 4$, composed of two models of nozzles, three boom heights and four working pressures, analyzed in completely randomized design, with three replications for uniformity of distribution and fifteen replications for pattern of distribution. Symmetry of distribution for the nozzle LD 11002 was verified by the data from pattern of distribution. The determination of droplet spectrum was performed by the laser particle analyzer model Spraytech, and the experiment was arranged in a completely randomized design with four treatments (four working pressures) and a total of twenty-five replications. The nozzles LD 11002 and MAG-2 did not have uniform distribution at the height of 0.5 m. The nozzle LD 11002 showed asymmetry and it was influenced by working pressure. The droplets diameter produced by the nozzles LD 11002 and MAG-2 reduced with increasing the working pressure.

Keywords: Spraying technology, hydraulic nozzles, droplets spectrum.

INTRODUÇÃO

O objetivo da tecnologia de aplicação é otimizar a deposição de agrotóxicos no alvo com mínimas perdas para o ambiente (MATTHEWS, 2000). Porém, para conseguir a melhor eficiência de aplicação diversos fatores devem ser levados em consideração, desde uma simples ponta hidráulica ao próprio alvo que se deseja atingir com o agrotóxico.

A ponta hidráulica de pulverização é o principal componente da pulverização hidráulica, assim uma eficiente aplicação de agrotóxicos utilizando pulverizadores hidráulicos de barra somente é possível quando se dispõe de pontas de pulverização que propiciem distribuição volumétrica satisfatória e espectro de gotas uniforme (CUNHA *et al.*, 2007).

A uniformidade de distribuição volumétrica do conjunto de pontas dispostas na barra, depende do perfil de distribuição individual das pontas (ALVARENGA *et al.*, 2012), já o perfil de distribuição depende da vazão nominal, do ângulo de abertura do jorro e da altura da ponta sobre o alvo (CUNHA; SILVA, 2010; VIANA *et al.*, 2007). De acordo com a norma europeia EN 12761-2 (2001) o coeficiente de variação não deve exceder 7 % para uma altura da barra e uma pressão de trabalho estabelecidas pelo fabricante, por outro lado, para as outras alturas da barra e pressões especificadas pelo fabricante, o coeficiente não deve exceder 9 %. Porém Boller e Raetano (2011) dizem que é comum as pontas do tipo cone vazio apresentarem coeficiente de variação maior que 30 % ao longo da barra com pontas novas, e isso ocorre uma vez que as pontas de cone vazio apresentam picos de deposição de volume na extremidade do perfil de distribuição, e ao sobrepor jatos adjacentes, estes picos ficam ainda mais elevados, aumentando o coeficiente de variação.

Outro fator que pode ocasionar baixa uniformidade de distribuição volumétrica é a assimetria da distribuição do jorro da ponta hidráulica, que pode resultar em falta ou excesso de cobertura de gotas ao longo da faixa tratada, uma vez que uma distribuição simétrica apresentaria um coeficiente de assimetria igual à zero (VITORIA *et al.*, 2011).

Deve-se, também, ficar atento à disposição das pontas hidráulicas na barra de pulverização, pois as pontas do tipo leque devem estar previamente posicionadas de modo a apresentar uma defasagem angular de 5 ° em relação à barra, o que evita o choque entre jatos adjacentes, e que, conseqüentemente, prevenirá a coalescência das gotas pulverizadas, permitindo a sobreposição (MATTHEWS, 2000).

Um fato que costuma ser bastante negligenciado no campo é a condição de conservação em que uma ponta hidráulica se encontra, pois com o tempo de uso esta ponta se desgasta ou mesmo é entupida por alguma partícula e, assim, sua vazão é alterada. Com isso, faz-se necessário conferir se a vazão da ponta está de acordo com o que é apresentado pelo fabricante e quando há alguma alteração, todas as pontas que se encontrem na barra devem ser trocadas. Ainda, de acordo com a norma europeia EN 12761-2 (2001), a vazão de cada ponta individual não deve variar mais que 10 % da vazão fornecida pelo fabricante, porém a vazão de pontas numa barra de pulverização não deve variar mais que 5 % do valor médio de todas as pontas nessa mesma barra.

A altura de trabalho além de influenciar na qualidade da uniformidade de distribuição do conjunto de pontas dispostas na barra, interfere reduzindo a deriva da pulverização quando esta altura é reduzida (NUYTTENS *et al.*, 2006). Isso se deve ao fato que à medida que aumenta a altura de lançamento das gotas, maior será a influência da velocidade do vento sobre as mesmas e maior a tendência de deriva (CUNHA, 2008b; SASAKI *et al.*, 2011). Entretanto, antes de alterar a altura da barra, deve-se saber se o conjunto de pontas apresentará boa uniformidade de distribuição para esta nova altura.

O tamanho de gota produzido pela ponta hidráulica tem efeito direto na eficácia biológica do agrotóxico aplicado, assim como nos riscos ambientais (NUYTTENS *et al.*, 2007). Com a produção de gotas finas, geralmente se obtém boa cobertura superficial e uniformidade de distribuição de calda, mas essas gotas podem evaporar em condições de baixa umidade relativa ou serem levadas pela corrente de ar (CUNHA *et al.*, 2007). Em geral, valores de DMV inferiores a 250 μm indicam risco potencial de deriva, que acontece principalmente em virtude das gotas menores que 100 μm , em contrapartida, valores de DMV superiores a 500 μm sugerem problemas de escorrimento, que comumente ocorrem com gotas maiores que 800 μm (CUNHA *et al.*, 2003). Com isso, reduzindo-se a pressão para minimizar a fração de gotas menores e iguais a 100 μm , pode ser um possível meio de redução de deriva (ARVIDSSON *et al.*, 2011). Contudo, deve-se limitar a utilizar as pressões estabelecidas pelo fabricante da ponta de pulverização, uma vez que ao utilizar pressões fora da faixa estabelecida pode-se alterar o ângulo de abertura do jorro, o que alterará o perfil de distribuição e conseqüentemente a uniformidade de distribuição do jorro.

O tipo da ponta, assim como a vazão nominal, altera o espectro de gotas. Nuyttens *et al.* (2007) mostram que para a mesma vazão nominal e pressão de pulverização, pontas cone produzem o espectro com gotas mais finas, seguido pelas

pontas leque padrão, leque de deriva reduzida e pontas com indução de ar. Quanto maior a vazão nominal da ponta, maior é o tamanho das gotas produzidas por pontas do mesmo modelo, que é explicado pelo fato que o aumento do orifício de saída nos bicos proporciona um fracionamento menor do líquido, o que gera gotas de tamanho maior (CUNHA *et al.*, 2004). Nuyttens *et al.* (2009) afirmam que o tipo e a vazão nominal da ponta influenciam o potencial de deriva. Quanto maior a vazão nominal, maior serão os valores de porcentagem de redução potencial de deriva, porém, o efeito do tipo de ponta é mais importante para as menores vazões nominais de ponta.

Além de influenciar na deriva, o espectro de gotas tem papel importante na cobertura do alvo. Pontas que produzem gotas menores proporcionam maior densidade de gotas depositadas sobre a superfície alvo (CUNHA, *et al.*, 2004). Assim, quando não se obtém uma densidade de gotas desejada para um determinado tratamento, o ideal pode ser simplesmente a troca para uma ponta que produza gotas menores e, portanto, produzindo uma maior densidade de gotas.

Hoje no mercado existem diferentes aparelhos que analisam o tamanho das gotas produzidas por uma ponta hidráulica, e um desses aparelhos é o Spraytech, fabricado pela Malvern Instruments Co. Este aparelho utiliza a técnica da difração de laser para a medição do tamanho das gotas pulverizadas. Com esta técnica é feita a medição da intensidade de luz que é dispersa à medida que um feixe de laser passa através de um jorro pulverizado. Os dados são então analisados para calcular o tamanho das gotas da pulverização.

Deste modo, para garantir uma aplicação com a máxima eficiência, objetivou-se com este trabalho, fazer a caracterização das pontas hidráulicas LD 11002 e MAG-2, determinando o perfil, a simetria e a uniformidade de distribuição, além do espectro de gotas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas (LADA), pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa – Minas Gerais. O clima da região é, de acordo com a classificação de Köppen (1948), 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 (VIANELLO; ALVES, 2002).

O ensaio da determinação do perfil e da uniformidade de distribuição do jorro foi montado em esquema fatorial 2 x 3 x 4, constituído por dois modelos de pontas hidráulicas de pulverização (LURMARK LD 11002 e MAGNO MAG-2), três alturas da barra de pulverização (0,40; 0,50 e 0,60 m) e quatro pressões de trabalho (100, 200, 300 e 400 kPa para as pontas LD 11002 e 400, 600, 800 e 1000 kPa para as pontas MAG-2), totalizando 24 tratamentos, analisados em delineamento inteiramente causalizados, com três repetições para o estudo da uniformidade de distribuição e quinze repetições para o perfil de distribuição, já que o perfil foi feito para as cinco pontas de cada modelo em três repetições, visando à minimização dos erros.

As cinco pontas hidráulicas de pulverização LURMARK LD 11002 e MAGNO MAG-2, respectivamente pontas do tipo leque e cone vazio, foram escolhidas para o ensaio através do sorteio de cinco pontas de um conjunto de vinte, seguindo a norma ISO 5682-1 (1996).

A determinação do perfil e da uniformidade de distribuição foram realizadas numa bancada de teste construída de acordo com a Norma ISO 5682-1 (1996), localizada no LADA. Esta bancada possui dimensões de 2,0 m de comprimento e 1,0 m de largura, constituída por canaletas em forma de “V”, com 0,05 m de profundidade e largura. Na extremidade de cada canaleta, há uma proveta de 250 mL para obter o volume de líquido escoado. O pulverizador da bancada de teste é composto por uma bomba de pistão com vazão máxima de 20 L min⁻¹, sendo acionada por um motor elétrico de 220 V e potência equivalente a 2,2 kW. A bancada possui um regulador de pressão no início da barra porta-bicos, a qual é composta por cinco bicos. A altura de trabalho desta barra varia de 0,10 a 0,70 m.

Foi utilizado um manômetro da marca Famabras para aferir a pressão produzida pela bomba do pulverizador. Este manômetro é classificado como classe B, apresentando fundo de escala de 0 a 2500 kPa e divisão de 20 kPa. A calibração do mesmo foi feita com o auxílio de uma bomba de calibração por comparação, dotada de um manômetro padrão classe A3, marca Salcas, com precisão de 0,25 % e subdivisão de 10 kPa, obtendo, assim, a relação entre a pressão indicada e a real.

Anteriormente ao início dos ensaios, a vazão individual das pontas foram medidas utilizando uma proveta com volume máximo de 2000 mL e graduada de 20 em 20 mL, coletando-se o líquido jorrado durante um período de 60 s, obedecendo à norma ISO 5682-1 (1996). Para a determinação do perfil, as pontas foram colocadas individualmente na barra porta-bicos, já para a determinação da uniformidade, utilizou-se do conjunto das cinco pontas dispostas aleatoriamente na barra, com espaçamento de

0,50 m entre bicos. Ainda para a determinação da uniformidade, as pontas LD 11002 foram previamente ajustadas com uma chave para garantir defasagem angular e evitar o choque entre os jatos adjacentes. O tempo de duração para a coleta do líquido nas provetas também foi de 60 s.

Os volumes contidos em cada proveta, tanto para a determinação do perfil quanto para a determinação da uniformidade de distribuição, foram transformados em porcentagem de volume total pulverizado, conforme metodologia usada por Cunha e Silva (2010).

Após a coleta dos dados obtidos com o conjunto das cinco pontas, foi calculado o coeficiente de variação (CV) para determinar a uniformidade de distribuição, a partir da Equação 1:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} 100 \quad \text{Eq.1}$$

em que

CV = coeficiente de variação, (%);

s = desvio padrão da amostra, (mL); e,

\bar{x} = volume médio dos valores observados, (mL).

A determinação da simetria de distribuição de líquido da ponta LD 11002 foi feita através do segundo coeficiente de assimetria de Pearson (Equação 2), utilizando os valores obtidos na determinação do perfil de distribuição do líquido a 0,50 m da bancada de teste e para as quatro pressões estudadas, em metodologia proposta por Vitoria *et al.* (2011).

$$As = \frac{3(\bar{x} - M_d)}{s} \quad \text{Eq.2}$$

em que

As = segundo coeficiente de assimetria de Pearson (adimensional);

\bar{x} = média dos valores relativos de volume coletados na proveta por bico (%);

M_d = mediana dos valores relativos de volume coletados na proveta por bico (%); e,

s = desvio padrão dos valores relativos de volume coletados na proveta por bico (%).

O espectro de gotas das pontas hidráulicas foi determinado utilizando-se o analisador de partículas em tempo real modelo Spraytech (Malvern Instruments Co.). Este equipamento apresenta lente focal de 750 mm e foi calibrado para contabilizar gotas na classe de tamanho de 0,10 a 2.500 μm . Para a realização das pulverizações foi

utilizado uma bomba hidráulica, marca Yamaho, com rotação de 700 a 900 rpm, vazão nominal entre 8 e 11 L min⁻¹, potência de 0,75 a 1,12 kW e pressão máxima de 3516 kPa, de tal forma a propiciar as pressões de trabalho do pulverizador. A bomba foi acionada por um motor elétrico, marca Weg, com rotação de 3570 rpm e potência de 1,5 kW.

A pulverização do líquido sobre o analisador de partículas foi realizada de tal modo que todo o jorro da ponta passasse transversalmente pelo feixe luminoso emitido pelo laser. Com isso, foi montada sobre o analisador, uma barra de pulverização, e, ao final dessa barra, um motor elétrico foi instalado para permitir que a mesma gire, garantindo a análise de todo o jorro da ponta (Figura 1). Esta barra de pulverização é constituída por um bico e um manômetro, sendo este o mesmo utilizado na bancada de teste. O motor elétrico, instalado ao final da barra, é tipo CEP de 12 V e 7,5 A, com torque de 25 a 48 mN e rotação máxima de 10,47 rad s⁻¹ (100 rpm). As pontas LD 11002 foram instaladas a 0,30 m do feixe de laser emitido pelo analisador de partículas seguindo a norma ASAE S572.1 (2009). Para evitar que as gotas colidem com a lente do analisador de partículas, as pontas MAG-2 foram posicionadas a 0,12 m, seguindo indicações da norma da ASAE.



FIGURA 1 – Detalhe do analisador de partículas por difração do laser e da barra de pulverização

O estudo do espectro de gotas foi compreendido pelos seguintes indicadores: a) diâmetro da gota que divide a população de gotas, ordenadas crescentemente, em duas metades iguais em volume de líquido pulverizado (diâmetro da mediana volumétrica ou DMV); b) diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 10 % do volume total de líquido pulverizado (Dv_{10}); c) diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 90 % do volume total de líquido pulverizado (Dv_{90}); d) amplitude relativa ou SPAN, por definir a homogeneidade do diâmetro das gotas da pulverização, deste modo, quanto menor for este valor, mais homogêneo é o tamanho das gotas da amostra, e este é calculado pela Equação 3; e) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas menores que 100 μm ($\%V < 100$); f) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm ($100 < \%V < 200$); g) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 200 e 300 μm ($200 < \%V < 300$); h) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 300 e 400 μm ($300 < \%V < 400$); i) porcentagem do volume pulverizada composta por gotas com diâmetro entre 400 e 500 μm ($400 < \%V < 500$); j) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 500 e 600 μm ($500 < \%V < 600$); e k) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas maiores que 600 μm ($\%V > 600$).

$$\text{SPAN} = \frac{Dv_{90} - Dv_{10}}{Dv_{50}} \quad \text{Eq.3}$$

em que

SPAN = amplitude relativa (adimensional);

Dv_{90} = diâmetro da gota, abaixo do qual, se encontra 90 % do volume total de líquido pulverizado (μm);

Dv_{10} = diâmetro da gota, abaixo do qual, se encontra 10 % do volume total de líquido pulverizado (μm); e,

Dv_{50} = diâmetro da mediana volumétrica ou DMV (μm).

Para efeito da análise estatística do espectro de gotas, considerou-se delineamento inteiramente casualizado com quatro tratamentos (quatro pressões de trabalho) e vinte e cinco repetições. O experimento foi realizado para os dois modelos de pontas hidráulicas. As vinte e cinco repetições do experimento se devem ao fato que o estudo foi feito com as cinco pontas de cada modelo e utilizando cinco repetições para cada ponta, com o intuito de minimizar o erro.

Os dados foram analisados por meio da análise de regressão e estatística descritiva. Os modelos da análise de regressão foram escolhidos baseando na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste “t”, adotando-se o nível de 5 % de probabilidade no coeficiente de determinação ($R^2 = \text{SQRegressão}/\text{SQtratamento}$) e no comportamento da variância em estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

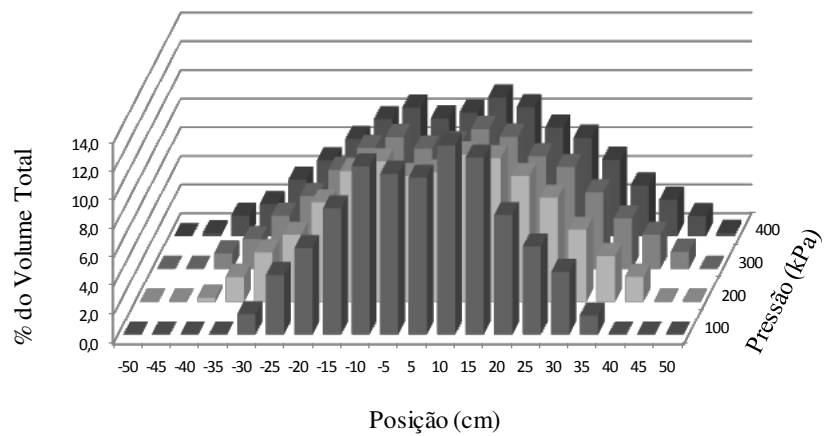
A temperatura durante a realização do trabalho variou de 21 a 25 °C e a umidade relativa ficou sempre superior a 70 %. O manômetro, utilizado durante os experimentos, mostrou valores similares ao apresentado pelo manômetro da bomba de aferição nas pressões utilizadas.

As vazões das pontas hidráulicas aumentaram de acordo com o aumento da pressão de trabalho. Tanto a vazão da ponta LD 11002, quanto da ponta MAG-2, atenderam à norma ISO 5682-1 (1996), com variação abaixo do limite de 10 % em comparação à vazão fornecida pelo fabricante (Quadro 1).

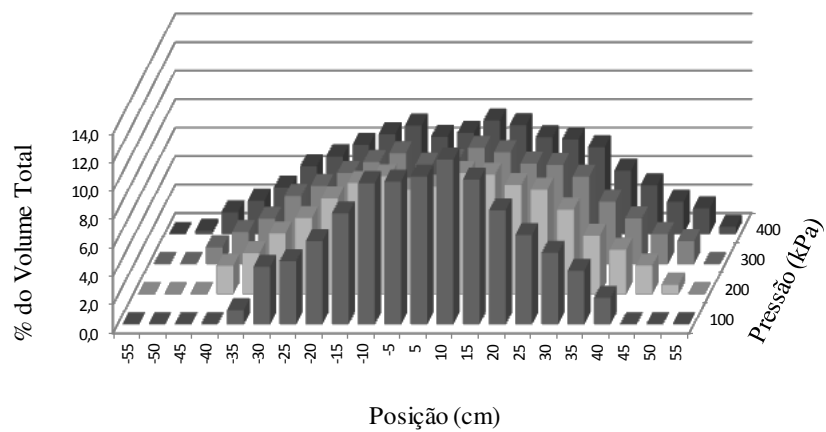
Quadro 1 – Comparação entre a vazão observada e a vazão fornecida pelo fabricante em função da pressão de trabalho para as pontas LD 11002 e MAG-2

Ponta	Pressão (kPa)	Vazão (L min ⁻¹)	Vazão Fabricante (L min ⁻¹)
LD	100	0,430	0,462
	200	0,602	0,653
	300	0,744	0,800
	400	0,859	0,924
MAG	400	0,643	0,640
	600	0,776	0,760
	800	0,886	0,890
	1000	0,987	1,000

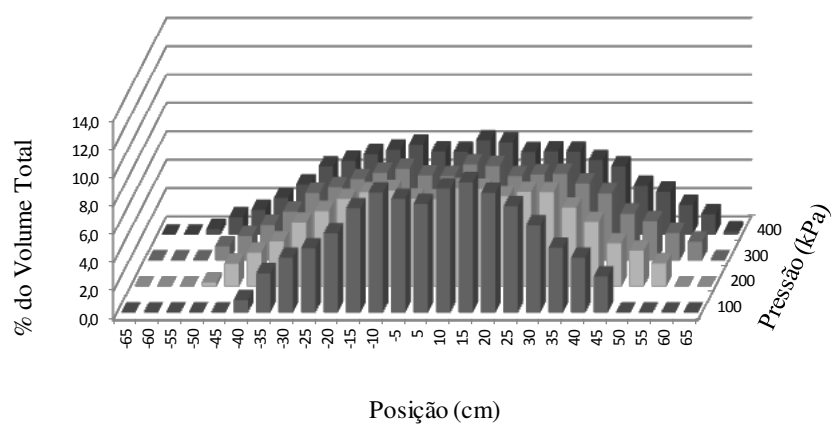
O perfil de distribuição observado para a ponta LD 11002 foi bem característico para o tipo leque, com maiores porcentagem de volume no centro do perfil, apresentando formato similar a um triângulo. O perfil foi influenciado pela pressão e pela altura de trabalho (Figura 2). À medida que se aumentou a pressão e a altura, maior foi o perfil de distribuição e menos acentuadas foram as altas porcentagens de volume no centro do perfil. Em todas as observações, houve a presença de uma depressão no centro do perfil, fato também encontrado por Cunha e Silva (2010) caracterizando a ponta TT 11001.



