

## VELOCIDADE DE TAMANHO DE GOTAS DE PULVERIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO SUPERFICIAL E DA VISCOSIDADE DE CALDAS DE ÓLEO VEGETAL E SURFACTANTE

RAFAEL LUIZ PANINI<sup>1</sup>; ULISSES ROCHA ANTUNIASSI<sup>2</sup>; RONE BATISTA DE OLIVEIRA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Consultor em Tecnologia de Aplicação, CIMOTECH, Avenida Antenor de Almeida 1-199 E06, CEP 17047-590, Bauru, São Paulo, Brasil, rl\_panini@hotmail.com

<sup>2</sup> Professor Dr. Titular, Depto de Eng. Rural, FCA-UNESP, Rua José Barbosa de Barros, nº 1780, Caixa Postal 237, CEP 18610-307, Fazenda Lageado, Botucatu-SP, ulisses.antuniassi@unesp.br

<sup>3</sup> Professor Dr. Adjunto, Centro de Ciências Agrárias, UENP, Rodovia BR 369, km 54 Vila Maria CEP 86360-000, Bandeirantes, Paraná, Brasil, rone@uenp.edu.br

**RESUMO:** O presente trabalho tem por objetivo de quantificar a velocidade de diferentes tamanhos de gotas geradas por uma ponta de jato plano de faixa ampliada e determinar a correlação com a tensão superficial e a viscosidade das soluções aquosas de surfactante e óleo vegetal em diferentes concentrações. Foi utilizado o surfactante Agral® (0,0125; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5%, v/v) e o óleo vegetal Natur'óleo® (0,5; 5, 10, 15 e 17%, v/v), além de uma calda padrão (somente água). Os ensaios foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições. Para todas as concentrações determinou-se a viscosidade, a tensão superficial e a velocidade de gotas geradas pela ponta XR11003 (280 kPa). O espectro e a velocidade de gotas foram determinados por um analisador de partículas, modelo VisiSize Portable P15 (Oxford Lasers, Imaging Division, Oxford, U.K.). O sistema foi programado para determinar a velocidade das gotas em diferentes diâmetros: 50, 100, 150, 200, 250, 300 e 350 µm. Correlação de Pearson foi aplicada para verificar a relação entre a velocidade de gotas e a tensão superficial e a viscosidade. Também foram ajustados modelos para os dados de velocidade em função do tamanho de gotas, viscosidade e tensão superficial. Os resultados indicam que a relação da tensão superficial e viscosidade de caldas de adjuvantes dependem do tipo de adjuvante (vegetal ou surfactante). As emulsões formadas por óleo vegetal apresentam relação linear positiva entre concentração e viscosidade e negativa entre concentração e tensão superficial. O surfactante não apresentou relação linear da concentração com a viscosidade e apresentou relação linear negativa com a tensão superficial. A velocidade de gotas tem relação quadrática com o tamanho de gotas, independente dos adjuvantes utilizados (óleo vegetal ou surfactante). As relações de tamanho de gotas com viscosidade e tensão superficial são mais entendidas com gotas maiores que 100 µm.

**Palavras-chave:** velocidade de gotas, adjuvantes, tamanho de gotas.

## VELOCITY OF SPRAY DROPLETS SIZE IN FUNCTION OF THE SURFACE TENSION AND THE VISCOSITY CONTEND VEGETABLE OIL AND SURFACTANT

**ABSTRACT:** The present work aims to quantify the speed of different sizes of droplets generated by a flat jet tip with extended range and to determine the correlation with surface tension and viscosity of aqueous solutions of surfactant and vegetable oil in different concentrations. The surfactant Agral® (0.0125; 0.025; 0.05; 0.1; 0.2; 0.5%, v / v) and the vegetable oil Natur'óleo® (0.5; 5, 10, 15 and 17%, v / v), in addition to a standard syrup (water only). The tests were conducted in a completely randomized design with five replications. For all concentrations, viscosity and surface tension and droplet speed generated by the XR11003 tip (280 kPa) were determined. The spectrum and velocity of drops were determined by a particle analyzer, model VisiSize Portable P15 (Oxford Lasers, Imaging Division, Oxford, U.K.). The system was programmed to determine the speed of the drops in different diameters: 50, 100, 150, 200, 250, 300 and 350 µm. Pearson's correlation was applied to verify the relationship between the speed of drops