(a)



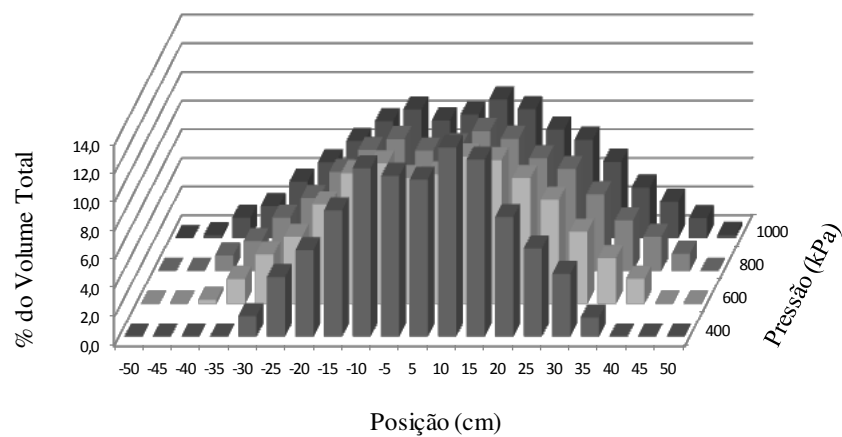
(b)



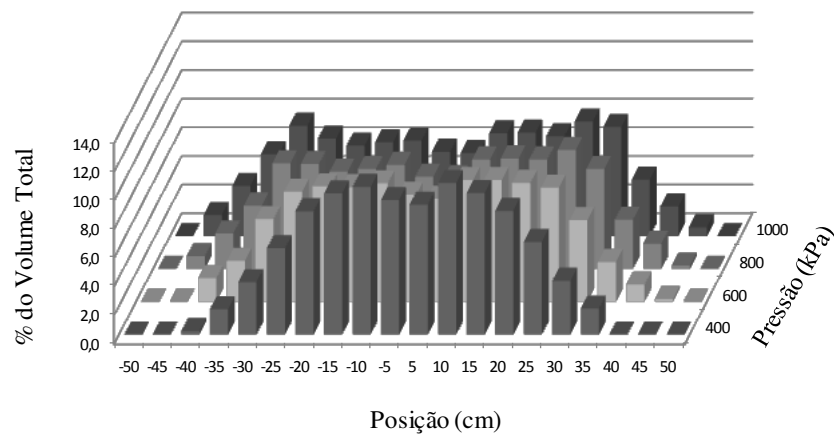
(c)

FIGURA 2 – Perfis de distribuição volumétrica da ponta hidráulica LD 11002 em diferentes pressões e alturas de trabalho. (a) 0,40 m de altura; (b) 0,50 m de altura; e (c) 0,60 m de altura.

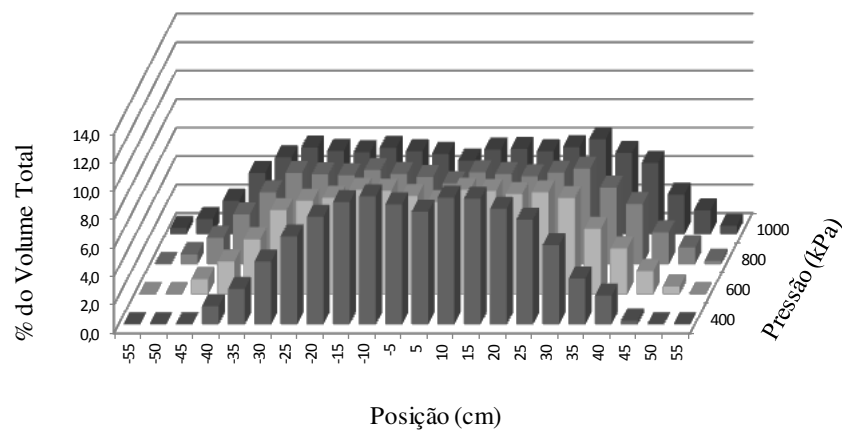
A ponta de jato cônico MAG-2 também apresentou perfil de distribuição bem característico para o seu tipo de ponta, com maiores porcentagens de volume na extremidade do perfil, característica que foi mais evidente para as alturas de 0,50 e 0,60 m, e nas maiores pressões (Figura 3). Assim como ocorrido para a ponta LD 11002, com o aumento da pressão e da altura de trabalho, ocorreu um alongamento do perfil de distribuição. Cunha e Silva (2010) afirmam que o aumento da altura de trabalho melhora o espalhamento do líquido pulverizado.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 3 – Perfis de distribuição volumétrica da ponta hidráulica MAG-2 em diferentes pressões e alturas de trabalho. (a) 0,40 m de altura; (b) 0,50 m de altura; e (c) 0,60 m de altura.

A ponta MAG-2 também apresentou depressão no centro do perfil. Cunha e Silva (2010) explicam que estas depressões podem ocorrer devido à dificuldade em moldar o orifício de saída da ponta.

Depressões e picos de volume ao longo do perfil de distribuição podem prejudicar a sobreposição da pulverização e gerar um alto coeficiente de uniformidade, o que não é desejável durante a aplicação de agrotóxico por causar faixas aplicadas com falta ou excesso de cobertura de gotas, visto que falta de cobertura pode causar ineficácia no controle e excesso pode causar escorrimento do líquido ao solo, gerando ineficiência.

A norma europeia EN 12761-2 (2001) diz que o coeficiente de variação não deve exceder 7 % para a altura da barra de pulverização e pressão estabelecidas pelo fabricante, e não exceder 9 % para as demais condições de trabalho, para garantir uma aplicação mais uniforme possível. As pontas LD 11002 e MAG-2 são recomendadas para trabalhar à altura de 0,50 m, porém a esta altura nenhuma das duas pontas apresentou coeficiente de variação menor que 7 % (Quadro 2).

Entretanto, a ponta LD 11002 apresentou coeficiente de 5,53, 6,59 e 6,27 % à altura de 0,40 m e nas respectivas pressões de 200, 300 e 400 kPa, portanto, estas deveriam ser as condições de trabalho recomendadas para a utilização desta ponta no pulverizador de barras. A redução da altura de trabalho tem a vantagem de reduzir a deriva, visto que menor será a influência da velocidade do vento sobre as gotas (Sasaki et al., 2011). O menor coeficiente de variação apresentado pela ponta MAG-2 foi 7,16 % à altura de 0,50 m e pressão de 400 kPa, e como está acima do recomendado pela

norma, esta ponta não deveria ser usada em pulverizadores de barra nestas condições de trabalho.

A ponta MAG-2 não apresentou boa uniformidade de distribuição por dois motivos: coalescências das gotas dos jorros adjacentes e presença de picos de volume na extremidade dos jorros em algumas situações. A coalescência ocorre porque não há como defasar a ponta cone como é feito com as pontas do tipo leque, assim, há o choque de gotas e consequente coalescência das mesmas, formando alta concentração de volume entre as pontas. Os picos de volume na extremidade dos jorros também favorecem a uma alta concentração de volume entre as pontas comparado à distribuição do jorro abaixo das mesmas, e consequentemente haverá uma aplicação de agrotóxico ineficiente.

Quadro 2 – Coeficientes de variação apresentados pelas pontas hidráulicas LD 11002 e MAG-2 em função da pressão e da altura de trabalho

Ponta	Altura (m)	Pressão (kPa)	CV (%)
LD	0,4	100	24,46
		200	5,53
		300	6,59
		400	6,27
	0,5	100	19,34
		200	11,27
		300	12,43
		400	12,47
	0,6	100	10,40
		200	13,79
		300	11,98
		400	11,60
MAG	0,4	400	13,92
		600	13,53
		800	22,04
		1000	27,89
	0,5	400	7,16
		600	16,49
		800	26,65
		1000	29,99
	0,6	400	12,22
		600	20,03
		800	23,35
		1000	24,72

Alvarenga *et al.* (2012), analisando a uniformidade de distribuição da ponta JA-2, encontraram coeficientes de variação iguais a 13 e 22 % para as pressões de trabalho de 633 e 1477 kPa, respectivamente, porém, estes mesmo autores afirmam que quando estas pontas são utilizadas em pulverizadores hidropneumáticos, o fluxo de ar gerado

pelo ventilador minimiza estes altos valores. Cunha (2008a) relata que além da pressão e altura de trabalho, a vazão nominal e o material de fabricação das pontas também influenciam na uniformidade de distribuição.

As pontas hidráulicas são fabricadas para apresentarem distribuição simétrica dos jorros, porém é muito complicada a obtenção do mesmo. O coeficiente de assimetria calculado para a ponta LD 11002 mostra que a ponta realmente apresenta assimetria de distribuição do jorro, e este sofre influência da pressão de trabalho, como apresentado no Quadro 3.

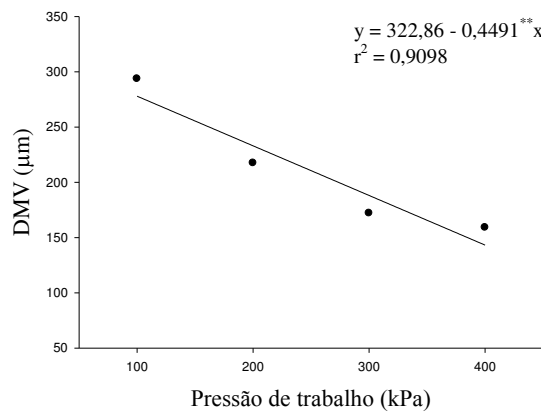
Quadro 3 – Assimetria do jorro apresentada pela ponta LD 11002 em função da pressão de trabalho.

Ponta	Pressão (kPa)	Coefficiente de assimetria do jorro
LD	100	-0,379
	200	-0,340
	300	-0,561
	400	-0,029

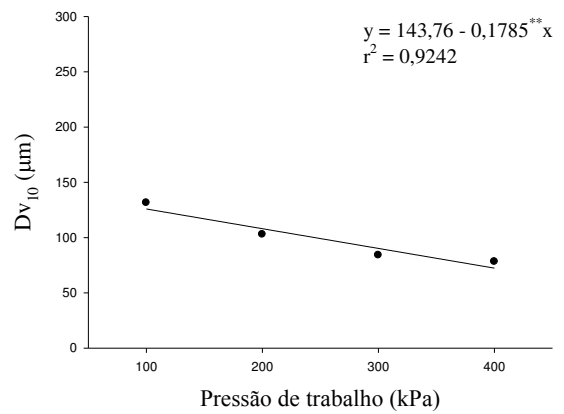
A ponta LD 11002 apresentou assimetria no lado esquerdo do jorro, ou seja, houve menor volume aplicado pelo lado esquerdo da ponta. Considerando-se que uma ponta simétrica apresentaria coeficiente de assimetria igual a zero, a assimetria apresentada pela ponta foi baixa, apresentando o menor valor de 0,029 para a pressão de 400 kPa e o maior de 0,561 para a pressão de 300 kPa. A presença do sinal negativo mostra que a assimetria ocorreu no lado esquerdo da ponta.

Vitoria *et al.* (2011), avaliando a assimetria de três pontas hidráulicas (AXI 110015, AXI 11002 e AXI 11003) e trabalhando com as pressões de 150, 300 e 400 kPa, encontraram valores intermediários aos observados neste trabalho, valores que variaram de 0,16 a 0,37.

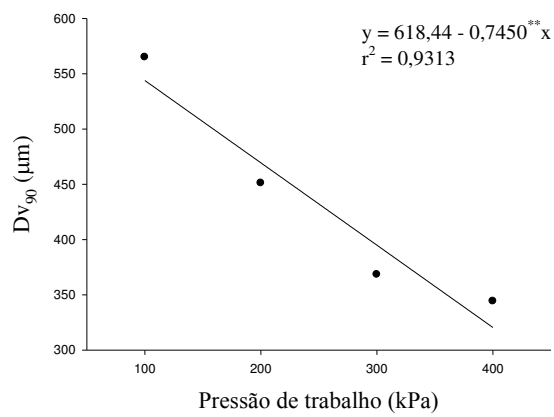
O diâmetro das gotas produzidas pela ponta LD 11002 reduziu com o aumento da pressão de trabalho, corroborando com Alvarenga *et al.* (2012), ao determinarem o espectro de gotas produzido pela ponta JA-2. Deste modo, o maior de DMV foi de 277,95 μm para a pressão de 100 kPa, e o menor foi de 143,22 μm para a pressão de 400 kPa (Figura 4).



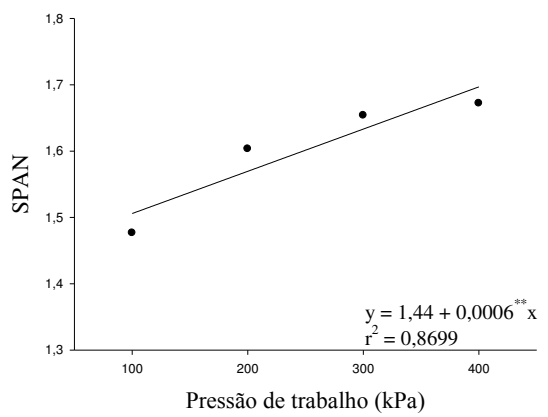
(a)



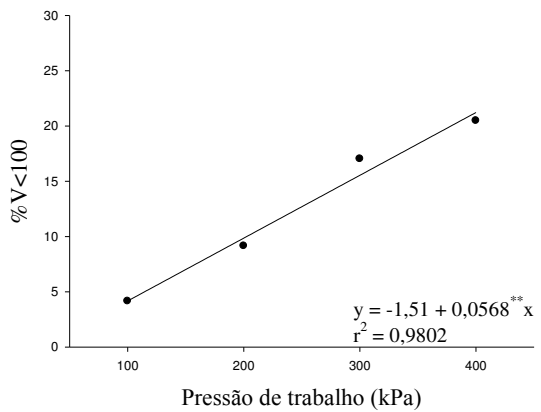
(b)



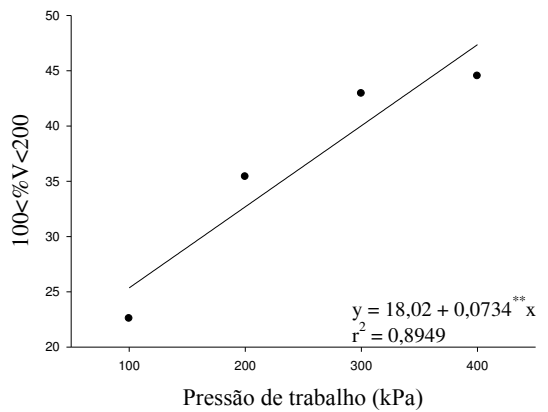
(c)



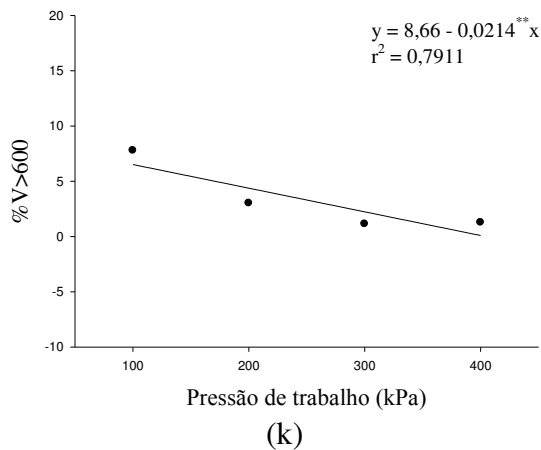
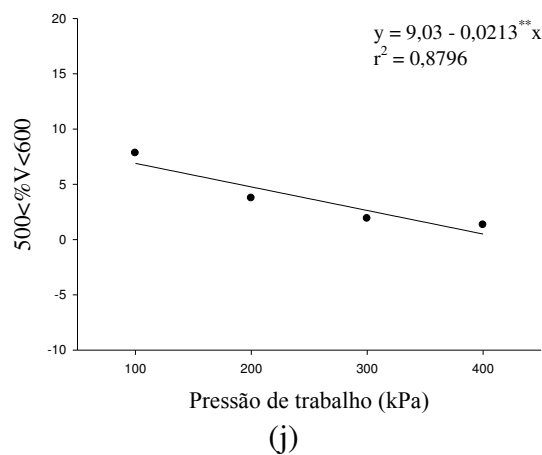
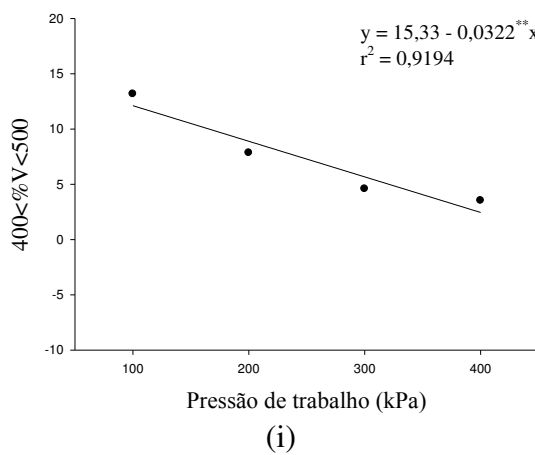
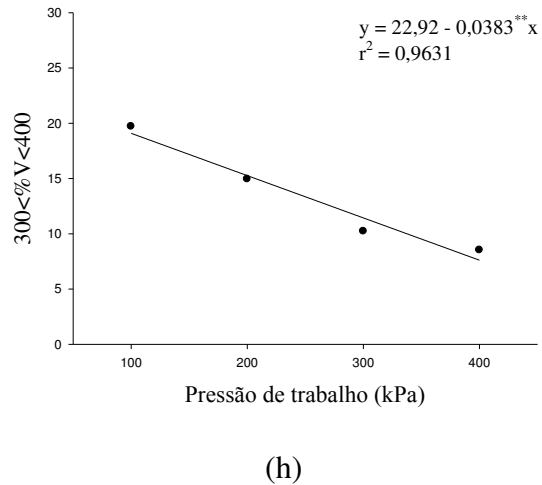
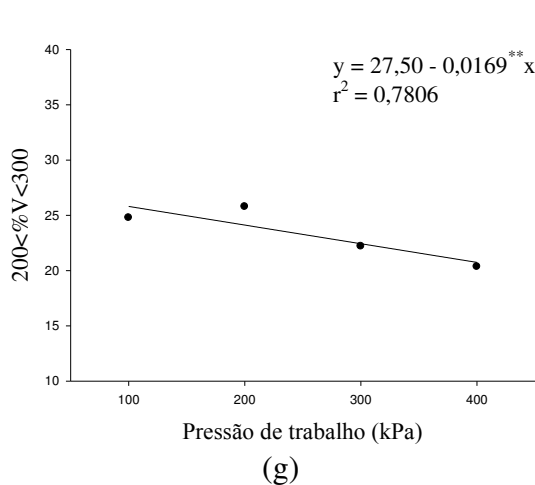
(d)



(e)



(f)



** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

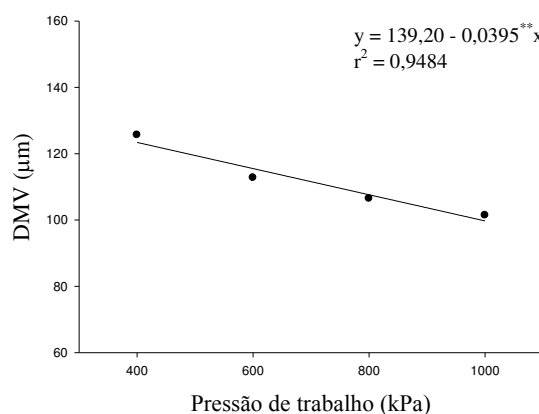
FIGURA 4 – Espectro de gotas produzido pela ponta LD 11002 em função da pressão de trabalho. (a) DMV; (b) Dv_{10} ; (c) Dv_{90} ; (d) SPAN; (e) $\%V < 100$; (f) $100 < \%V < 200$; (g) $200 < \%V < 300$; (h) $300 < \%V < 400$; (i) $400 < \%V < 500$; (j) $500 < \%V < 600$; e (k) $\%V > 600$.