and the surface tension and viscosity. Models were also adjusted for speed data as a function of droplet size, viscosity and surface tension. The results indicate that the relationship between surface tension and viscosity of adjuvant mixtures depends on the type of adjuvant (vegetable or surfactant). Emulsions formed by vegetable oil have a positive linear relationship between concentration and viscosity and a negative relationship between concentration and surface tension. The surfactant showed no linear relationship between concentration and viscosity and showed a negative linear relationship with surface tension. The speed of droplets has a quadratic relationship with the size of droplets, regardless of the adjuvants used (vegetable oil or surfactant). Drop size relationships with viscosity and surface tension are best understood with drops larger than 100  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** velocity of droplet, adjuvants, viscosity. droplet size.

## 1 INTRODUÇÃO

O mecanismo de movimento das gotas após a sua formação pela ponta de pulverização é complexo, confirmando a necessidade de estudos mais precisos, pois essas informações são úteis para entender a penetração das gotas no dossel das plantas e o potencial risco de deriva (FRANÇA et al., 2017).

Dentre as técnicas utilizadas para melhorar a eficiência das aplicações de defensivos agrícolas, o uso de adjuvantes se destaca por aumentar a qualidade em diferentes fatores da tecnologia de aplicação. A maioria dos adjuvantes utilizados na agricultura são baseados em surfactantes que reduzem a tensão superficial (HAZEN, 2000). Dessa forma, as alterações físico-químicas provocadas por adjuvantes nas caldas de pulverização podem afetar parâmetros ligados ao espectro de gota como diâmetro mediano volumétrico, percentual de volume de gotas menores do que 100  $\mu\text{m}$  e amplitude relativa (BERNA, 2017; QUEIROZ, 2018).

Além desses parâmetros, a velocidade de gotas é muito importante no processo de aplicação de defensivos agrícolas. A velocidade das gotas de pulverização pode ser influenciada pelas propriedades físicas do líquido de pulverização (BUTLER-ELLIS, M. C.; TUCK, C. R.; MILLER, P. C. H., 1997).

Na população de gotas, as gotas de maiores tamanhos assumem maior velocidade (NUYTTENS et al., 2009). Compreender o que determina o tamanho e a velocidade das gotas na pulverização é fundamental para buscar a maneira mais eficiente de aplicação dos produtos fitossanitários nas plantas e

também reduzir a contaminação causada por deriva (SIJS e BONN, 2020).

No entanto, pouco se conhece sobre a relação direta da interferência da alteração da tensão superficial e viscosidade sobre a velocidade das gotas no processo de pulverização. O presente trabalho tem por objetivo de quantificar a velocidade de diferentes tamanhos de gotas geradas por uma ponta de jato plano de faixa ampliada e determinar a correlação com a tensão superficial e a viscosidade das soluções aquosas de surfactante e óleo vegetal em diferentes concentrações.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Máquinas para Pulverização do Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais (NEMPA) da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP, em Botucatu – SP.

A pulverização foi realizada com a ponta de jato plano de faixa ampliada modelo XR11003 (Teejet®), na pressão de 280 kPa.

O espectro de gotas da pulverização foi determinado pelo equipamento de análise de partículas, Oxford P-15 (Oxford lasers, UK) que utiliza a técnica de análises dinâmicas de partículas por imagens e contém como acessório o software medidor de velocidade de gotas. O sistema foi programado para contar dez mil gotas em cada repetição. Os dados coletados foram estratificados quanto ao diâmetro mediano volumétrico (DMV), da faixa de 50 a 350  $\mu\text{m}$ , com classes de 50 em 50  $\mu\text{m}$ . As gotas foram amostradas na altura de aplicação de 30 cm, estando o campo focal do equipamento centralizado e abaixo da ponta de

pulverização. O analisador de partículas foi ajustado para coletar dados de velocidade das gotas ( $\text{m s}^{-1}$ ), e a planilha de resultados foi segmentada de acordo com as seguintes classes de DMV estabelecidas (50; 100; 150; 200; 250; 300 e 250  $\mu\text{m}$ ).