A redução do diâmetro das gotas ocorre, porque à medida que se aumenta a pressão, maior será a quantidade de líquido que atravessa o orifício da ponta, assim, há maior fracionamento do líquido e maior produção de gotas com diâmetros reduzidos. Cunha *et al.* (2007) também relataram a redução do diâmetro de gotas com o aumento da pressão ao avaliarem as pontas API 11004, API 11004, ADI 11002, ATR Brown e ATR Red, entretanto o incremento da vazão nominal das pontas propicia aumento do tamanho de gotas.

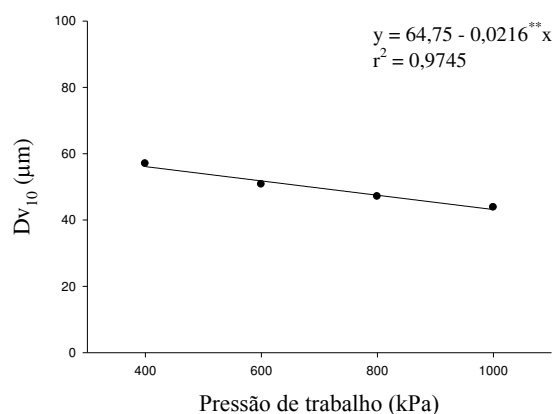
Como observado para os parâmetros porcentagem do volume pulverizado composta por gotas menores que 100 µm e porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e 200 µm, há um significativo aumento na quantidade de gotas pequenas com o aumento da pressão de trabalho, o que, conseqüentemente, pode gerar perdas por deriva. Arvidsson *et al.* (2011) relatam que a porcentagem do volume pulverizado composta por gotas menores que 100 µm é um melhor indicador de perigo de deriva que o DMV.

O SPAN aumenta com o aumento da pressão, corroborando com Cunha *et al.* (2004) e Cunha *et al.* (2007), porém isto não é desejado, já que este aumento indica uma elevação na disparidade dos diâmetros de gotas, portanto, quanto menor o valor de SPAN, mais homogênea é a amostra de gotas.

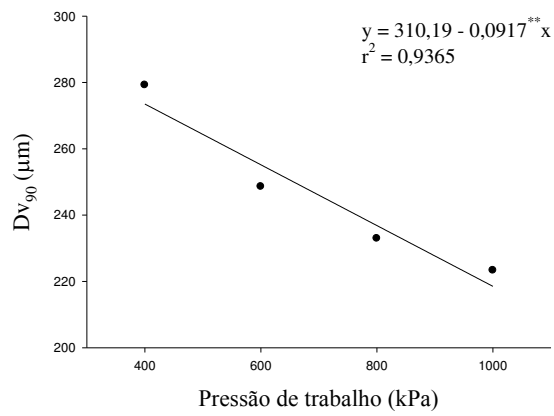
O comportamento do espectro produzido pela ponta MAG-2 foi semelhante ao apresentado pela ponta LD 11002, reduzindo o diâmetro de gotas com o aumento da pressão de trabalho (Figura 5).



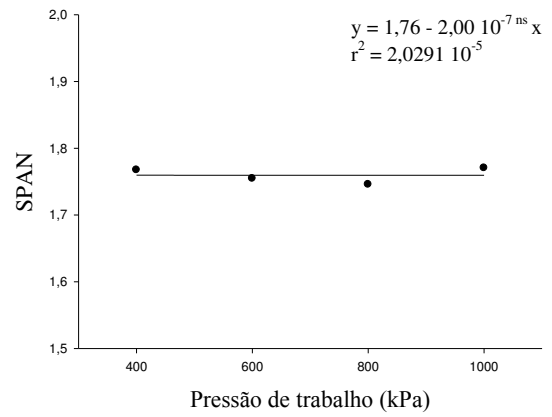
(a)



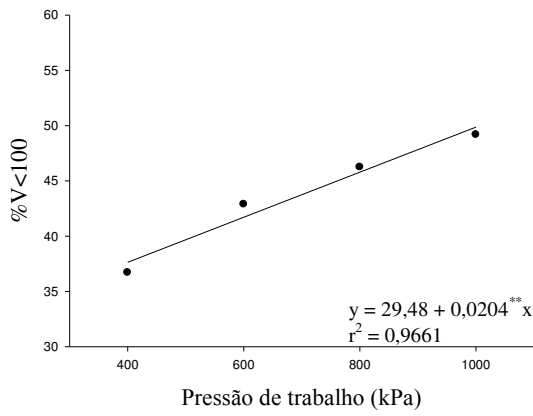
(b)



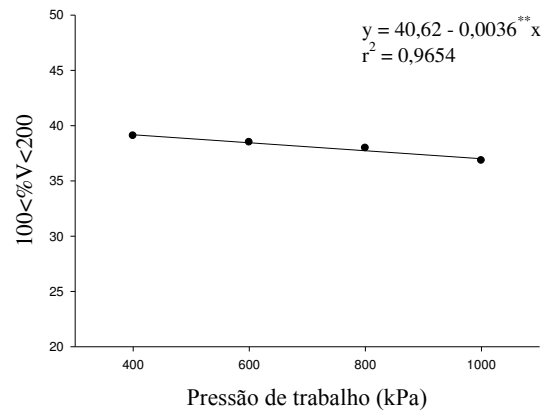
(c)



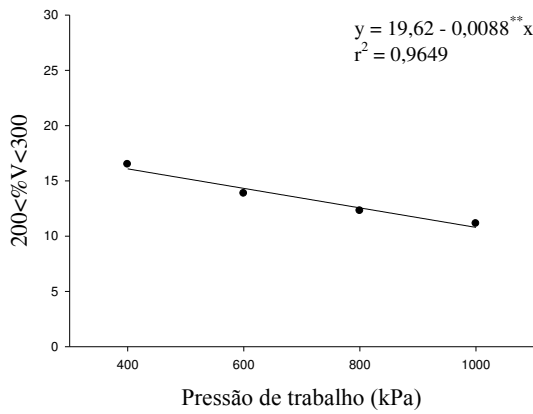
(d)



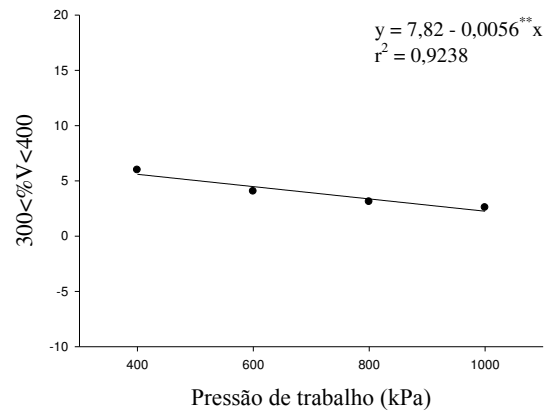
(e)



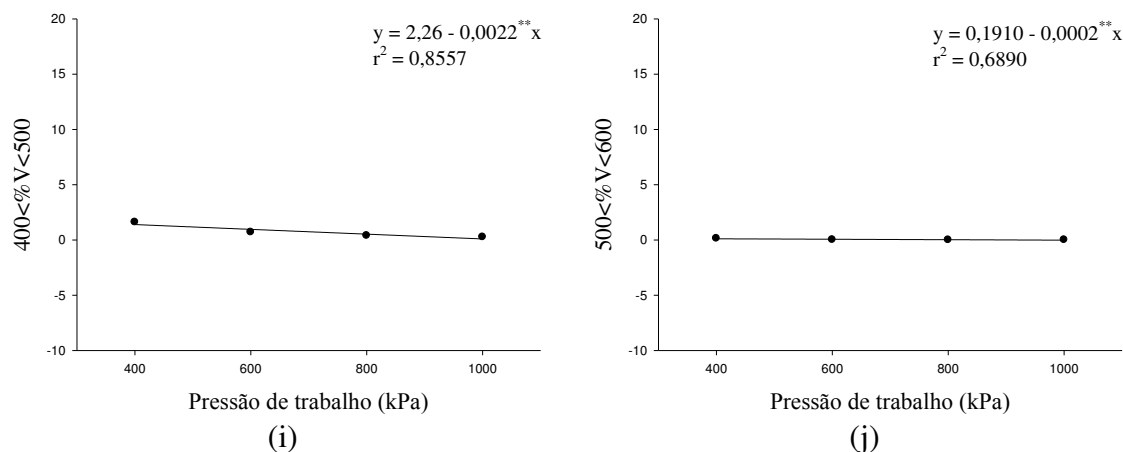
(f)



(g)



(h)



** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t.

^{ns} Não significativo a 5 % de probabilidade pelo testet.

FIGURA 5 – Espectro de gotas produzido pela ponta MAG-2 em função das pressões de trabalho. (a) DMV; (b) Dv_{10} ; (c) Dv_{90} ; (d) SPAN; (e) $\%V < 100$; (f) $100 < \%V < 200$; (g) $200 < \%V < 300$; (h) $300 < \%V < 400$; (i) $400 < \%V < 500$; (j) $500 < \%V < 600$; e (k) $\%V > 600$.

A análise do DMV mostrou valores reduzindo de 123,4 para 99,7 μm, variando a pressão de 400 para 1000 kPa. Alvarenga *et al.* (2013) também relataram redução do DMV para a ponta JA-2, porém observaram redução de 151 para 109 μm, variando a pressão de 633 para 1477 kPa.

O SPAN e a porcentagem de volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm não apresentaram comportamento similar ao espectro da ponta LD 11002. O SPAN não variou com o aumento da pressão, já a porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm reduziu com o aumento da pressão, enquanto para a ponta LD 11002 houve aumento da porcentagem. A ponta MAG-2 não produziu gotas com diâmetro acima de 600 μm, e como produziu pequena quantidade de gotas com diâmetro superior a 500 μm, uma pulverização realizada com esta ponta não sofreria o escorrimento de produto da folha alvo (CUNHA *et al.*, 2003).

O espectro de gotas analisado por diferentes aparelhos pode apresentar diferenças significativas nos resultados, que são oriundas das diferenças fundamentais entre os sistemas e as rotinas de software utilizadas pelos sistemas de medição (HOFFMANN *et al.*, 2008)

CONCLUSÕES

Nas condições em que o trabalho foi conduzido, pode-se concluir que:

- A variação da vazão das pontas LD 11002 e MAG-2 estão abaixo do limite de 10 % da vazão fornecida pelo fabricante;
- As pontas LD 11002 e MAG-2 não apresentam uniformidade de distribuição satisfatória à altura de trabalho recomendada;
- A ponta LD 11002 apresenta assimetria variando de 0,029 a 0,561, variação influenciada pela pressão de trabalho;
- O diâmetro de gotas produzido pelas pontas LD 11002 e MAG-2 reduz com o aumento da pressão de trabalho.

BIBLIOGRAFIA

ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; SASAKI, R. S.; RINALDI, P. C. N. Controle automático do espectro de gotas de pulverizador hidropneumático em função do déficit de pressão de vapor d'água no ar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 1, p. 26-33, jan./mar. 2013.

ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; SASAKI, R. S.; RINALDI, P. C. N. Efficiency of the spray tip using hydraulic hollow cone from the spectral analysis of the droplets. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 5, n. 3, p. 41-50, 2012.

American Society of Agricultural Engineers – ASAE. **Spray nozzle classification by droplet spectra**. ASAE S572.1, St. Joseph, MI, 2009. 4p.

ARVIDSSON, T.; BERGSTRÖM, L.; KREUGER, J. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. **Pest Management Science**, Chichester, West Sussex, Reino Unido, v. 67, p. 586-598, 2011.

BOLLER, W.; RAETANO, C. G. Bicos e pontas de pulverização de energia hidráulica, regulagens e calibração de pulverizadores de barra. In: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (Org.). **Tecnologia de aplicação para culturas anuais**. Passo Fundo: Aldeia Norte; Botucatu: FEPAF, 2011. cap. 3, p. 51-82.

CUNHA, J. P. A. Análise da distribuição volumétrica de pontas de pulverização hidráulicas de jato plano. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 31, n. 1, p. 233-239, jan. 2008a.

CUNHA, J. P. A. Simulação da deriva de agrotóxicos em diferentes condições de pulverização. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1616-1621, set./out. 2008b.

CUNHA, J. P. A.; SILVA, R. A. M. Uniformidade de distribuição volumétrica de pontas de pulverização em função da pressão de trabalho e altura da barra. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 52-58, jan./fev. 2010.

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

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

CUNHA, J. P. A.; TEIXEIRA, M. M.; VIEIRA, R. F.; FERNANDES, H. C.; COURY, J. R. Espectro de gotas de bicos de pulverização hidráulicos de jato plano e de jato cônico vazio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 10, p. 977-85, out. 2004.

European Standard – EN. **Agricultural and forestry machinery – Sprayers and liquid fertilizer distributors – Environmental protection – Part 2: Field crop sprayers**. EN 12761-2, Brussels, 2001. 20 p.

HOFFMANN, W. C.; HEWITT, A. J.; ROSS, J. B.; BAGLEY, W. E.; MARTIN, D. E.; FRITZ, B. K. Spray adjuvant effects on droplet size spectra measured by three laser-based systems in a high-speed wind tunnel. **Journal of ASTM International**, West Conshohocken, v. 5, n. 6, p. 1-12, 2008.

International Organization for Standardization – ISO. **Equipment for crop protection - Spraying equipment - Part 1: test methods for sprayer nozzles**. ISO 5682-1, Geneva, 1996. 5 p.

KÖPPEN, W. **Climatologia como um estudo de los climas de tierra**. México: Fondo de Cultura Econômica, 1948. 478 p.

MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods**. London: Blackwell Science, 3rd Edition. 2000. 448 p.

NUYTTENS, D.; BAETENS, K.; SCHAMPHELEIRE, M.; SONCK, B. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. **Biosystems Engineering**, Philadelphia, v. 97. p. 333-345, 2007.

NUYTTENS, D.; SCHAMPHELEIRE, M.; STEURBAUT, W.; BAETENS, K.; VERBOVEN, K.; NICOLAÏ, B.; RAMON, H.; SONCK, B. Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, Part 2: Spray application technique. In: Alexander, L. et al. (Ed.). **International advances in pesticides application 2006**. Warwick: Aspects of Applied Biology, 2006. cap. 1, p. 1-9.

NUYTTENS, D.; TAYLOR, W. A.; SCHAMPHELEIRE, M.; VERBOVEN, P.; DEKEYSER, D. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods. **Biosystems Engineering**, Philadelphia, v. 103, p. 271-280, 2009.

SASAKI, R. S.; TEIXEIRA, M. M.; ALVARENGA, C. B.; QUIRINO, A. L. S.; TIBURCIO, R. A. S. Uniformidade de distribuição volumétrica de pontas de pulverização hidráulica em diferentes condições operacionais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 6, nov./dez. 2011.

VIANA, R. G.; FERREIRA, L. R.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; FREITAS, F. C. L.; QUIRINO, A. L. S.; SANTOS, M. V. Características técnicas de pontas de pulverização LA-1JC e SR-1. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 211-218, 2007.

VIANELLO, R. L.; ALVES A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Editora UFV, 2002. 449 p.

VITORIA, E. L.; TEIXEIRA, M. M; RUAS, R. A. A. Coeficiente de assimetria de Person como parâmetro de avaliação da uniformidade de distribuição de líquido das pontas de pulverização hidráulicos de jato plano. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 13, p. 222-229, 2011.

Artigo II

Efeito do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar no espectro de gotas pulverizadas

Efeito do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar no espectro de gotas pulverizadas

RESUMO

Uma das mais importantes barreiras para a obtenção de uma pulverização de qualidade é a evaporação de gotas antes que estas atinjam o alvo, gerando ineficácia ou ineficiência da aplicação de agrotóxicos. Assim, objetivou-se com este trabalho determinar o espectro de gotas em função das condições psicrométricas do ar. O experimento foi realizado dentro de uma câmara climática para permitir a obtenção dos déficits de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}). Para a determinação do espectro de gotas, empregou-se o analisador de partículas a laser modelo Spraytech, e o ensaio foi conduzido em esquema fatorial de 5 x 20, constituído por cinco pressões de trabalho (100, 200, 300, 400 e 500 kPa) e vinte DPV_{ar} (2,3; 3,2; 4,2; 5,6; 7,0; 7,4; 9,5; 11,7; 12,7; 15,8; 16,4; 16,9; 21,2; 22,1; 22,2; 28,1; 29,7; 36,9 39,4 e 51,6 hPa) no delineamento inteiramente casualizado e com cinco repetições. Houve influência do DPV_{ar} no comportamento do espectro de gotas. O aumento do DPV_{ar} reduziu a porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm , entre 200 e 300 μm , entre 300 e 400 μm , entre 400 e 500 μm e entre 500 e 600 μm . O aumento do DPV_{ar} aumentou o DMV, o Dv_{90} , o SPAN e a porcentagem do volume pulverizado composta por gotas maiores que 600 μm .

Palavras-chave: Evaporação de gotas, diâmetro de gotas, tecnologia de aplicação.

Effect of air vapor pressure deficit on sprayed droplet spectrum

ABSTRACT

One of the most important barriers to obtain a quality spraying is the evaporation of droplets before reaching the target, resulting in ineffective or inefficient pesticides application. Thus, the aim of this work was to determine the droplet spectrum depending on the air psychrometric conditions. The work was carried out inside of a climate chamber to obtain the air vapor pressure deficits (VPD_{air}). The laser particle analyzer, model Spraytech, was used to determine the droplet spectrum, and the experiment was conducted in factorial scheme 5×20 , consisted of five working pressures (100, 200, 300, 400 and 500 kPa) and twenty VPD_{air} (2.3; 3.2; 4.2; 5.6; 7.0; 7.4; 9.5; 11.7; 12.7; 15.8; 16.4; 16.9; 21.2; 22.1; 22.2; 28.1; 29.7; 36.9 39.4 e 51.6 hPa), in completely randomized design with five replications. There is influence of VPD_{air} on droplet spectrum behavior. Increasing the VPD_{air} reduces the percentage of sprayed volume comprised by droplets with diameter between 100 and 200 μm , between 200 and 300 μm , between 300 and 400 μm , between 400 and 500 μm and between 500 and 600 μm . Increasing VPD_{air} increases the VMD, Dv_{90} , SPAN and the percentage of sprayed volume comprised by droplets larger than 600 μm .

Keywords: Droplets evaporation, droplets diameter, spraying technology.

INTRODUÇÃO

Uma das mais importantes barreiras para a obtenção de uma pulverização de qualidade é a evaporação de gotas antes que estas atinjam, ou mesmo, antes que sejam absorvidas pelo alvo, podendo ser a cultura ou mesmo uma planta daninha. Este fator gera ineficiência ou mesmo ineficácia da aplicação de agrotóxicos, acarretando em prejuízo ao agricultor, impactos ao meio ambiente e intoxicação de pessoas.

A evaporação de gotas, juntamente com a deriva, pode representar de 45 a 59 % de perda do volume aplicado (ALVES *et al.*, 2008; CHAIM *et al.*, 2000), o que conseqüentemente podem contaminar as chuvas, nevoeiros ou até mesmo ficarem no ambiente na forma de gás (BEDOS *et al.*, 2002). Gotas que sofrem o processo da evaporação quando ainda estão no ar podem perder todo o diluente criando partículas muito pequenas de químico concentrado que podem então ser carregadas por longas distâncias por meio do fluxo de ar e contaminar o ambiente (MATTHEWS, 2000).

Embora algumas gotas possam ser perdidas por evaporação em qualquer condição climática, as perdas são menores em condições de temperaturas mais baixas e umidade relativa do ar mais elevada (COUTINHO; CORDEIRO, 2004; JUNIOR *et al.*, 2008). Balan *et al.* (2008) relataram que a deposição da calda por pontas que produzem gotas finas pode ser significativamente reduzida com o aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa, chegando a variar em mais de 100 % entre os valores extremos observados. Deste modo, o momento ideal para a pulverização deve apresentar condições psicrométricas do ar com temperatura entre 15 e 30 °C e umidade relativa mínima de 55 %. Deve-se, também, observar a velocidade do vento, e este deve situar-se na faixa de 3 a 7 km/h (ANDEF, 2004; RAETANO, 2011).