As soluções aquosas de surfactante e óleo vegetal em diferentes concentrações foram preparadas em balões volumétricos de 1 litro. A viscosidade foi obtida por meio do viscosímetro com base no torque necessário para rotacionar um cilindro (spindle), submerso em 15 mL de solução analisada, marca Brookfield (modelo LVDV-II), conforme metodologia descrita por Carvalho (2016) e OLIVEIRA, R. B.; ANTUNIASI, U. R.; GANDOLFO, M. A. (2015). A tensão superficial foi determinada através do método gravimétrico, descrito por Oliveira e Antunias (2012). Para cada repetição foram computados os valores de peso de 10 gotas de cada adjuvante e concentração.

A água foi utilizada como referência em comparação com as demais concentrações. O surfatante utilizado foi o Agral®, classificado como espalhante adesivo do grupo químico Alquil Fenóis Etoxilado, com formulação em concentração solúvel, utilizado nas concentrações de 0,0125; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5%,  $\text{v v}^{-1}$ . O óleo vegetal utilizado foi o Natur'óleo®, classificado como inseticida de ação de contato e espalhante adesivo do grupo químico dos ésteres de ácidos graxos utilizado

nas concentrações de 0,5; 5, 10, 15 e 17%,  $\text{v v}^{-1}$ .

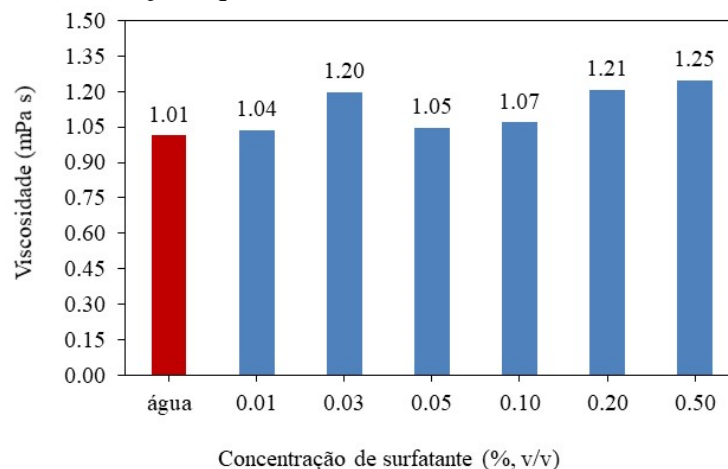
O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com cinco repetições.

A calda do surfactante e do óleo em diferentes concentrações foram analisados pela análise de variância (ANOVA), porém não houve nenhum modelo matemático significativo que explicasse a tensão superficial e a viscosidade em diferentes concentrações. Foram realizadas análises de correlação de Pearson ( $p < 0,05$ ) entre tamanho de gotas e os parâmetros de viscosidade e tensão superficial das caldas. Para melhor entendimento dos resultados foram elaborados gráficos superfície de resposta envolvendo os fatores causadores de variação e os parâmetros utilizados para análise. Foi ajustado um modelo quadrático validado pela significância dos parâmetros e pelos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os resultados da viscosidade da solução de surfactante em diferentes concentrações. Observa-se uma tendência de aumento da viscosidade à medida que aumenta a concentração, mas esse comportamento fica mais evidente a partir da concentração de 0,05%.

**Figura 01.** Viscosidade da solução aquosa de surfactante em diferentes concentrações.

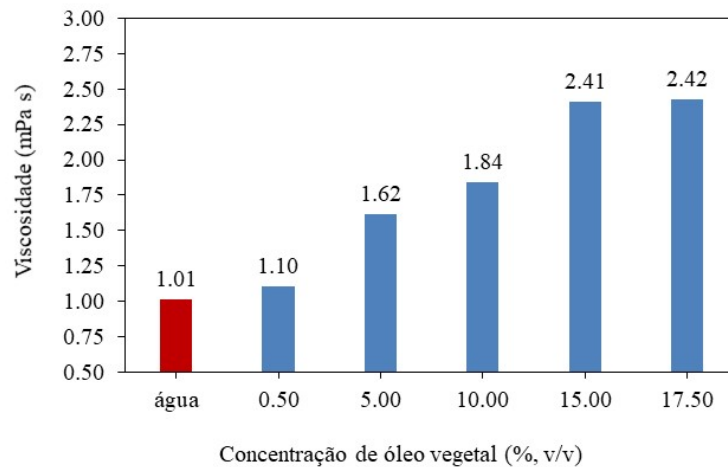


A Figura 2 apresenta os resultados da viscosidade da mistura de óleo vegetal em

água nas diferentes concentrações. Neste caso, observa-se um aumento da viscosidade com

aumento da concentração do óleo vegetal, atingindo o patamar na concentração de 15%,