Além das condições psicrométricas do ar, superfície depositada e diâmetro da gota influenciam a evaporação (GIMENES *et al.*, 2013; XU *et al.*, 2010a; XU *et al.*, 2010b; XU *et al.*, 2011; YU *et al.*, 2009a; YU *et al.*, 2009b). Yu *et al.* (2009b) constataram que o tempo de evaporação de gotas de 343 µm contendo inseticida, a 60 % de umidade relativa do ar e sobre uma superfície hidrofílica, aumentou aproximadamente 30 % (de 70 para 91 s) após adição de redutor de deriva à mistura da calda, enquanto reduziu aproximadamente 29 % (de 70 para 50 s) após adição de surfactante. Yu *et al.* (2009a), avaliando o tempo de evaporação de gotas de 343 µm a 60 % de umidade, encontraram os tempos de 99 s na folha com superfície hidrofóbica, 80 s na folha com superfície cerosa, 63 s na folha com superfície hidrofílica e 47 s na folha pilosa, e também mostraram que o tempo de evaporação de gotas com o diâmetro

de 246 μm aumentava de 23 para 58 s ao alterar a umidade relativa de 30 para 90 %. Já Xu *et al.* (2010b) ao aumentarem o diâmetro da gota de 300 para 600 μm , relataram que o tempo de evaporação aumentou 279 % para gotas d'água. Um tempo de evaporação mais curto para gotas com surfactantes, pode ser devido a maiores espalhamentos das gotas sobre a superfície relacionada com uma rápida troca de calor entre o filme de líquido e o ar, e com a taxa de absorção de líquido pelo tecido da planta (GIMENES *et al.*, 2013).

A escolha pela aplicação noturna é uma boa opção para garantir um tempo de vida maior às gotas, garantindo o alcance aos alvos. O período noturno apresenta umidade relativa superior e temperatura inferior ao período diurno, e que, combinado com uma baixa velocidade do vento, garante o sucesso da aplicação. Porém, durante a noite pode haver a presença do orvalho, e este sobre a folha, ou mesmo ocorrendo após a pulverização, pode prejudicar a eficiência do agrotóxico pela diluição e escorrimento do produto aplicado, principalmente se doses baixas e volumes elevados de calda forem adotados (ROMAN *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2004).

O déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) é frequentemente utilizado em trabalhos relacionados à evaporação de gotas para caracterizar as condições psicrométricas do ar. O DPV_{ar} é a diferença entre a pressão exercida pela saturação de vapor d'água no ar e a pressão parcial de vapor d'água, e estes estão diretamente relacionados à umidade relativa e à temperatura do ar. A pressão de saturação do vapor d'água depende da temperatura, e à medida que esta aumenta, maior será a pressão de saturação. Já a pressão parcial de vapor depende da umidade relativa juntamente com a pressão de saturação, e será cada vez maior com o aumento da umidade. Se a umidade relativa atingir 100 %, a pressão parcial será igual à pressão de saturação e, conseqüentemente, o DPV_{ar} será nulo, caso o ar não esteja saturado, a pressão parcial de vapor será menor que aquela que prevaleceria em condições saturadas, à mesma temperatura (VIANELLO; ALVES, 2002; RODRIGUES *et al.*, 2011). Entretanto, a condição de saturação não seria a ideal para realizar as pulverizações por se encontrar no ponto de orvalho, ou até mesmo, chovendo. Arvidsson *et al.* (2011) afirmam que a taxa na qual gotas d'água evaporam depende quase que inteiramente do diâmetro e do DPV_{ar} entre a superfície da gota e o ar ao redor.

Deste modo, objetivou-se com este trabalho, determinar o espectro de gotas em função de déficits de pressão de saturação de vapor d'água no ar, visando à garantia de eficácia e maximização da eficiência de aplicação de agrotóxico.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas (LADA), pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa – Minas Gerais. O clima da região é, de acordo com a classificação de Köppen (1948), 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 (VIANELLO; ALVES, 2002).

Os experimentos foram realizados no interior de uma câmara climática (Figura 1) para permitir a obtenção das condições psicrométricas a serem utilizadas neste trabalho. Esta câmara apresenta um volume de 9,7 m³ e tem a possibilidade de controlar a umidade relativa na faixa compreendida entre 30 e 90 % e a temperatura do ar entre 0 e 40 °C.



FIGURA 1 – Interior da câmara climática utilizada para controle da temperatura e da umidade relativa do ar

O déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), determinado pelos valores de temperatura e umidade relativa dentro da câmara climática, foi calculado a partir da equação de Tetens (VIANELLO; ALVES, 2002; Rodrigues *et al.*, 2011), sendo obtido pela diferença entre a pressão de saturação de vapor d'água no ar

(e_s) e a pressão parcial de vapor d'água (e). Para o cálculo de e_s foi levado em consideração o valor da temperatura do ar, conforme a Equação 1.

$$e_s = 6,1078 (10)^{\frac{7,5 t}{237,3 + t}} \quad \text{Eq.1}$$

em que

e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa); e ,

t = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Posteriormente, foi determinado o valor de e , a partir da umidade relativa do ar e do valor de e_s .

$$e = \frac{\text{UR } e_s}{100} \quad \text{Eq.2}$$

em que

e = pressão parcial de vapor d'água no ar (hPa); e ,

UR = umidade relativa do ar (%).

Finalmente, foi obtido o DPV_{ar} , como relatado anteriormente, usando a diferença entre e_s e e .

$$\text{DPV}_{\text{ar}} = e_s - e \quad \text{Eq.3}$$

em que

DPV_{ar} = déficit da pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa).

As condições de temperatura e umidade relativa do ar para obtenção do DPV_{ar} foram estabelecidas intencionalmente para representar situações favoráveis e desfavoráveis à pulverização, visando à avaliação do efeito da temperatura e da umidade relativa na pulverização. Desde modo, valores de temperatura de 20, 25, 30, 35 e 40 $^{\circ}\text{C}$ foram combinados com valores de umidade relativa do ar de 30, 50, 70 e 90 %, possibilitando a avaliação da evaporação do líquido pulverizado em vinte condições distintas de DPV_{ar} , como especificado no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores de déficits de pressão de saturação de vapor d’água para diferentes condições psicrométricas do ar

Temperatura do ar (°C)	Umidade Relativa do ar (%)	DPV _{ar} (hPa)
20	30	16,4
	50	11,7
	70	7,0
	90	2,3
25	30	22,2
	50	15,8
	70	9,5
	90	3,2
30	30	29,7
	50	21,2
	70	12,7
	90	4,2
35	30	39,4
	50	28,1
	70	16,9
	90	5,6
40	30	51,6
	50	36,9
	70	22,1
	90	7,4

A área delimitada pelas distintas combinações de temperatura e umidade relativa do ar, conforme especificadas no Quadro 1, podem ser visualizadas no gráfico psicrométrico, conforme ilustrado na Figura 2.

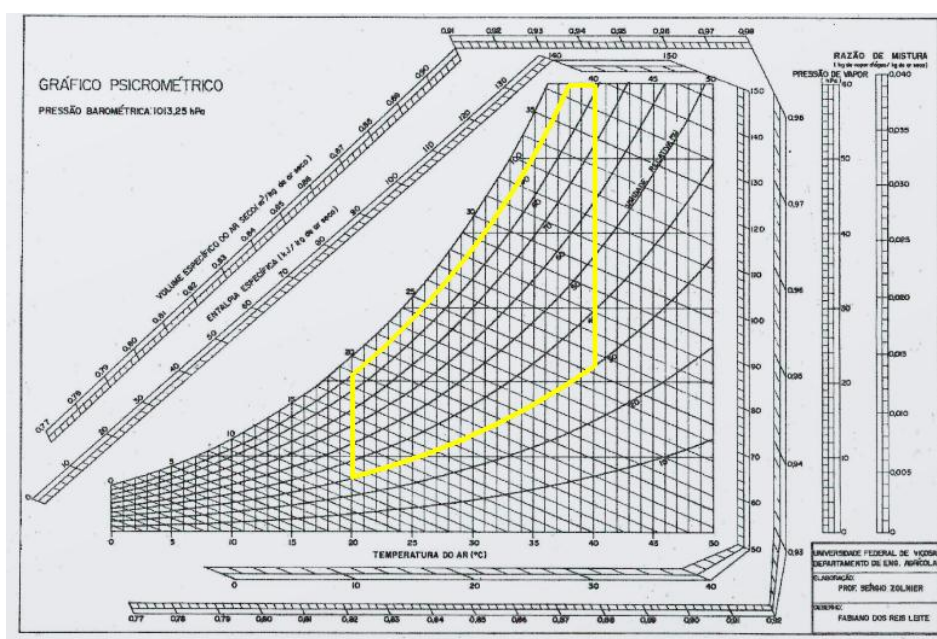


FIGURA 2 – Ilustração no gráfico psicrométrico dos limites operacionais do controle de temperatura e umidade relativa do ar para determinação das perdas por evaporação do líquido pulverizado.

Para medição das condições psicrométricas do ar no interior da câmara climática, foi utilizada uma sonda de temperatura e umidade relativa do ar (modelo HMP60, Vaisala, Woburn, Ma, USA), cujos intervalos de medição estão situados, respectivamente, entre - 40 e + 60 °C e 0 e 100 %. Os sinais analógicos de tensão elétrica dos dois sensores foram convertidos em sinais digitais por meio do microcontrolador Arduino Duemilanove, modelo ATmega328 e , posteriormente, enviados a um computador com um sistema serial de transmissão de dados. Os sinais de tensão elétrica foram convertidos em valores de temperatura e umidade relativa do ar segundo as seguintes equações:

$$T = - 40 + 20 \left(\frac{5}{1023} \right) \text{sinal_T}_{\text{ar}} \quad \text{Eq. 4}$$

em que

T = temperatura do ar (°C).

$$\text{UR} = 20 \left(\frac{5}{1023} \right) \text{sinal_UR} \quad \text{Eq.5}$$

em que

UR = umidade relativa (%).

As pressões de trabalho utilizadas para a determinação do espectro de gotas foram de 100, 200, 300, 400 e 500 kPa. Estas pressões foram obtidas a partir de uma bomba hidráulica, marca Yamaho, com rotação de 70 a 900 rpm, vazão nominal entre 8 e 11 L min⁻¹, potência de 0,75 a 1,12 kW e pressão máxima de 3516 kPa. A bomba foi acionada por um motor elétrico, marca Weg, com rotação de 3570 rpm e potência de 1,5 kW. As gotas foram analisadas pelo analisador de partículas a laser modelo Spraytech (Malvern Instruments Co.). Este equipamento apresenta lente focal de 750 mm, e utiliza a técnica da difração de laser para a medição do tamanho das gotas pulverizadas. Com esta técnica é feita a medição da intensidade de luz que é dispersa à medida que um feixe de laser passa através de um jorro pulverizado. Os dados são então analisados para calcular o tamanho das gotas que criaram o perfil de dispersão. O analisador foi calibrado para contabilizar gotas na classe de tamanho de 0,10 a 2.500 µm.

O estudo do espectro de gotas foi compreendido pelos seguintes indicadores: a) diâmetro da gota que divide a população de gotas, ordenadas crescentemente, em duas metades iguais em volume de líquido pulverizado (diâmetro da mediana volumétrica ou DMV); b) diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 10 % do volume total de

líquido pulverizado (Dv_{10}); c) diâmetro da gota, abaixo do qual, se encontra 90 % do volume total de líquido pulverizado (Dv_{90}); d) amplitude relativa ou SPAN, por definir a homogeneidade do diâmetro das gotas da pulverização, deste modo, quanto menor for este valor, mais homogêneo é o diâmetro das gotas da amostra, e este é calculado pela Equação 6; e) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas menores que 100 μm ($\%V < 100$); f) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm ($100 < \%V < 200$); g) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 200 e 300 μm ($200 < \%V < 300$); h) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 300 e 400 μm ($300 < \%V < 400$); i) porcentagem do volume pulverizada composta por gotas com diâmetro entre 400 e 500 μm ($400 < \%V < 500$); j) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 500 e 600 μm ($500 < \%V < 600$); e k) porcentagem do volume pulverizado composta por gotas maiores que 600 μm ($\%V > 600$).

$$\text{SPAN} = \frac{Dv_{90} - Dv_{10}}{Dv_{50}} \quad \text{Eq.6}$$

em que

SPAN = amplitude relativa (adimensional);

Dv_{90} = diâmetro da gota, abaixo do qual, se encontra 90 % do volume total de líquido pulverizado (μm);

Dv_{10} = diâmetro da gota, abaixo do qual, se encontra 10 % do volume total de líquido pulverizado (μm); e,

Dv_{50} = diâmetro da mediana volumétrica (μm).

A pulverização do líquido sobre o analisador de partículas foi realizada de tal modo que todo o jorro da ponta passasse transversalmente pelo feixe luminoso emitido pelo laser. Para isso, foi montada sobre o analisador, uma barra de pulverização, e, ao final desta barra, um motor elétrico foi instalado para permitir que a mesma gire, garantindo a análise de todo o jorro da ponta. Esta barra de pulverização é constituída por um bico e um manômetro, que foi devidamente aferido. O motor elétrico, instalado ao final da barra, é tipo CEP de 12 V e 7,5 A, com torque de 25 a 48 mN e rotação máxima de 10,47 rad s^{-1} (100 rpm).

O manômetro utilizado é da marca Famabras, sendo classificado como classe B, apresentando fundo de escala de 0 a 2500 kPa e divisão de 20 kPa. A calibração do

mesmo foi feita com o auxílio de uma bomba de calibração por comparação, dotada de um manômetro padrão classe A3, marca Salcas, com precisão de 0,25 % e divisão de 10 kPa, obtendo, assim, a relação entre a pressão indicada e a real.

Durante o experimento foram utilizadas cinco pontas hidráulicas do mesmo modelo, Lurmark LD11002, que foram escolhidas através do sorteio de um conjunto de vinte pontas, seguindo a norma ISO 5682-1 (1996). Estas pontas foram posicionadas na barra de pulverização a 0,50 m de distância do feixe de laser emitido pelo analisador de partículas, representando a altura da barra de um pulverizador em relação à cultura. A água utilizada durante todo experimento foi obtida diretamente da torneira, assim como é recomendado pela norma ASAE S572.1 (2009).

O experimento foi conduzido em esquema fatorial 5 x 20, constituído pelas cinco pressões de trabalho e os vinte DPV_{ar} , em delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições, totalizando quinhentas observações. Os dados foram analisados por meio da metodologia da superfície de resposta. Os modelos foram escolhidos baseando na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste “t”, adotando-se o nível de 10 % de probabilidade no coeficiente de determinação ($R^2 = SQ_{Regressão}/SQ_{tratamento}$) e no comportamento da variância em estudo.

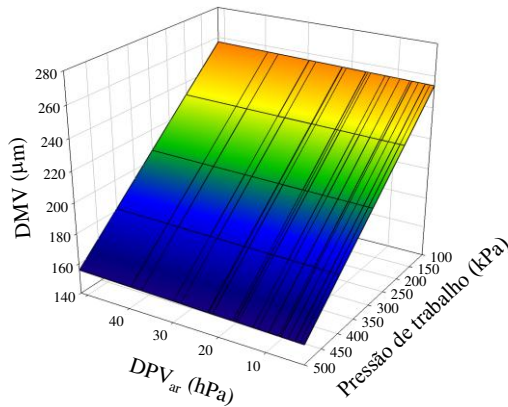
RESULTADOS E DISCUSSÃO

O manômetro, utilizado durante os experimentos, mostrou valores similares ao apresentado pelo manômetro da bomba de aferição nas pressões utilizadas.

O DMV, que é o principal parâmetro estudado no espectro de gotas, aumentou com o aumento do DPV_{ar} e com a redução da pressão de trabalho, assim, o menor valor foi de 152,77 μm na pressão de 500 kPa e DPV_{ar} de 2,3 hPa, e o maior foi de 256,92 μm na pressão de 100 kPa e DPV_{ar} de 51,6 hPa. Semelhante ao DMV, o Dv_{90} e o SPAN aumentaram com o aumento do DPV_{ar} e com a redução da pressão de trabalho. Já o Dv_{10} apresentou tendência negativa com o aumento da pressão de trabalho e do DPV_{ar} , porém, em pressões elevadas, um aumento do DPV_{ar} gerou aumento do Dv_{10} , aumento que foi originado pela evaporação total das gotas pequenas (Figura 3).

$$DMV = 279,146 + 0,059658^* DPV - 0,25302^{**} P$$

$$R^2 = 0,9120$$

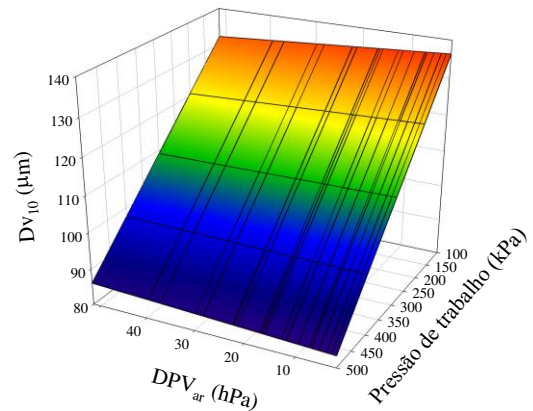


(a)

$$Dv_{10} = 149,95 - 0,122669^{**} DPV - 0,133629^{**} P +$$

$$0,00035741^{**} (DPV*P)$$

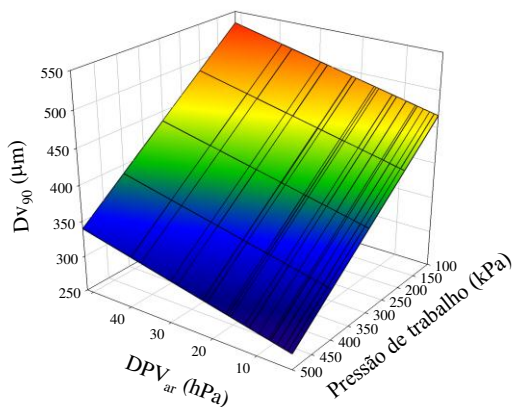
$$R^2 = 0,9350$$



(b)

$$Dv_{90} = 511,298 + 1,37339^{**} DPV - 0,485595^{**} P$$

$$R^2 = 0,8840$$

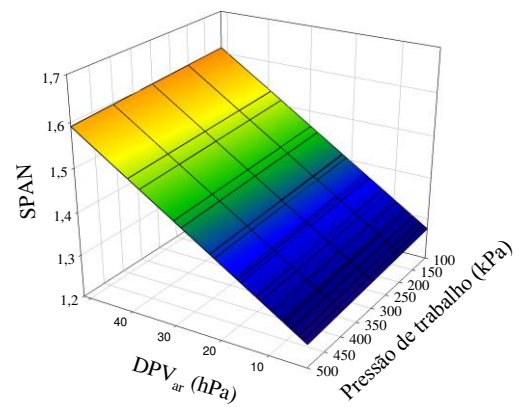


(c)

$$SPAN = 1,2645 + 0,00684741^{**} DPV -$$

$$0,00005384^{\circ} P$$

$$R^2 = 0,6016$$



(d)

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t.

* Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.

° Significativo a 10 % de probabilidade pelo teste t.

FIGURA 3 – Estimativas do diâmetro da mediana volumétrica, diâmetro da gota abaixo da qual se encontra 10 % do volume total de líquido pulverizado, diâmetro da gota abaixo do qual se encontra 90 % do volume total de líquido pulverizado e amplitude relativa em função do DPV_{ar} e da pressão de trabalho. (a) DMV; (b) Dv_{10} ; (c) Dv_{90} ; e (d) SPAN.

Com a elevação do DPV_{ar} , é de se esperar que ocorra uma redução do diâmetro de gotas, visto que esta elevação favorece à evaporação, porém resultados obtidos mostram que o DMV aumentou, o que ocorreu devido a evaporação total das gotas muito finas. Cunha (2008), simulando a perda de agrotóxicos à temperatura de 28 °C e umidade relativa de 65 %, relata que pontas que produzem um DMV de 134 μm têm 10 % do volume evaporado antes de atingir o alvo, enquanto que pontas com DMV de 298 μm essa perda é reduzida para 3 %. Já Alvarenga *et al.* (2013), trabalhando à pressão de 1.055 kPa e com a ponta JA-2, relataram que o Dv_{10} e o Dv_{90} reduzem com o aumento do DPV_{ar} , entretanto, o espectro de gotas foi determinado em etiquetas hidrossensíveis, e estas não são confiáveis para avaliar o espectro de gotas, uma vez que nesta situação, o diâmetro de gotas é avaliado por manchas formadas nas etiquetas, assim, se duas ou mais gotas depositarem no mesmo ponto, haverá coalescência destas gotas e o diâmetro real será superestimado.

O SPAN depende dos valores de Dv_{10} e Dv_{90} , assim, quando ocorre elevada disparidade entre estes valores, há uma elevação do SPAN. Uma aplicação de agrotóxico deve ser feita por pontas hidráulicas que apresentam SPAN baixo, sendo este próximo ou inferior a 1,00, por garantir a produção de gotas com diâmetros similares.

O aumento da pressão de trabalho gera redução do diâmetro de gotas, porque à medida que se aumenta a pressão, maior será a quantidade de líquido que atravessa o orifício da ponta, assim, há maior fracionamento do líquido e maior produção de gotas com diâmetros reduzidos. Cunha *et al.* (2007) também relataram que com o aumento da pressão houve redução do diâmetro de gotas ao caracterizarem as pontas API 11004, API 11004, ADI 11002, ATR Brown e ATR Red. Entretanto, Gil *et al.* (2007) constataram que uma redução do DMV de 134 para 65 μm , há perda por deriva quando a velocidade do vento se torna superior a 1 m s^{-1} .

Mantendo-se o DPV_{ar} constante, a porcentagem de volume pulverizado composta por gotas menores que 100 μm aumenta com o aumento da pressão de trabalho, porém mantendo-se a pressão constante, em pressões baixas, o aumento do DPV_{ar} gera um aumento da porcentagem de volume pulverizado composta por gotas menores que 100 μm , e a pressões elevadas, o aumento do DPV_{ar} , leva a uma redução desta porcentagem de volume pulverizado (Figura 4.a). Redução que foi oriunda da evaporação total das pequenas gotas e que, conseqüentemente, aumenta o valor de Dv_{10} .

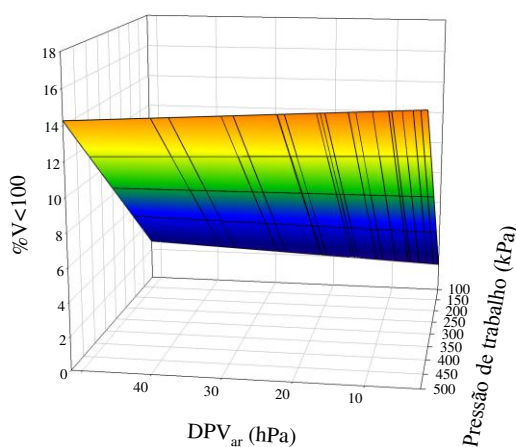
A porcentagem de volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm reduziu com o aumento do DPV_{ar} e reduzindo a pressão de trabalho (Figura 4.b).

$$\%V < 100 = -1,70956 + 0,0264264^{**} DPV + 0,0342073^{**} P - 0,000097168^{**} (DPV \cdot P)$$

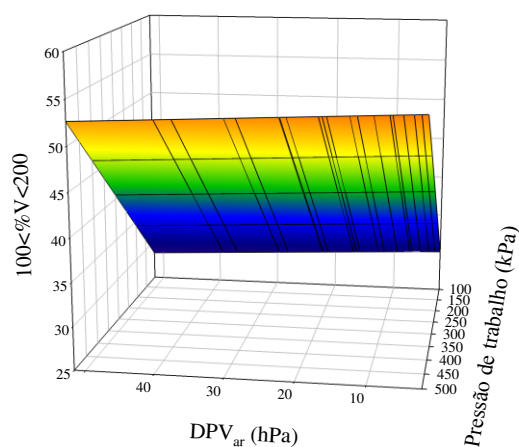
$$R^2 = 0,9707$$

$$100 < \%V < 200 = 24,1368 - 0,0350263^{**} DPV + 0,0606191^{**} P$$

$$R^2 = 0,8974$$



(a)



(b)

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t.

FIGURA 4 – Estimativas da porcentagem do volume pulverizado composta por gotas menores que 100 μm e por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm em função do DPV_{ar} e da pressão de trabalho. (a) $\%V < 100$; e (b) $100 < \%V < 200$.

O aumento da produção de gotas pequenas, com o aumento da pressão de trabalho, gera aumento da porcentagem de volume pulverizado com gotas menores que 100 μm , o que, conseqüentemente, leva a uma redução do Dv_{10} . Contudo, o aumento da produção de gotas pequenas pode acarretar em deriva para fora do alvo, uma vez que, uma pulverização ao apresentar alta concentração de gotas menores que 100 μm , tem elevado risco de deriva (CUNHA *et al.*, 2003). Gil *et al.* (2007) observaram perdas de aproximadamente 33 % do volume total aplicado ao pulverizar a velocidades do vento de 2 m s^{-1} e utilizando pontas hidráulicas que apresentavam 76 % de volume pulverizado com gotas menores que 100 μm . A porcentagem de volume pulverizado com gotas menores que 100 μm é um indicador de perigo de deriva mais eficiente que o DMV (ARVIDSSON *et al.*, 2011).

A redução da porcentagem de volume pulverizado composta por gotas menores que 100 μm e da porcentagem de volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm com o aumento do DPV_{ar} , mostra que há uma evaporação de gotas. Tobi *et al.* (2011) afirmam que condições de baixa umidade relativa e alta temperatura do ar causam rápida evaporação de gotas e, conseqüentemente, também podem aumentar as perdas por deriva.

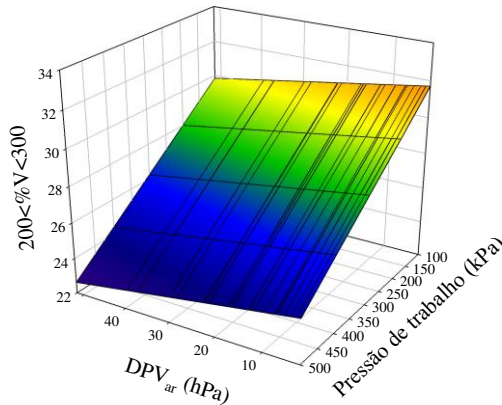
O aumento tanto do DPV_{ar} , quanto da pressão de trabalho, reduziu a porcentagem de volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 200 e 300 μm , entre 300 e 400 μm , entre 400 e 500 μm e entre 500 e 600 μm (Figura 5).

$$200 < \%V < 300 = 33,5975 - 0,0381865^{**} DPV - 0,0180206^{**} P$$

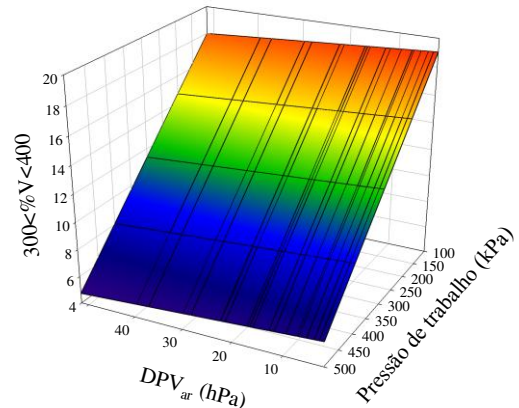
$$R^2 = 0,8603$$

$$300 < \%V < 400 = 22,4144 - 0,0215974^{**} DPV - 0,0331311^{**} P$$

$$R^2 = 0,9460$$



(a)



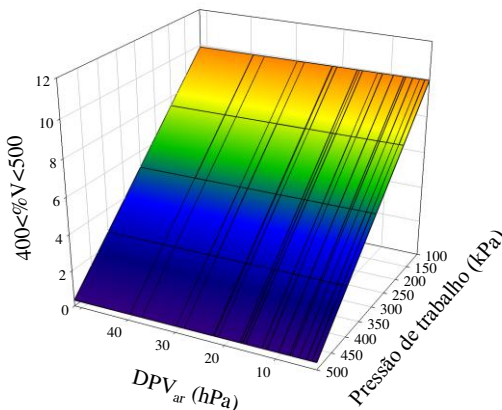
(b)

$$400 < \%V < 500 = 12,3465 - 0,00121412^{**} DPV - 0,0239046^{**} P$$

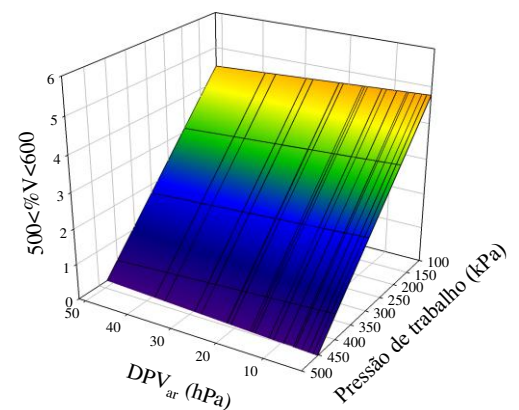
$$R^2 = 0,9021$$

$$500 < \%V < 600 = 6,13742 - 0,00644857^{**} DPV - 0,013521^{**} P$$

$$R^2 = 0,8506$$



(c)



(d)

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t.

FIGURA 5 – Estimativas da porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 200 e 300 μm , por gotas com diâmetro entre 300 e 400 μm , por gotas com diâmetro entre 400 e 500 μm e por gotas com diâmetro entre 500 e 600 μm em função do DPV_{ar} e da pressão de trabalho. (a) $200 < \%V < 300$; (b) $300 < \%V < 400$; (c) $400 < \%V < 500$; e (d) $500 < \%V < 600$.

A ocorrência de evaporação é favorecida pela elevação do DPV_{ar} , portanto uma diminuição da porcentagem do volume pulverizado composta por estes diâmetros de gotas com o aumento do DPV_{ar} , significa que as gotas pulverizadas estão sendo evaporadas. Provavelmente esta evaporação só não está sendo maior, porque parte do volume perdido pela evaporação de gotas da faixa de diâmetro de 200 a 300 μm é compensada pela evaporação de gotas da faixa de diâmetro de 300 a 400 μm , e assim por diante.

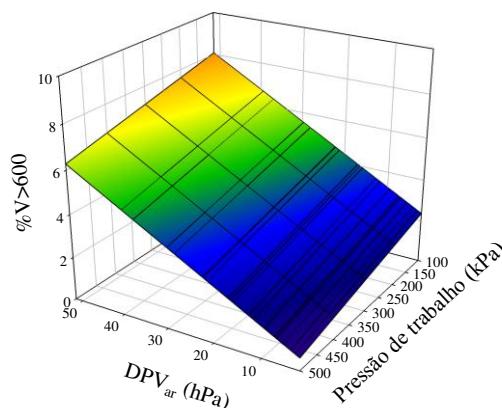
Como comentado anteriormente, o aumento da pressão de trabalho diminui o diâmetro de gotas. Este é o motivo no qual há redução na porcentagem do volume pulverizado composta por estes diâmetros de gotas, corroborando com Cunha et al. (2004), ao analisarem o espectro de gotas da ponta API 11002, em condições de laboratório.

Por se tratar de gotas com diâmetro muito grosso, o aumento da pressão de trabalho de 100 para 500 kPa extinguiu totalmente o volume pulverizado composto por gotas com diâmetro entre 500 e 600 μm para qualquer DPV_{ar} .

A porcentagem do volume pulverizado composta por gotas maiores que 600 μm aumentou com o aumento do DPV_{ar} e redução da pressão de trabalho. Porém, o DPV_{ar} apresentou influência muito superior sobre esta variável do que a pressão de trabalho (Figura 6).

$$\%V>600 = 2,55823 + 0,115523^{**} DPV - 0,00448536^{**} P$$

$$R^2 = 0,6124$$



** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t.

FIGURA 6 – Estimativa da porcentagem do volume pulverizado composta por gotas maiores que 600 μm em função do DPV_{ar} e da pressão de trabalho.

Um aumento do volume pulverizado composto por gotas maiores que 600 μm com a elevação do DPV_{ar} ocorre por haver uma grande evaporação das gotas pequenas. Assim, ao eliminar as pequenas gotas, há redução no volume total pulverizado, e, conseqüentemente, ocorre um aumento da porcentagem do volume pulverizado composta por gotas extremamente grossas, já que estas são minimamente afetadas pela evaporação enquanto ainda estão no ar.

Nascimento *et al.* (2012) observaram que gotas finas e médias apresentam deposições significativamente menores em horários com temperatura de 34,2 °C e 29 % de umidade relativa, em relação a horários com temperatura de 18 °C e 79 % de umidade, e que gotas grossas não apresentam diferença significativa. Souza *et al.* (2007) avaliando a deposição de gotas produzidas por três modelos de ponta, constataram que o aumento no tamanho de gotas reduziu as perdas por evaporação e deriva, e, conseqüentemente, maior volume ficou retido nas folhas do terço superior da planta. Já Xu *et al.* (2010b) relataram que gotas com diâmetro de 600 μm apresentam tempo de evaporação 279 % maior que gotas de 300 μm , quando estas já estão depositadas no alvo.

Este aumento da porcentagem do volume pulverizado composta por gotas maiores que 600 μm , explica o aumento apresentado nos valores de DMV e Dv_{90} com o aumento do DPV_{ar} , e estes, conseqüentemente, alteram o SPAN.

Como o espectro de gotas foi alterado com o DPV_{ar} , estes dados mostram que em condições psicrométricas críticas há influência direta do clima no comportamento das gotas pulverizadas, portanto antes de cada aplicação de agrotóxico, deve-se ficar atento às condições psicrométricas do ar para garantir a eficácia e a eficiência na pulverização de agrotóxicos.

CONCLUSÕES

Nas condições em que o trabalho foi conduzido, pode-se concluir que:

- Há influência do DPV_{ar} no comportamento do espectro de gotas;
- O aumento do DPV_{ar} reduz a porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm , entre 200 e 300 μm , entre 300 e 400 μm , entre 400 e 500 μm e entre 500 e 600 μm ;
- O aumento do DPV_{ar} aumenta o DMV, o Dv_{90} , o SPAN e a porcentagem do volume pulverizado composta por gotas maiores que 600 μm .

BIBLIOGRAFIA

ALVARENGA, C.B.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; SIQUEIRA, D. L.; SASAKI, R. S.; RODRIGUES, D. E. Déficit de pressão de vapor d'água no ar na distribuição de líquido utilizando um pulverizador hidropneumático. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 2, p. 81-87, abr/jun. 2013.

ALVES, S. M. F.; FERNANDES, P. M.; MARIN, J. O. B. Condições de trabalho associadas ao uso de agrotóxicos na cultura de tomate de mesa em goiás. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1737-1742, nov/dez. 2008.

American Society of Agricultural Engineers – ASAE. **Spray nozzle classification by droplet spectra**. ASAE S572.1, St. Joseph, MI, 2009. 4p.

ARVIDSSON, T.; BERGSTRÖM, L.; KREUGER, J. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. **Pest Management Science**, Chichester, West Sussex, Reino Unido, v. 67, p. 586-598, 2011.

Associação Nacional de Defesa Vegetal – ANDEF. **Manual de Tecnologia de Aplicação de Produtos Fitossanitários**. 1ª edição, Campinas: Linea Creativa, 2004. 50 p.

BALAN, M. G.; ABI-SAAB, O. J. G.; SILVA, C. G.; RIO, A. Deposição da calda pulverizada por três pontas de pulverização sob diferentes condições meteorológicas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 2, p. 293-298, abr/jun. 2008.

BEDOS, C.; CELLIER, P.; CALVET, R.; BARRIUSO, E. Occurrence of pesticides in the atmosphere in France. **Agronomie**, Thiverval-Grignon, France, v. 22, n. 1, p. 35-49, jan/fev. 2002.

CHAIM, A.; VALARINI, P. J.; PIO, L. C. Avaliação de perdas na pulverização de agrotóxicos na cultura do feijão. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 10, p. 13-22, 2000.

COUTINHO, P.; CORDEIRO, C. M. **A ponta de pulverização** – cuidados na escolha. Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas II – Encontro Técnico, 2004, 122 p.

CUNHA, J. P. A. R. Simulação da deriva de agrotóxicos em diferentes métodos de aplicação. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 4, p. 487-493, out/dez. 2008.

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

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

CUNHA, J. P. A.; TEIXEIRA, M. M.; VIEIRA, R. F.; FERNANDES, H. C.; COURY, J. R. Espectro de gotas de bicos de pulverização hidráulicos de jato plano e de jato cônico vazio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 10, p. 977-85, out. 2004.

GIL, Y.; SINFORT, C.; BRUNET, Y.; POLVECHE, V.; BONICELLI, B. Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying. **Atmospheric Environment**, Philadelphia, v. 41, n. 14, p. 2945-2957, 2007.

GIMENES, M. J.; ZHU, H.; RAETANO, C. G.; OLIVEIRA, R. B. Dispersion and evaporation of droplets amended with adjuvants on soybeans. **Crop Protection**, Philadelphia, v. 44, p. 84-90, 2013.

International Organization for Standardization – ISO. **Equipment for crop protection - Spraying equipment - Part 1: test methods for sprayer nozzles**. ISO 5682-1, Geneva, 1996. 5 p.

JUNIOR, W. C. J.; ZAMBOLIM, L.; ALVES, F. R.; SILVA, L. G.; RABELLO, L. K. C. Efeito do clima na eficiência dos fungicidas empregados no manejo de doenças de

plantas. In: ZAMBOLIM, L. et al. (Ed.). **Produtos fitossanitários (Fungicidas, Inseticidas, Acaricidas e Herbicidas**. Viçosa: UFV, 2008. cap. 2, p. 27-76.

KÖPPEN, W. **Climatologia como um estúdio de los climas de tierra**. México: Fondo de Cultura Econômica, 1948. 478 p.

MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods**. London: Blackwell Science, 3rd Edition. 2000. 448 p.

NASCIMENTO, A. B.; OLIVEIRA, G. M.; BALAN, M. G.; HIGASHIBARA, L. R.; SAAB, O. J. G. A. Deposição de glifosato e utilização de adjuvante para diferentes pontas de pulverização e horário de aplicação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 5, n. 2, p. 105-110, mai/ago. 2012.

RAETANO, C. G. Introdução ao estudo da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários. In: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (Org.). **Tecnologia de aplicação para culturas anuais**. Passo Fundo: Aldeia Norte; Botucatu: FEPAF, 2011. cap. 1, p. 15-26.

RODRIGUES, H. J. B.; COSTA, R. F.; RIBEIRO, J. B. M.; FILHO, J. D. C. S.; RUIVO, M. L. P.; JÚNIOR, J. A. S. Variabilidade sazonal da condutância estomática em um ecossistema de manguezal amazônico e suas relações com variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 2, p. 189-196. 2011.

ROMAN, E. S.; VARGAS, L.; RIBEIRO, M. C. F.; LUIZ, A. R. M. Influência do orvalho e volume de calda de aplicação na eficácia do glyphosate na dessecação de *Brachiaria plantaginea*. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 479-482, jul/set. 2004.

SANTOS, J. L.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA JR. R. S.; INOUE, M. H.; SALES, J. G. C.; HOMEM, L. M. Influência do orvalho na eficiência do glyphosate sobre *Brachiaria decumbens*. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 285-291, 2004.

SOUZA, R. T.; CASTRO, R. D.; PALLADINI, L. A. Depósito de pulverização com diferentes padrões de gotas em aplicações na cultura do algodoeiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. especial, p. 75-82, jan. 2007.

VIANELLO, R. L.; ALVES A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Editora UFV, 2002. 449 p.

TOBI, I.; SAGLAM, R.; KUP, F.; SAHIN, H.; BOZDOGAN, A. M.; PISKIN, B.; SAGLAM, C. Determination of accuracy level of agricultural spraying application in Sanliurfa/Turkey. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 6, n. 28, p. 6064-6072, nov. 2011.

XU, L.; ZHU, H.; OZKAN, H. E., BAGLEY, W. E., DERKSEN, R. C.; KRAUSE, C. R. Adjuvant Effects on evaporation time and wetted area of droplets on waxy leaves. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 53, n. 1, p. 13-20, 2010a.

XU, L.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; BAGLEY, W. E.; KRAUSE, C. R. Droplet evaporation and spread on waxy and hairy leaves associated with type and concentration of adjuvants. **Pest Management Science**, Chichester, West Sussex, Reino Unido, v. 67, n. 7, p. 842-851, mar. 2011.

XU, L.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; THISTLE H. W. Evaporation rate and development of wetted area of water droplets with and without surfactants at different locations on waxy leaf surfaces. **Biosystems Engineering**, Philadelphia, v. 106, n. 1, p. 58-67, mar. 2010b.