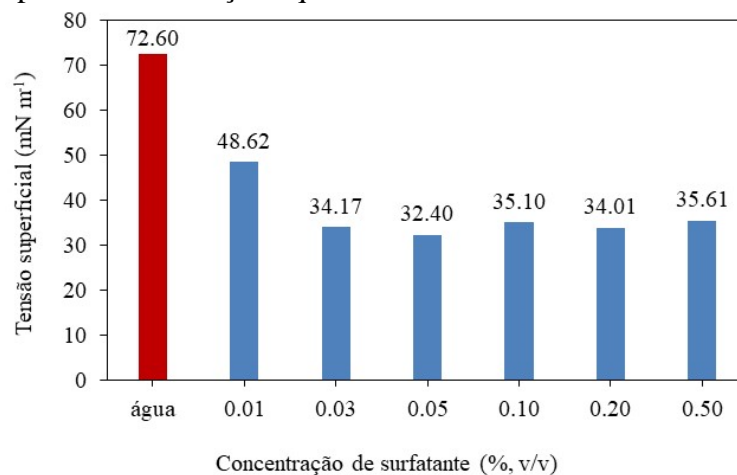
**Figura 02.** Viscosidade da mistura de óleo vegetal com diferentes concentrações em água.



A Figura 03 apresenta os valores de tensão superficial em função das concentrações do surfactante. Observa-se redução da tensão superficial com o aumento da concentração do

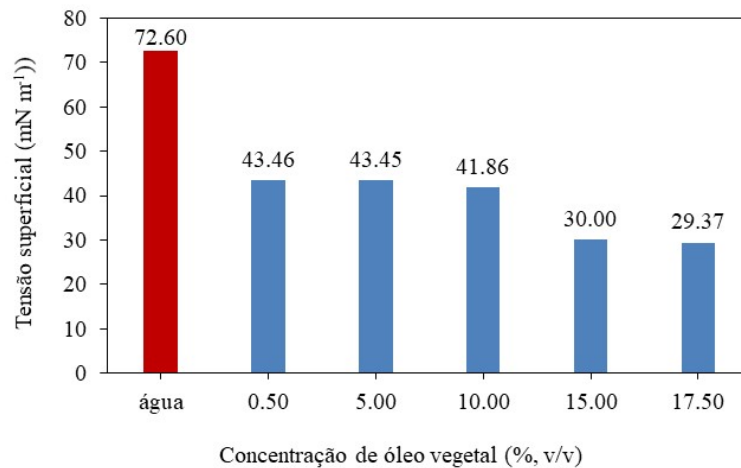
surfactante, havendo um patamar em que a tensão superficial ficou estabilizada a partir da concentração de 0,03%.

**Figura 03.** Tensão superficial da solução aquosa de surfactante em diferentes concentrações.



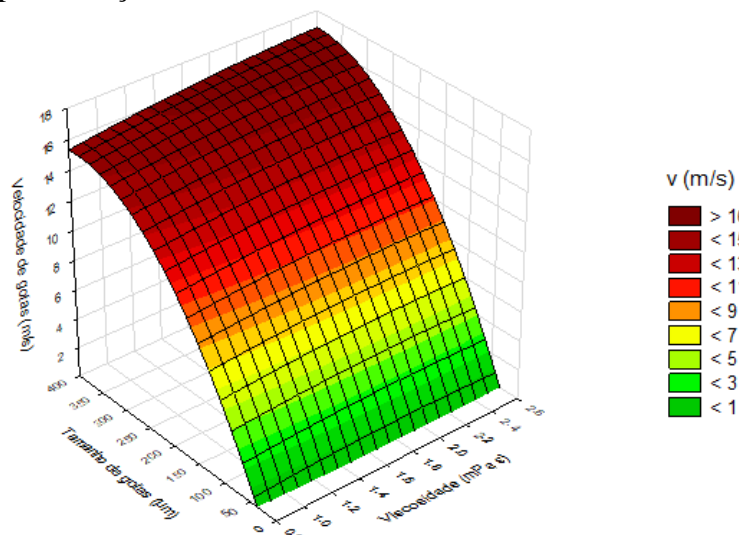
No caso do óleo vegetal, o valor da tensão superficial ficou em um patamar entre as concentrações de 0,5 e 10%, sendo reduzida

novamente a partir da concentração de 15% (Figura 4).