YU, Y.; ZHU, H.; FRANTZ, J. M.; REDING, M. E.; CHAN, K. C.; OZKAN, H. E. Evaporation and coverage area of pesticide droplets on hairy and waxy leaves. **Biosystems Engineering**, Philadelphia, v. 104, n. 3, p. 324-334, set. 2009a.

YU, Y.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; DERKSEN, R. C.; KRAUSE, C. R. Evaporation and deposition coverage area of droplets containing insecticides and spray additives on hydrophilic, hydrophobic, and crabapple leaf surfaces. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 52, n. 1, p. 39-49, 2009b.

ARTIGO III

Efeito do déficit de pressão de saturação de vapor d'água na
evaporação do líquido pulverizado

Efeito do déficit de pressão de saturação de vapor d'água na evaporação do líquido pulverizado

RESUMO

A evaporação de gotas além de causar grande prejuízo ao agricultor devido a um deficiente controle fitossanitário, também pode contaminar o ambiente e trazer graves problemas à sociedade. Deste modo, objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da pulverização na temperatura e na umidade relativa, e estimar e modelar a perda de agrotóxicos por evaporação em função das condições psicrométricas do ar. O experimento foi realizado dentro de uma câmara climática para permitir a obtenção dos déficits de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}). O estudo do efeito da pulverização na temperatura e na umidade relativa foi feito utilizando vinte DPV_{ar} (2,3; 3,2; 4,2; 5,6; 7,0; 7,4; 9,5; 11,7; 12,7; 15,8; 16,4; 16,9; 21,2; 22,1; 22,2; 28,1; 29,7; 36,9 39,4 e 51,6 hPa) e a pressão de trabalho de 300 kPa. A perda estimada de líquido por evaporação foi montada em delineamento inteiramente casualizado com os vinte DPV_{ar} e três repetições. Mesmo obedecendo às condições climáticas recomendadas para uma aplicação de agrotóxicos segura, houve perda de líquido pulverizado por evaporação. Houve aumento de umidade relativa e redução da temperatura do ar após eventos de pulverização de agrotóxicos. Para a ponta LD 11002 e pressão de trabalho de 300 kPa, a perda de agrotóxicos por evaporação pode alcançar 27 % aproximadamente sob condições meteorológicas caracterizadas por baixa velocidade do ar, alta temperatura e baixa umidade relativa do ar.

Palavras-chave: Evaporação de gotas, diâmetro de gotas, tecnologia de aplicação.

Effect of air vapor pressure deficit on evaporation of sprayed liquid

ABSTRACT

The droplet evaporation causes financial losses for the farmer due to poor pest control, and may cause environmental contamination. Thus, the aim of this work to evaluate the effect of spraying on temperature and relative humidity, and estimate and model the spraying losses by evaporation depending on air psychrometric conditions. The experiment was carried out inside of a climate chamber to obtain the vapor pressure deficits (VPD_{air}). Twenty VPD_{air} (2.3; 3.2; 4.2; 5.6; 7.0; 7.4; 9.5; 11.7; 12.7; 15.8; 16.4; 16.9; 21.2; 22.1; 22.2; 28.1; 29.7; 36.9 39.4 e 51.6 hPa) and the working pressure of 300 kPa were used to study the effect of spraying on temperature and relative humidity. The study of losses by evaporation was conducted in a completely randomized design with twenty VPD_{air} and three replications. Even obeying the recommended climatic conditions for pesticides application, there was loss of sprayed volume by evaporation. The relative humidity increased and the temperature reduced after pesticides spraying. For the nozzle LD 11002 and working pressure of 300 kPa, the loss of pesticides by evaporation can reach approximately 27 % under weather conditions characterized by low wind velocity, high air temperature and low relative humidity.

Keywords: Droplet evaporation, droplets diameter, spraying technology.

INTRODUÇÃO

A evaporação de gotas além de causar grande prejuízo ao agricultor devido a um deficiente controle fitossanitário, também pode contaminar o ambiente e trazer graves problemas à sociedade.

Juntamente com a deriva, a evaporação de gotas pode representar de 45 a 59 % de perda do volume aplicado (ALVES *et al.*, 2008; CHAIM *et al.*, 2000), o que conseqüentemente podem contaminar as chuvas, nevoeiros ou até mesmo ficarem no ambiente na forma de gás (BEDOS *et al.*, 2002). Condições de baixa umidade relativa e alta temperatura do ar fazem com que as gotas evaporem quando ainda estão no ar e perdem todo o diluente criando partículas muito pequenas de químico concentrado que podem então ser carregadas por longas distâncias por meio do fluxo de ar e contaminar o ambiente (MATTHEWS, 2000; TOBI *et al.*, 2011).

Uma maior deposição de gotas no alvo pode ser obtida no horário da manhã em comparação ao horário da tarde, quando as condições de temperatura e umidade relativa são menos favoráveis às aplicações de agrotóxicos (NASCIMENTO *et al.*, 2012). Porém, devido às proporções continentais do Brasil, o momento ideal para a aplicação, considerando-se as condições psicrométricas, varia de acordo com as regiões agrícolas (ALVARENGA *et al.*, 2013b). Geralmente, umidades relativas do ar baixas estão associadas a temperaturas do ar elevadas, porém a redução ou mesmo um aumento de umidade relativa não significa ter havido uma mudança na concentração de vapor d'água do ar, pois, com o aumento da temperatura, ocorre a expansão da massa de ar e isto aumenta a capacidade deste ar em conter vapor d'água (SANTOS *et al.*, 2013). Assim, o momento ideal para a pulverização deve apresentar condições psicrométricas do ar com temperatura entre 15 e 30 °C e umidade relativa mínima de 55 %. Deve-se, também, observar a velocidade do vento, e este deve situar-se na faixa de 3 a 7 km/h (ANDEF, 2004; RAETANO, 2011).

Diversos pesquisadores, ao trabalharem com evaporação, utilizam para definir as condições psicrométricas do ar o déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), visto que a taxa na qual gotas d'água evaporam depende quase que inteiramente do diâmetro e do DPV_{ar} entre a superfície da gota e o ar ao redor (ARVIDSSON *et al.*, 2011). O DPV_{ar} é a diferença entre a pressão exercida pela saturação de vapor d'água no ar e a pressão parcial de vapor d'água, e estes estão diretamente relacionados à umidade relativa e à temperatura do ar. A pressão de saturação do vapor d'água depende da temperatura, e à medida que esta aumenta, maior

será a pressão de saturação. Já a pressão parcial de vapor depende da umidade relativa juntamente com a pressão de saturação, e será cada vez maior com o aumento da umidade. Se a umidade relativa atingir 100 %, a pressão parcial será igual à pressão de saturação e, conseqüentemente, o DPV_{ar} será nulo, caso o ar não estiver saturado, a pressão parcial de vapor será menor que aquela que prevaleceria em condições saturadas, à mesma temperatura (VIANELLO; ALVES, 2002; RODRIGUES *et al.*, 2011).

A pressão de vapor do agrotóxico também tem influência direta na evaporação das gotas, e isso ocorre porque esta determina a taxa de concentração de equilíbrio entre a água e o ar (MILHOME *et al.*, 2009). Esta propriedade química está em função do tamanho e dos grupos funcionais do composto orgânico e é a principal propriedade da molécula a ser utilizada no cálculo de sua volatilização, para prever a sua entrada na atmosfera em concentrações significativas (SILVA; FAY, 2004). Assim, quando um agrotóxico apresenta alto valor de pressão de vapor, considera-se que este evaporará mais facilmente em relação a um agrotóxico que apresente pressão de vapor baixa, conseqüentemente se este agrotóxico for adicionado à calda, este pode facilitar a evaporação das gotas oriundas desta mistura.

Os aditivos presentes no agrotóxico adicionado à calda podem reduzir o tempo para a evaporação da gota. Yu *et al.* (2009a) não acharam influência significativa do tipo e da concentração de agrotóxicos no tempo de evaporação de gotas d'água, porém Yu *et al.* (2009b) constataram que gotas d'água tiveram um leve aumento no tempo de evaporação em comparação a gotas de inseticidas, o que se deve ao fato dos inseticidas geralmente conterem uma pequena porção de surfactantes. Estes surfactantes aumentam o espalhamento das gotas sobre a superfície provocando uma rápida troca de calor entre o filme de líquido e o ar e, conseqüentemente, menor é o tempo de evaporação (GIMENES *et al.*, 2013).

Deste modo, objetivou-se com este trabalho, avaliar o efeito da pulverização na temperatura e na umidade relativa, e estimar e modelar perdas de agrotóxicos por evaporação em função das condições psicrométricas do ar, visando minimizar o impacto ambiental e garantir a segurança do operador durante as aplicações.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas (LADA), pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa – Minas Gerais. O clima da região é, de acordo com a classificação de Köppen (1948), 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 (VIANELLO; ALVES, 2002).

Os experimentos foram realizados no interior de uma câmara climática (Figura 1) para permitir a obtenção das condições psicrométricas a serem utilizadas neste trabalho. Esta câmara apresenta um volume de 9,7 m³ e tem a possibilidade de controlar a umidade relativa na faixa compreendida entre 30 e 90 % e a temperatura do ar entre 0 e 40 °C.



FIGURA 1 – Interior da câmara climática utilizada para controle da temperatura e da umidade relativa do ar

O déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), determinado pelos valores de temperatura e umidade relativa dentro da câmara climática, foi calculado a partir da equação de Tetens (VIANELLO; ALVES, 2002; Rodrigues *et al.*, 2011), sendo obtido pela diferença entre a pressão de saturação de vapor d'água no ar

(e_s) e a pressão parcial de vapor d'água (e). Para o cálculo de e_s foi levado em consideração o valor da temperatura do ar, conforme a Equação 1.

$$e_s = 6,1078 (10)^{\frac{7,5 t}{237,3 + t}} \quad \text{Eq.1}$$

em que

e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa); e ,

t = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Posteriormente, foi determinado o valor de e , a partir da umidade relativa do ar e do valor de e_s .

$$e = \frac{\text{UR } e_s}{100} \quad \text{Eq.2}$$

em que

e = pressão parcial de vapor d'água no ar (hPa); e ,

UR = umidade relativa do ar (%).

Finalmente, foi obtido o DPV_{ar} , como relatado anteriormente, usando a diferença entre e_s e e .

$$\text{DPV}_{\text{ar}} = e_s - e \quad \text{Eq.3}$$

em que

DPV_{ar} = déficit da pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa).

As condições de temperatura e umidade relativa do ar para obtenção do DPV_{ar} foram estabelecidas intencionalmente para representar situações favoráveis e desfavoráveis à pulverização, visando à avaliação do efeito da temperatura e da umidade relativa na pulverização. Os resultados desta pesquisa podem ser utilizados na estimativa da evaporação do líquido pulverizado em diferentes condições de campo. Desde modo, valores de temperatura de 20, 25, 30, 35 e 40 $^{\circ}\text{C}$ foram combinados com valores de umidade relativa do ar de 30, 50, 70 e 90 %, possibilitando a avaliação da evaporação do líquido pulverizado em vinte condições distintas de DPV_{ar} , como especificado no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores de déficits de pressão de saturação de vapor d'água para diferentes condições psicrométricas do ar

Temperatura do ar (°C)	Umidade Relativa do ar (%)	DPV _{ar} (hPa)
20	30	16,4
	50	11,7
	70	7,0
	90	2,3
25	30	22,2
	50	15,8
	70	9,5
	90	3,2
30	30	29,7
	50	21,2
	70	12,7
	90	4,2
35	30	39,4
	50	28,1
	70	16,9
	90	5,6
40	30	51,6
	50	36,9
	70	22,1
	90	7,4

A área delimitada pelas distintas combinações de temperatura e umidade relativa do ar, conforme especificadas no Quadro 1, podem ser visualizadas no gráfico psicrométrico, conforme ilustrado na Figura 2.

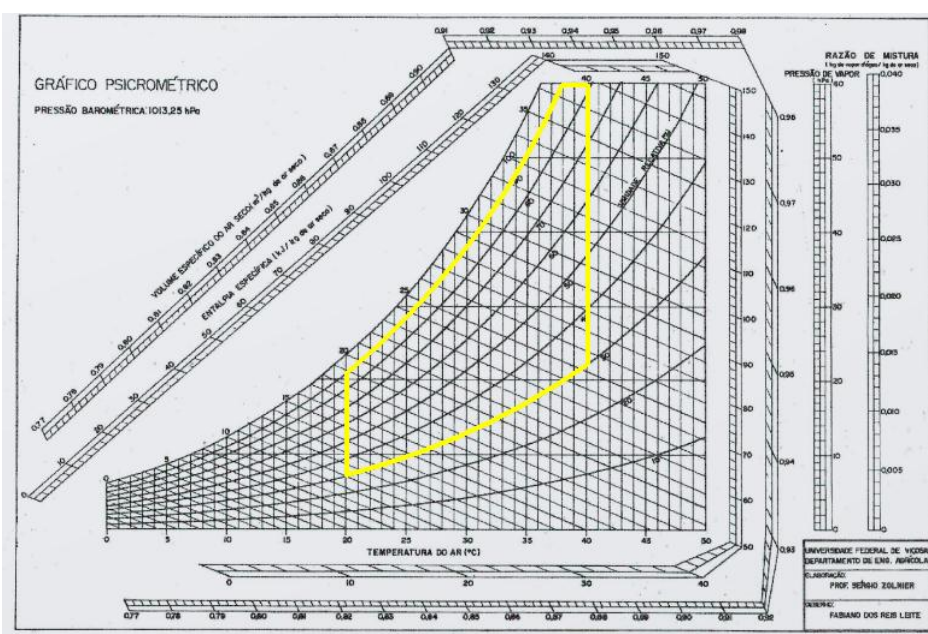


FIGURA 2 – Ilustração no gráfico psicrométrico dos limites operacionais do controle de temperatura e umidade relativa do ar para determinação das perdas por evaporação do líquido pulverizado.

Para medição das condições psicrométricas do ar no interior da câmara climática, foi utilizada uma sonda de temperatura e umidade relativa do ar (modelo HMP60, Vaisala, Woburn, Ma, USA), cujos intervalos de medição estão situados, respectivamente, entre - 40 e + 60 °C e 0 e 100 %. Os sinais analógicos de tensão elétrica dos dois sensores foram convertidos em sinais digitais por meio do microcontrolador Arduino Duemilanove, modelo ATmega328 e , posteriormente, enviados a um computador com um sistema serial de transmissão de dados. Os sinais de tensão elétrica foram convertidos em valores de temperatura e umidade relativa do ar segundo as seguintes equações:

$$T = - 40 + 20 \left(\frac{5}{1023} \right) \text{sinal_T}_{\text{ar}} \quad \text{Eq. 4}$$

em que

T = temperatura do ar (°C).

$$\text{UR} = 20 \left(\frac{5}{1023} \right) \text{sinal_UR} \quad \text{Eq.5}$$

em que

UR = umidade relativa (%).

O efeito da temperatura e umidade relativa do ar na evaporação do líquido pulverizado foi avaliado a partir da utilização de vinte valores distintos de DPV_{ar} , pressão de trabalho do sistema hidráulico de 300 kPa e uma ponta hidráulica de pulverização (modelo LD 11002, Lurmark, Cambridge, Reino Unido), que ficou localizada no centro da câmara climática com 9,7 m³ a uma altura de 1,0 m do piso. A ponta hidráulica foi instalada em uma válvula reguladora de pressão que somente liberava a passagem de água à pressão de 300 kPa.

Para determinação da perda de líquido pulverizado por evaporação, primeiramente foi obtida a eficiência evaporativa média no sistema experimental, consistindo de uma ponta de hidráulica LD 11002 que foi instalada em uma câmara climática com volume de 9,7 m³. Para isso, foram utilizadas as três combinações de temperatura e umidade relativa do ar que proporcionaram os três maiores valores de DPV_{ar} (36,9; 39,4 e 51,6 hPa).

Assim, após a estabilização de cada condição psicrométrica do ar, o sistema de pulverização foi acionado durante um intervalo de 10 s. Em seguida, o comportamento da temperatura e da umidade no interior da câmara climática foi monitorada durante 5 min, realizando três repetições para cada DPV_{ar} . Após a estabilização pós-pulverização,

o líquido que não sofreu evaporação e que foi depositado em bandejas colocadas abaixo da ponta de pulverização, foi pesado por uma balança de precisão com capacidade máxima de 1500 g e resolução de 0,01 g (modelo ARA520, OHAUS[®], Parsippany, NJ, USA). Além do líquido coletado nas bandejas, uma parte do líquido ficava acumulada na estrutura metálica de suporte da ponta, e para a quantificação deste líquido, foi utilizado toalhas de papel para a remoção e pesagem na balança. Anteriormente à realização do experimento, coletou-se o volume de líquido pulverizado durante os 10 s para conhecimento da massa total aplicada nos tratamentos. Para todos esses processos foram realizadas três repetições.

Assim, com a quantidade de líquido pulverizado e a quantidade de líquido coletado pelas bandejas e toalhas de papel, foi possível quantificar o líquido evaporado para cada repetição nestas três condições:

$$m_{ev} = m_t - m_b - m_p \quad \text{Eq.7}$$

em que

m_{ev} = massa de água evaporada na câmara climática (g);

m_t = massa total pulverizada (g);

m_b = massa depositada nas bandejas situadas abaixo da ponta de pulverização (g); e

m_p = massa retida nas barras de sustentação da ponta de pulverização (g).

A eficiência de evaporação no sistema operacional foi calculada pela seguinte equação:

$$\xi = \frac{\frac{m_{ev}}{v_c}}{\rho_{vsu} - \rho_v} 100 \quad \text{Eq.8}$$

em que

ξ = eficiência de evaporação no sistema experimental (%), constituído de uma ponta de pulverização (modelo LD 11002), que foi instalada em uma câmara climática com volume de 9,7 m³;

m_{ev} = massa de água evaporada na câmara climática (g);

v_c = volume da câmara climática (m³);

ρ_{vsu} = densidade absoluta de saturação do vapor d'água à temperatura do bulbo úmido (g m⁻³); e

ρ_v = densidade absoluta do vapor d'água, para uma condição específica de temperatura e umidade relativa do ar (g m⁻³).

Para o cálculo das variáveis ρ_{vsu} e ρ_v , foram utilizadas as seguintes equações:

$$\rho_{vsu} = \frac{216,68 e_{su}}{T_u} \quad \text{Eq.9}$$

em que

e_{su} = pressão de saturação do vapor d'água no ar à temperatura de bulbo úmido (hPa); e

T_u = temperatura do bulbo úmido (K).

$$\rho_v = \frac{216,68 e}{T} \quad \text{Eq.10}$$

em que

e = pressão de vapor d'água no ar (hPa); e

T = temperatura do ar (K).

Após a determinação da eficiência média de evaporação (ξ_m) na câmara climática, obtida a partir das três condições que proporcionam os maiores valores de DPV_{ar} , foi então calculada a massa de água evaporada para todos os tratamentos especificados no Quadro 1, utilizando-se a seguinte equação:

$$m_{ev} = \frac{v_c \xi_m (\rho_{vsu} - \rho_v)}{100} \quad \text{Eq.11}$$

O potencial evaporativo da câmara climática, que é a quantidade máxima de vapor d'água que o ar pode absorver em cada tratamento, também foi calculado para ser comparado com a quantidade de líquido que foi evaporado:

$$p_{ev} = v_c (\rho_{vsu} - \rho_v) \quad \text{Eq.12}$$

em que

p_{ev} = potencial evaporativo da câmara (g).

Por fim, foi estimada a perda de líquido pulverizado por evaporação, por meio do cálculo da fração de líquido evaporada:

$$F_{ev} = \frac{q}{v_t} 100 \quad \text{Eq.13}$$

em que

F_{ev} = fração evaporada do total pulverizado em cada tratamento como especificado no Quadro 1 (%);

m_{ev} = quantidade de líquido evaporado (g); e

v_t = quantidade de líquido pulverizado (g).

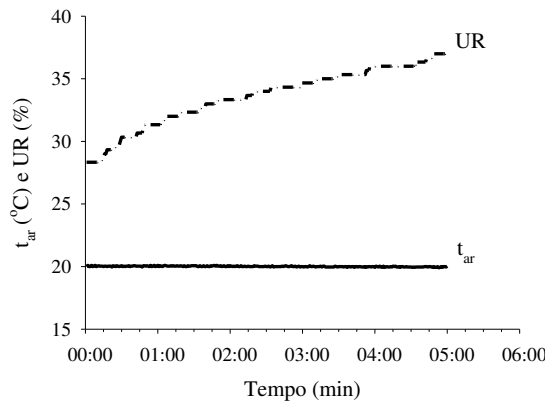
No interior da câmara climática foi colocado um ventilador da marca Ventisol, modelo VM20-01, com potência de 18 W e dimensões de pá de 5,5 x 9,0 x 2,0 cm, tralhando à rotação de 2550 rpm, para promover a homogeneização do ar.

A pressão utilizada nos experimentos foi obtida a partir de uma bomba hidráulica, marca Yamaho, com rotação de 70 a 900 rpm, vazão nominal entre 8 e 11 L min⁻¹, potência de 0,75 a 1,12 kW e pressão máxima de 3516 kPa. A bomba foi acionada por um motor elétrico, marca Weg, com rotação de 3570 rpm e potência de 1,5 kW.

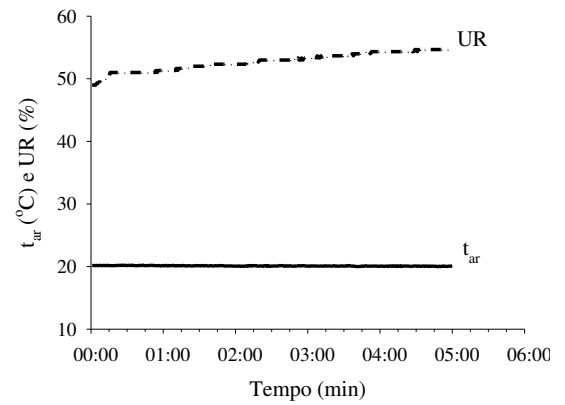
A análise estatística da fração de líquido evaporada foi realizada em delineamento inteiramente casualizado com vinte tratamentos (vinte DPV_{ar}) e três repetições. Os dados foram submetidos à análise de regressão, utilizando-se o teste “t”, ao nível de 1 % de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

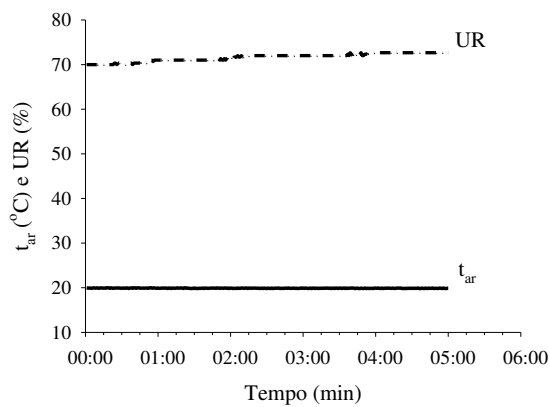
A pulverização alterou as condições psicrométricas no interior câmara, porém esta alteração ocorreu dependendo das condições em que a câmara se encontrava antes da pulverização. Nas Figuras 3 e 4, são apresentados os comportamentos da temperatura e da umidade relativa do ar após a pulverização de 0,104 L de água, para a câmara com temperaturas iniciais, respectivamente, de 20 e 25 °C para quatro distintos valores iniciais de umidade relativa do ar (30, 50, 70 e 90 %).



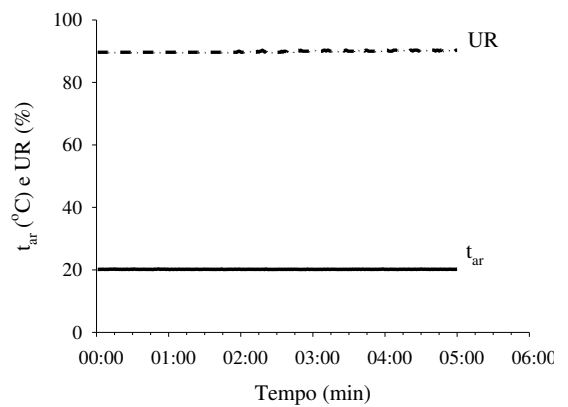
(a)



(b)

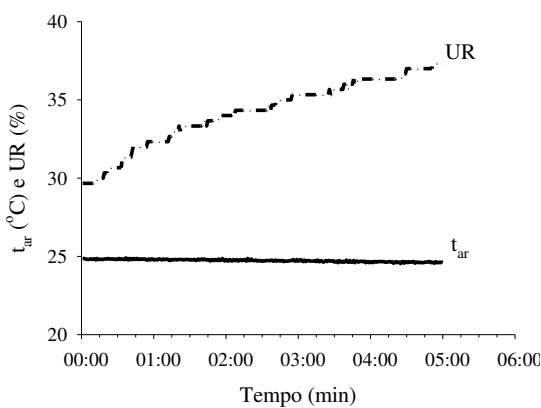


(c)

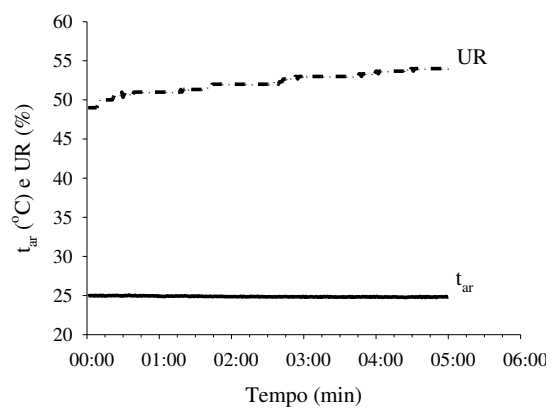


(d)

FIGURA 3 – Variação da temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR) no interior da câmara climática, em função do tempo transcorrido após a pulverização, para distintos valores iniciais de UR e t_{ar} de 20 °C. (a) 30 %; (b) 50 %; (c) 70 %; e (d) 90 %.



(a)



(b)

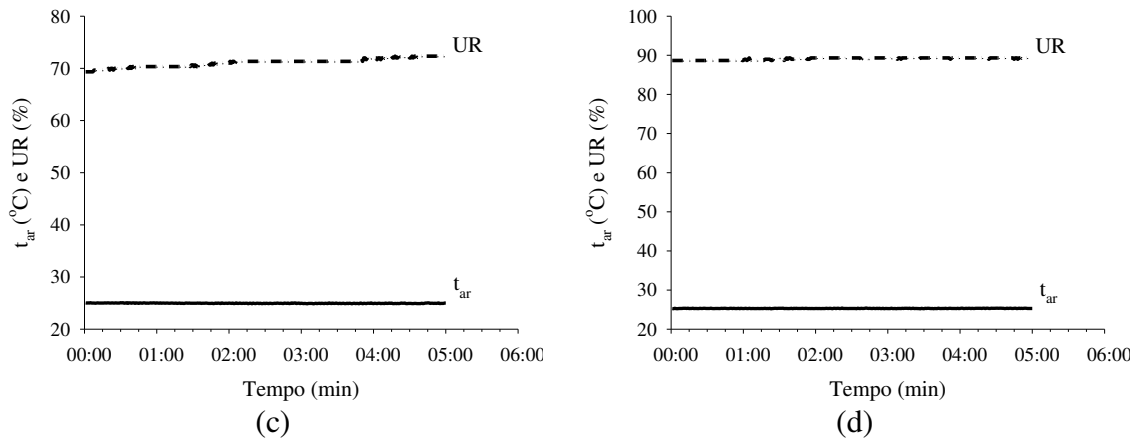
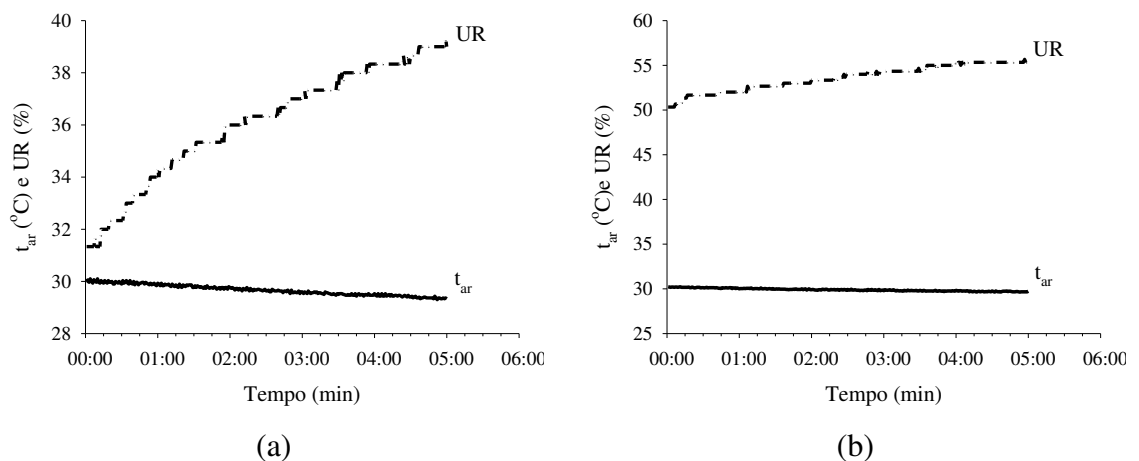
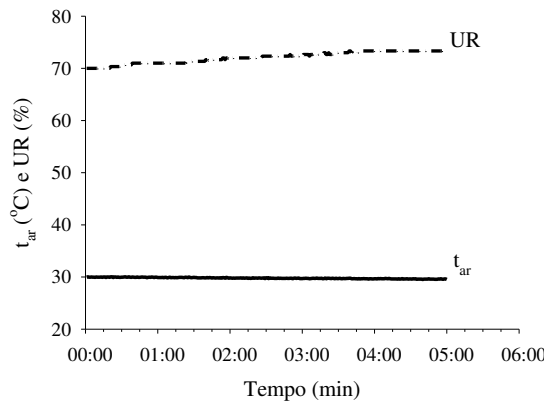


FIGURA 4 – Variação da temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR) no interior da câmara climática, em função do tempo transcorrido após a pulverização, para distintos valores iniciais de UR e t_{ar} de 25 °C. (a) 30 %; (b) 50 %; (c) 70 %; e (d) 90 %.

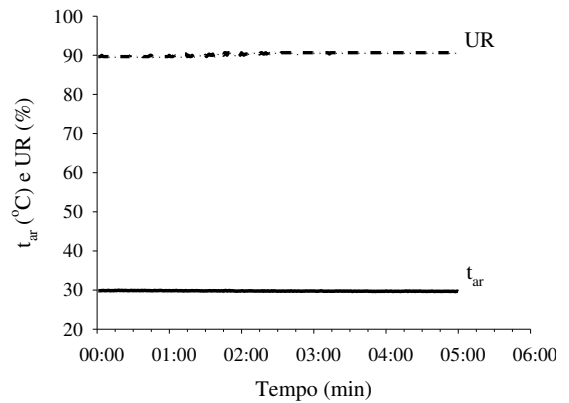
Apesar da temperatura do ar de 20 °C ser considerada ideal para a aplicação de agrotóxicos, quando a pulverização foi realizada nesta temperatura e a 30 % de umidade relativa do ar aproximadamente, observa-se que a umidade relativa do ar elevou-se para 37 % após cinco minutos de estabilização. Para condição inicial com umidade relativa de aproximadamente 50 %, houve acréscimo de 6 % de umidade após a pulverização. Já a 70 %, o ganho de umidade relativa foi somente 3 %, e a 90 % não houve alteração. O comportamento da temperatura e da umidade, para a câmara climática com temperatura antes da pulverização de 25 °C, foi bastante similar ao comportamento apresentado à temperatura de 20 °C, nas respectivas umidades relativa.

O comportamento da temperatura e da umidade relativa, para a câmara com temperatura inicial de 30 °C para quatro distintos valores iniciais de umidade relativa do ar (30, 50, 70 e 90 %) é mostrado na Figura 5.





(c)

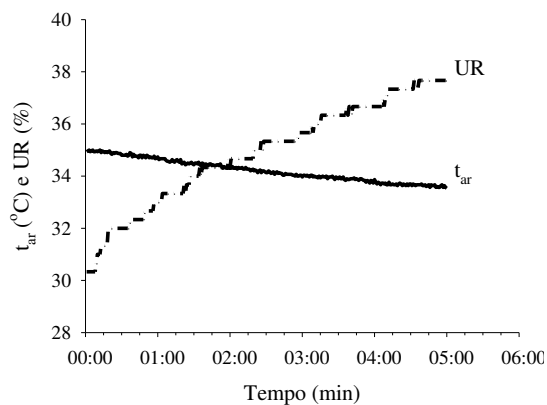


(d)

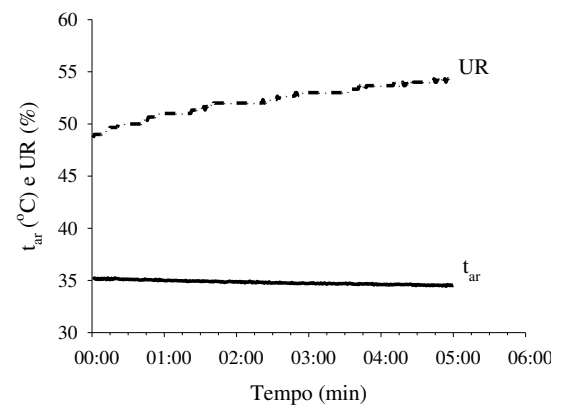
FIGURA 5 – Variação da temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR) no interior da câmara climática, em função do tempo transcorrido após a pulverização, para distintos valores iniciais de UR e t_{ar} de 30 °C. (a) 30 %; (b) 50 %; (c) 70 %; e (d) 90 %.

Diferentemente ao mostrado nas Figuras 3 e 4, a temperatura sofreu uma redução de 1 °C para a umidade relativa inicial da câmara climática de 30 %, e aproximadamente 0,5 °C para as umidades relativas de 50 % e 70 %. Isso ocorre porque o ar transfere energia térmica à água para que a mesma possa evaporar (VIANELLO E ALVES, 2002).

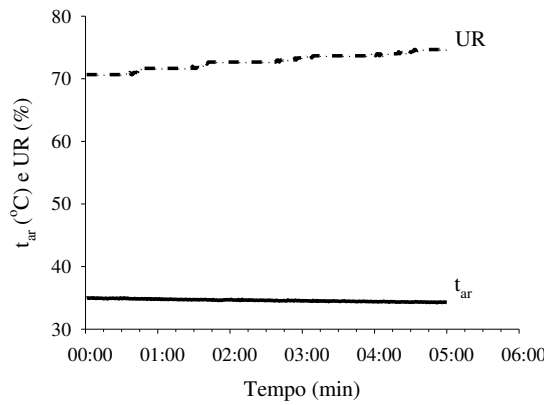
Nas Figuras 6 e 7 são mostrados os comportamentos da temperatura e da umidade relativa para a câmara climática com temperaturas iniciais, respectivamente, de 35 e 40 °C, para quatro distintos valores iniciais de umidade relativa do ar.



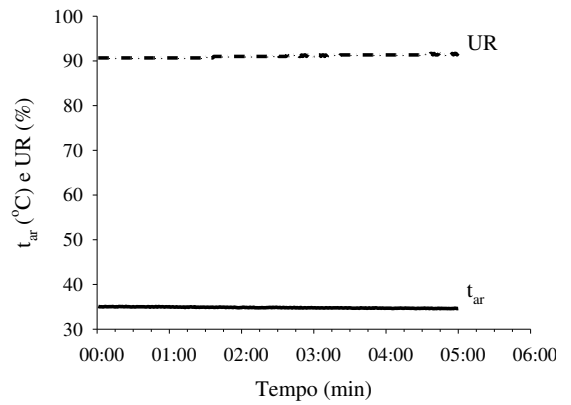
(a)



(b)

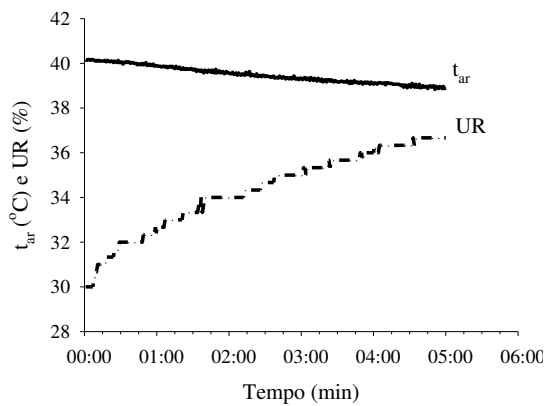


(c)

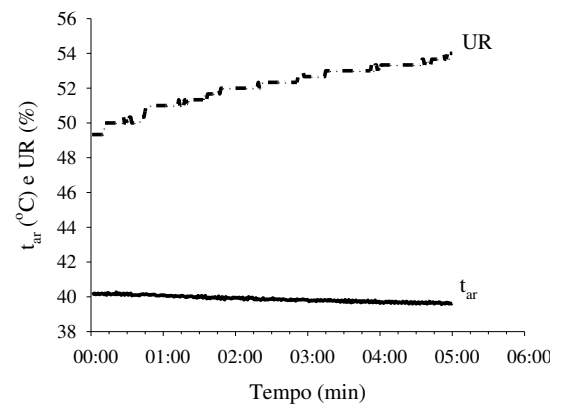


(d)

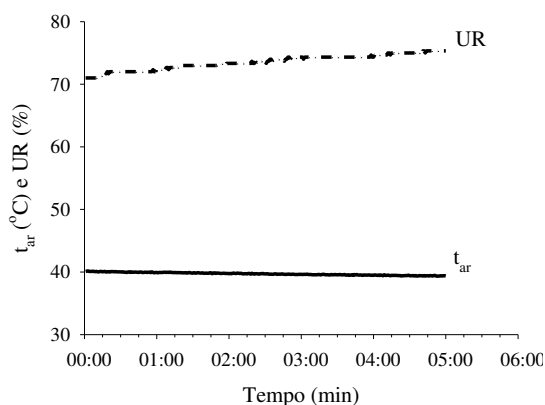
FIGURA 6 – Variação da temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR) no interior da câmara climática, em função do tempo transcorrido após a pulverização, para distintos valores iniciais de UR e t_{ar} de 35 °C. (a) 30 %; (b) 50 %; (c) 70 %; e (d) 90 %.



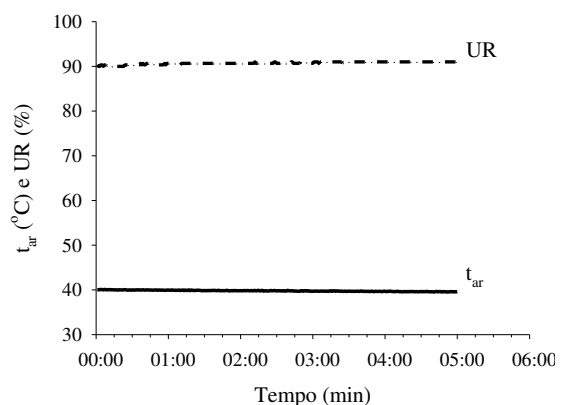
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 7 – Variação da temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR) no interior da câmara climática, em função do tempo transcorrido após a pulverização, para distintos valores iniciais de UR e t_{ar} de 40 °C. (a) 30 %; (b) 50 %; (c) 70 %; e (d) 90 %.

Assim como relatado nas Figuras 3, 4 e 5, nas condições mostradas nas Figuras 6 e 7 houve um elevado ganho de umidade após a pulverização, principalmente para a umidade relativa inicial de 30 %, provocado pela evaporação do líquido pulverizado. Nascimento *et al.* (2012), avaliando a deposição de agrotóxicos, observaram que em horários com temperatura de 34,2 °C e 29 % de umidade, gotas finas e médias apresentam deposições significativamente menores em relação a horários com 18 °C de temperatura e 79 % de umidade relativa do ar.

E similarmente à Figura 5, também houve uma redução da temperatura caracterizada pela troca de calor do ar com a água para que esta evapore, associado a um aumento da umidade relativa. A temperatura chegou a cair 1,3 °C para a temperatura de 40 °C e 30 % de umidade relativa.

Os resultados apresentados pelo comportamento da temperatura e da umidade relativa mostram que se for obedecida a recomendação sobre as condições climáticas ideais, a perda por evaporação poderá ser reduzida, porém não evitada, já que se houver pulverização em condições com temperatura igual a 30 °C e umidade relativa de 50 %, que é o limite da condição ideal, haverá evaporação de gotas, e conseqüentemente aumento da umidade relativa e redução da temperatura do ar próximo à barra de pulverização. Portanto, o ideal é realizar a aplicação de agrotóxicos quando a umidade relativa estiver próxima ou superior a 70 % e com temperaturas inferiores a 30 °C, porque apesar de mesmo à umidade de 70 % haver incremento de umidade após a pulverização, este aumento ainda foi inferior ao apresentado nas condições com umidade de 30 e 50 %.