**Figura 4.** Tensão superficial da mistura de óleo vegetal com diferentes concentrações em água.

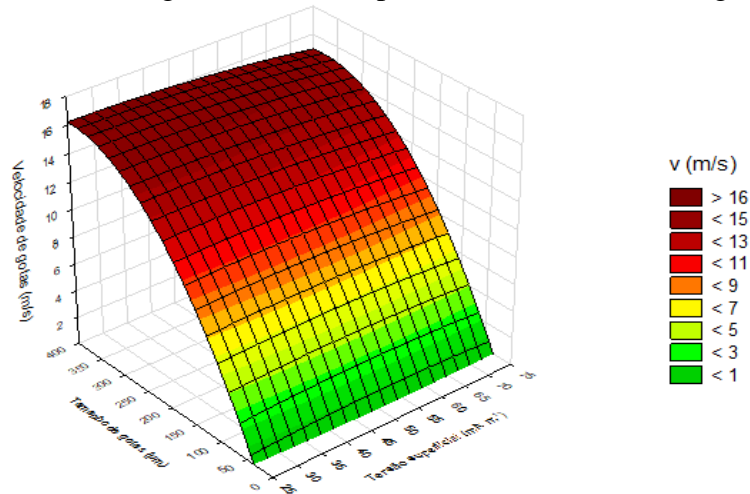
A Figura 5 apresenta a curva de resposta da velocidade de gotas em função do tamanho de gotas e da viscosidade das soluções aquosas. O aumento da viscosidade atuou sobre o tamanho de gotas de forma quadrática. Quanto maior a viscosidade de um fluido, maiores serão as forças de cisalhamento, e maior a energia cinética da gota ao ser pulverizada (McDonald, 2014). Oliveira e Antuniassi (2012) constataram que maiores valores de viscosidade geram menores

índices de deriva. Esse fato pode estar associado ao resultado encontrado neste estudo, em que a velocidade das gotas foi maior em valores maiores de viscosidade, tornando menor o tempo de deslocamento da gota a partir da ponta até o alvo e, portanto, deixando-a menos susceptível à deriva. Verificou-se também que gotas maiores possuem maior velocidade, assim como observado por (NUYTTENS et al., 2009).

**Figura 05.** Curva de resposta do efeito do tamanho de gotas e da viscosidade na velocidade de gotas de pulverização.

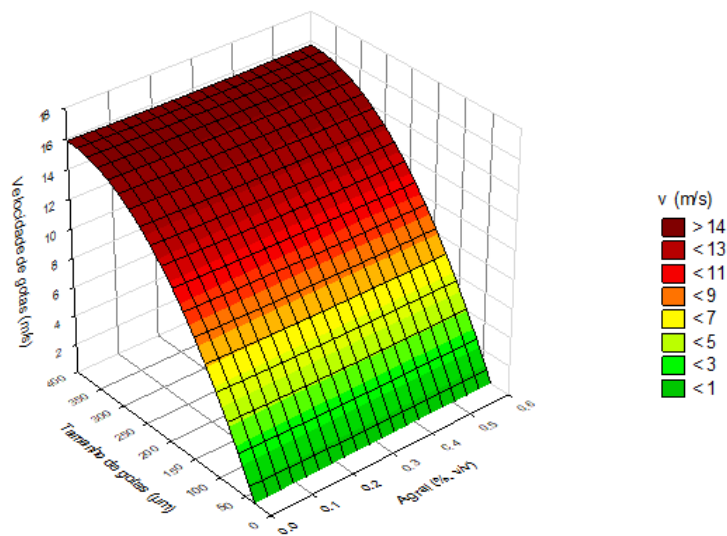
Na Figura 06 está apresentada a curva de resposta da velocidade de gotas em função do tamanho de gotas e da tensão superficial das soluções aquosas. Para a tensão superficial, foi possível verificar comportamento inverso ao da viscosidade. Dessa forma, para a modelagem apresentada na Figura 06, notou-se um gradiente