Essas observações corroboram com Coutinho e Cordeiro (2004) e Junior *et al.* (2008), que dizem que embora gotas possam ser perdidas por evaporação em qualquer condição climática, as perdas são menores em condições de temperatura mais baixa e umidade relativa do ar mais elevada. E Cunha (2008), simulando a perda de agrotóxicos à temperatura de 28 °C e umidade relativa de 65 %, relatou que pontas com DMV de 134 µm têm 10 % do volume evaporado antes de atingir o alvo.

Com exceção ao ambiente saturado, em todas as outras condições psicrométricas, o ambiente apresenta capacidade para retenção de vapor d'água, ou seja, o ambiente apresenta um potencial para que haja a evaporação. O potencial de evaporação da câmara climática utilizada durante os experimentos está apresentado na Figura 8.

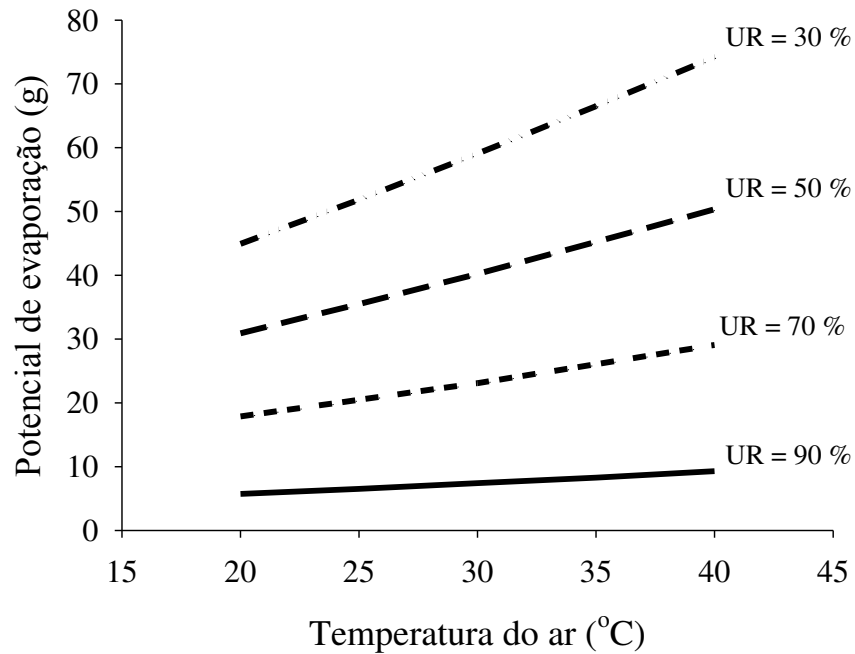


FIGURA 8 – Potencial de evaporação de água no ar da câmara climática em função da temperatura e distintos valores de umidade relativa (UR).

Como se observa na Figura 8, à medida que se aumenta a temperatura e diminui a umidade relativa, maior é o potencial de evaporação do líquido apresentado pelo ambiente.

O potencial evaporativo do ambiente a 90 % de umidade relativa variou de 5,72 a 9,30 g de vapor d'água, com o aumento da temperatura de 20 a 40 °C. Para o ambiente a 70, 50 e 30 % de umidade relativa, o potencial evaporativo variou, respectivamente, de 17,88 a 29,07 g, 30,91 a 50,34 g e 44,92 a 74,20 g, com a alteração da temperatura de 20 a 40 °C. Esta modificação do potencial evaporativo para diferentes condições psicrométricas ocorre, porque a umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de vapor d'água existente no ar e a quantidade que prevaleceria em condições saturadas, à mesma temperatura (ZOLNIER, 1994). Assim, se a umidade relativa do ar está baixa, significa que há pouco vapor d'água presente no ar, e quando há aumento da temperatura, maior é a capacidade deste mesmo ar em conter o vapor d'água (SANTOS *et al.*, 2013).

Mesmo que a câmara apresente um potencial evaporativo relativamente alto (74,20 g), ou seja, alta capacidade para retenção de vapor d'água, a quantidade estimada de líquido evaporado foi baixa, apresentando a maior evaporação de 23,7 g na temperatura de 40 °C e umidade relativa de 30%, como mostrado na Figura 9. Na condição com temperatura de 20 °C e umidade relativa de 90 %, que é considerada ótima para a aplicação de agrotóxico por apresentar baixo potencial evaporativo, houve evaporação, com uma perda de 1,9 g da quantidade de água aplicada, o que é

relativamente muito baixo. Isso mostra que, com exceção à condição de saturação de vapor d'água no ar, a evaporação ocorrerá em qualquer condição psicrométrica do ambiente, sendo esta evaporação expressiva ou não (Figura 9).

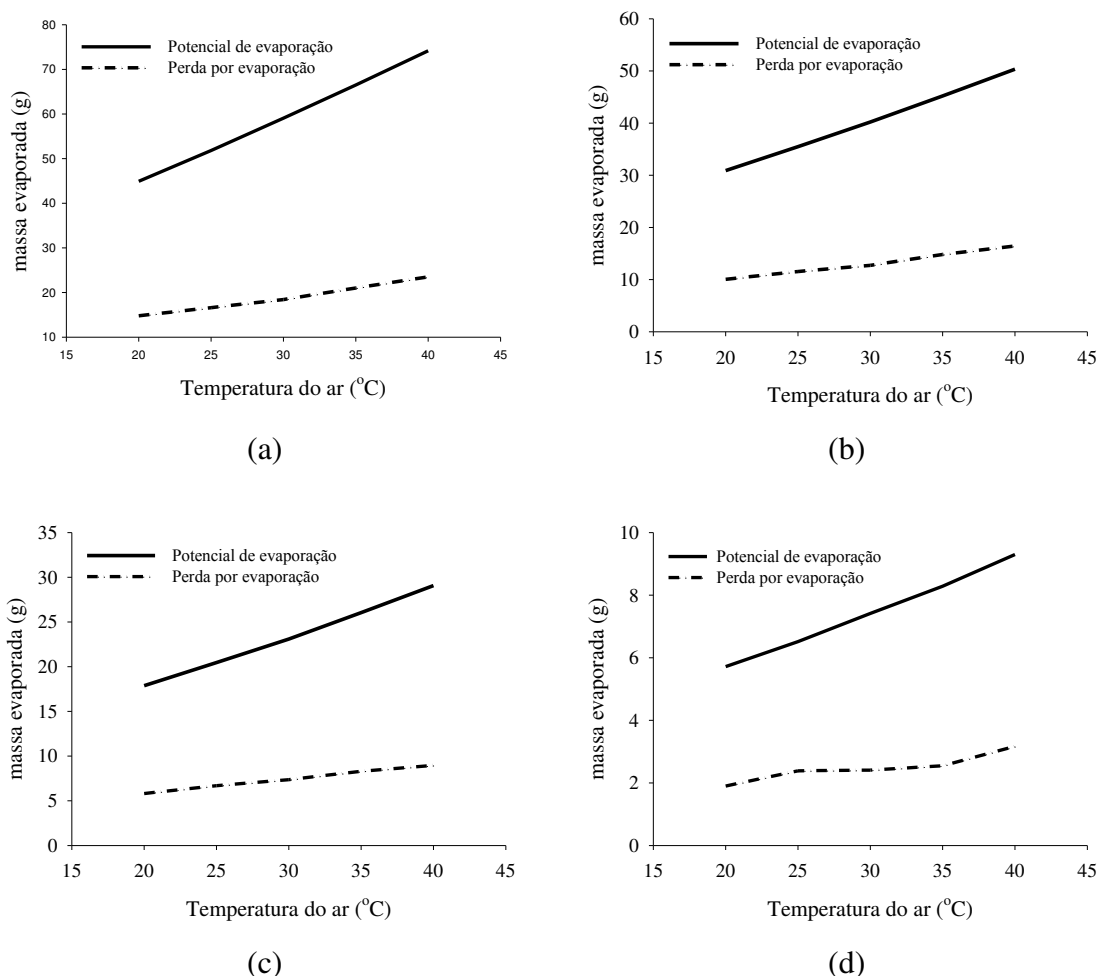


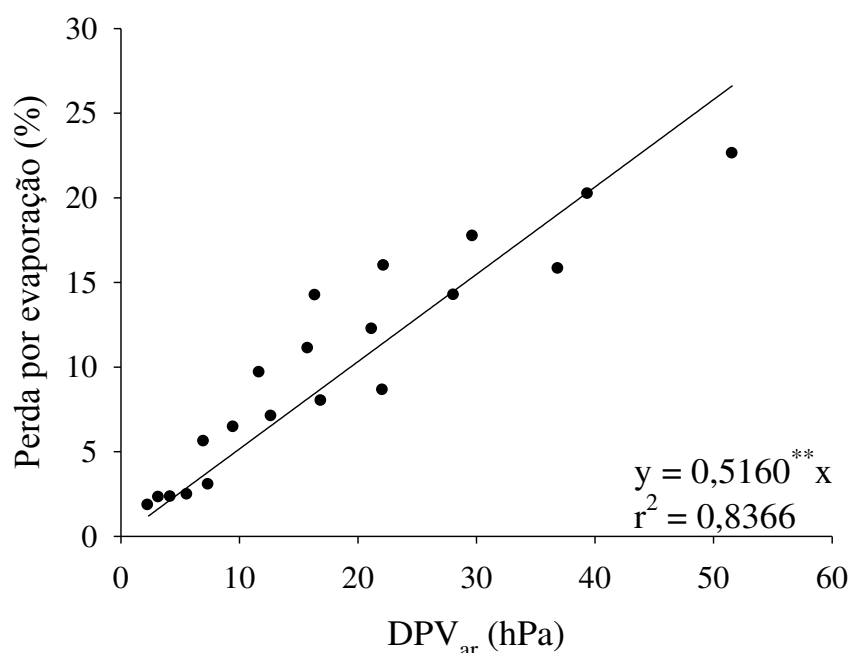
FIGURA 9 – Potencial de evaporação de água no ar da câmara climática e perda de água por evaporação, determinada com base na entalpia do ar, em função da temperatura e distintos valores de umidade relativa. (a) 30 %; (b) 50 %; (c) 70 %; e (d) 90 %.

Balan *et al.* (2008) constataram que a deposição resultante de pontas que produzem gotas muito finas a finas, diminui significativamente à medida que a temperatura aumenta e a umidade relativa do ar diminui. Porém, condições com baixa umidade relativa, além de propiciar uma elevada perda de agrotóxico por evaporação, também pode tornar a evaporação mais rápida. Yu *et al.* (2009a) relataram que o tempo para evaporação total de gotas com diâmetro de 246 μm reduziu 35 s ao alterar a umidade relativa de 90 para 30 %.

A perda estimada por evaporação para esta câmara só não foi maior, porque o volume da câmara que realmente está provocando a evaporação das gotas não é o

volume total da câmara, e sim o volume de ar que se encontra ao redor da ponta de pulverização. Assim, apesar da câmara climática apresentar alto potencial evaporativo, o sistema experimental apresenta baixa eficiência evaporativa, que para este caso foi de 32 %. Deste modo, o potencial real do DPV_{ar} sobre a evaporação de gotas está sendo subestimado. Portanto, se durante o cálculo da eficiência de evaporação do sistema experimental fosse utilizado o volume de ar que realmente causa a evaporação das gotas, ao invés do volume de ar de toda a câmara climática, esta eficiência seria maior.

A porcentagem do volume pulverizado perdido por evaporação em função do DPV_{ar} é apresentado na Figura 10. Como se pode observar, à medida que se aumenta o DPV_{ar} , maior será a porcentagem do volume pulverizado perdido por evaporação para o ambiente, chegando a aproximadamente 27 % com a ponta LD 11002 à pressão de trabalho de 300 kPa.



** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t.

FIGURA 10 – Relação entre a perda percentual de evaporação de água no ar e o déficit de pressão de saturação de vapor (DPV_{ar}) por meio da pulverização realizada com a ponta LD 11002 submetida à pressão de trabalho de 300 kPa.

A partir da análise de regressão, foi ajustada uma equação linear aos valores da perda percentual de evaporação do líquido pulverizado em função do déficit de pressão de saturação de vapor d'água. No entanto, este modelo fica limitado à metodologia empregada neste trabalho: DPV_{ar} compreendidos entre 0 e 51,6 hPa, câmara climática com 9,7 m³, ponta LD 11002, pressão de trabalho de 300 kPa e volume de calda de

0,104 L. Apesar de 2,3 hPa ser o menor valor empregado durante o experimento, a limitação do experimento ficou compreendida entre 0 e 51,6 hPa porque 0 hPa está próximo a 2,3 hPa e é fisicamente impossível haver evaporação nesta condição.

A tendência de aumentar a perda por evaporação com o aumento do DPV_{ar} pode explicar o comportamento da temperatura e umidade relativa após a pulverização. A maior perda de líquido pulverizado nos altos DPV_{ar} são o motivo de um significativo aumento da umidade relativa quando as pulverizações foram feitas nas umidades relativas de 30 e 50 %. Alvarenga *et al.* (2013a) relataram maior deposição de calda em condições meteorológicas favoráveis, DPV_{ar} menor que 8,6 hPa, pois consegue-se colocar o produto no alvo com maior facilidade, já em condições adversas, em razão da grande taxa de evaporação, estes autores afirmam que o agricultor deve buscar alternativas que possibilitem a chegada das gotas à planta. E Arvidsson *et al.* (2011) observaram que a cada aumento de 1 hPa no DPV_{ar} , a perda por deriva aumenta 0,30 % quando a pulverização é feita com pulverizadores hidráulicos com barra de 12 m de comprimento e em condições com DPV_{ar} variando de 1,1 a 7,2 hPa.

Provavelmente, para os mesmos DPV_{ar} , a perda por evaporação no campo será maior, já que as condições psicrométricas nesta situação são mais favoráveis à ocorrência da evaporação por haver constante renovação do ar ao redor da barra de pulverização, renovação que pode ser exercida pelo vento ou mesmo pelo deslocamento de ar provocado pelo avanço do trator. A troca por pontas que produzem gotas mais finas pode aumentar a perda por evaporação, visto que gotas finas são evaporadas mais rapidamente que gotas grossas (Yu *et al.*, 2009a).

CONCLUSÕES

Nas condições em que o trabalho foi conduzido, pode-se concluir que:

- Mesmo obedecendo às condições climáticas recomendadas para uma aplicação de agrotóxicos segura, há perda de líquido pulverizado por evaporação;

- Há aumento de umidade relativa e redução da temperatura do ar após eventos de pulverização de agrotóxicos;

- Para a ponta LD 11002 e pressão de trabalho de 300 kPa, a perda de agrotóxicos por evaporação pode alcançar 27 % aproximadamente sob condições meteorológicas caracterizadas por baixa velocidade do ar, alta temperatura e baixa umidade relativa do ar.

BIBLIOGRAFIA

ALVARENGA, C.B.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; SIQUEIRA, D. L.; SASAKI, R. S.; RODRIGUES, D. E. Déficit de pressão de vapor d'água no ar na distribuição de líquido utilizando um pulverizador hidropneumático. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 2, p. 81-87, abr/jun. 2013a.

ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; SASAKI, R. S.; RINALDI, P. C. N. Controle automático do espectro de gotas de pulverizador hidropneumático em função do déficit de pressão de vapor d'água no ar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 1, p. 26-33, jan./mar. 2013b.

ALVES, S. M. F.; FERNANDES, P. M.; MARIN, J. O. B. Condições de trabalho associadas ao uso de agrotóxicos na cultura de tomate de mesa em goiás. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1737-1742, nov/dez. 2008.

ARVIDSSON, T.; BERGSTRÖM, L.; KREUGER, J. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. **Pest Management Science**, Chichester, West Sussex, Reino Unido, v. 67, p. 586-598, 2011.

Associação Nacional de Defesa Vegetal – ANDEF. **Manual de Tecnologia de Aplicação de Produtos Fitossanitários**. 1ª edição, Campinas: Linea Creativa, 2004. 50 p.

BALAN, M. G.; ABI-SAAB, O. J. G.; SILVA, C. G.; RIO, A. Deposição da calda pulverizada por três pontas de pulverização sob diferentes condições meteorológicas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 2, p. 293-298, abr/jun. 2008.

BEDOS, C.; CELLIER, P.; CALVET, R.; BARRIUSO, E. Occurrence of pesticides in the atmosphere in France. **Agronomie**, Thiverval-Grignon, France, v. 22, n. 1, p. 35-49, jan/fev. 2002.

CHAIM, A.; VALARINI, P. J.; PIO, L. C. Avaliação de perdas na pulverização de agrotóxicos na cultura do feijão. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 10, p. 13-22, 2000.

COUTINHO, P.; CORDEIRO, C. M. **A ponta de pulverização** – cuidados na escolha. Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas II – Encontro Técnico, 2004, 122 p.

CUNHA, J. P. A. Simulação da deriva de agrotóxicos em diferentes condições de pulverização. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1616-1621, set./out. 2008.

GIMENES, M. J.; ZHU, H.; RAETANO, C. G.; OLIVEIRA, R. B. Dispersion and evaporation of droplets amended with adjuvants on soybeans. **Crop Protection**, Philadelphia, v. 44, p. 84-90, 2013.

JUNIOR, W. C. J.; ZAMBOLIM, L.; ALVES, F. R.; SILVA, L. G.; RABELLO, L. K. C. Efeito do clima na eficiência dos fungicidas empregados no manejo de doenças de plantas. In: ZAMBOLIM, L. et al. (Ed.). **Produtos fitossanitários (Fungicidas, Inseticidas, Acaricidas e Herbicidas)**. Viçosa: UFV, 2008. cap. 2, p. 27-76.

KÖPPEN, W. **Climatologia como um estúdio de los climas de tierra**. México: Fondo de Cultura Econômica, 1948. 478 p.

MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods**. London: Blackwell Science, 3rd Edition. 2000. 448 p.

MILHONE, M. A. L.; SOUSA, D. O. B.; LIMA, F. A. F.; NASCIMENTO, R. F. Avaliação do potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por pesticidas aplicados na agricultura do Baixo Jaguaribe, CE. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 363-372, jul/set. 2009.

NASCIMENTO, A. B.; OLIVEIRA, G. M.; BALAN, M. G.; HIGASHIBARA, L. R.; ABI-SAAB, O. J. G. Deposição de glifosato e utilização de adjuvante para diferentes pontas de pulverização e horário de aplicação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 5, n. 2, p. 105-110, mai/ago. 2012.

RAETANO, C. G. Introdução ao estudo da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários. In: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (Org.). **Tecnologia de**

aplicação para culturas anuais. Passo Fundo: Aldeia Norte; Botucatu: FEPAF, 2011. cap. 1, p. 15-26.

RODRIGUES, H. J. B.; COSTA, R. F.; RIBEIRO, J. B. M.; FILHO, J. D. C. S.; RUIVO, M. L. P.; JÚNIOR, J. A. S. Variabilidade sazonal da condutância estomática em um ecossistema de manguezal amazônico e suas relações com variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 2, p. 189-196. 2011.

SANTOS, B. R.; SOUZA, A. P.; SILVA, A. C.; ALMEIDA, F. T.; ARANTES, K. R.; SIQUEIRA, J. L. Planejamento da pulverização de fungicidas em função das variáveis meteorológicas na região de Sinop-MT. *Global Science and Technology*, Rio Verde, v. 6, n. 1, p. 72-88, jan/abr. 2013.

SILVA, C. M. M. S.; FAY, E. F. Agrotóxicos: aspectos gerais. In: SILVA, C. M. M. S.; FAY, E. F. (Ed.). **Agrotóxicos e ambiente**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. cap. 1, p. 17-74.

TOBI, I.; SAGLAM, R.; KUP, F.; SAHIN, H.; BOZDOGAN, A. M.; PISKIN, B.; SAGLAM, C. Determination of accuracy level of agricultural spraying application in Sanliurfa/Turkey. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 6, n. 28, p. 6064-6072, nov. 2011.

VIANELLO, R. L.; ALVES A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Editora UFV, 2002. 449 p.

YU, Y.; ZHU, H.; FRANTZ, J. M.; REDING, M. E.; CHAN, K. C.; OZKAN, H. E. Evaporation and coverage area of pesticide droplets on hairy and waxy leaves. **Biosystems Engineering**, Philadelphia, v. 104, n. 3, p. 324-334, set. 2009a.

YU, Y.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; DERKSEN, R. C.; KRAUSE, C. R. Evaporation and deposition coverage area of droplets containing insecticides and spray additives on hydrophilic, hydrophobic, and crabapple leaf surfaces. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 52, n. 1, p. 39-49, 2009b.

ZOLNIER, S. **Caderno didático 13 – Psicrometria I**. Viçosa: Engenharia na Agricultura, 1994. 14 p.