decréscante, onde maiores valores de tensão superficial apresentaram velocidades menores. A redução da tensão superficial pode causar a redução do tamanho das gotas no espectro da pulverização, mas a magnitude dessa redução está atrelada ao tipo de ponta de pulverização utilizada (BUTLER-ELLIS, M. C.; TUCK, C. R.; MILLER, P. C. H., 2001).

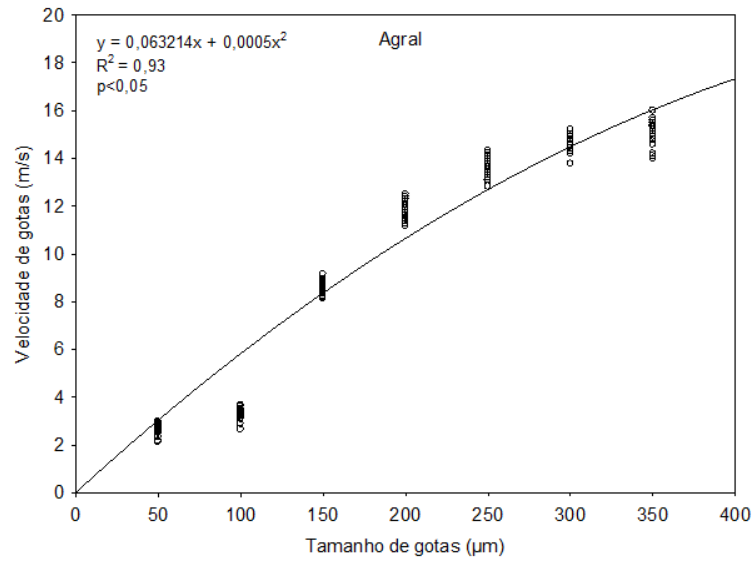
**Figura 06.** Efeito do tamanho de gotas e tensão superficial na velocidade de gotas de pulverização.

O comportamento dos modelos matemáticos para a representação do tamanho de gotas pulverizadas em relação as concentrações do surfactante estão representadas nas Figuras 07 e 08. Observa-se que não há um comportamento definido da

concentração do surfactante em relação à velocidade (Figura 07), mas fica evidente a relação quadrática da velocidade com o tamanho das gotas nas soluções com surfactante.

**Figura 07.** Efeito do tamanho de gotas e concentração do surfactante na velocidade de gotas de pulverização.

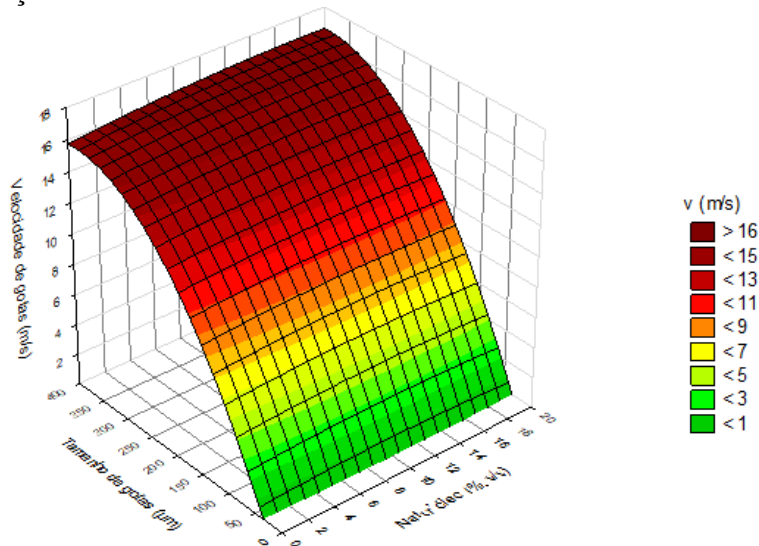
**Figura 08.** Efeito do tamanho de gotas contendo o surfactante na velocidade de gotas de pulverização.



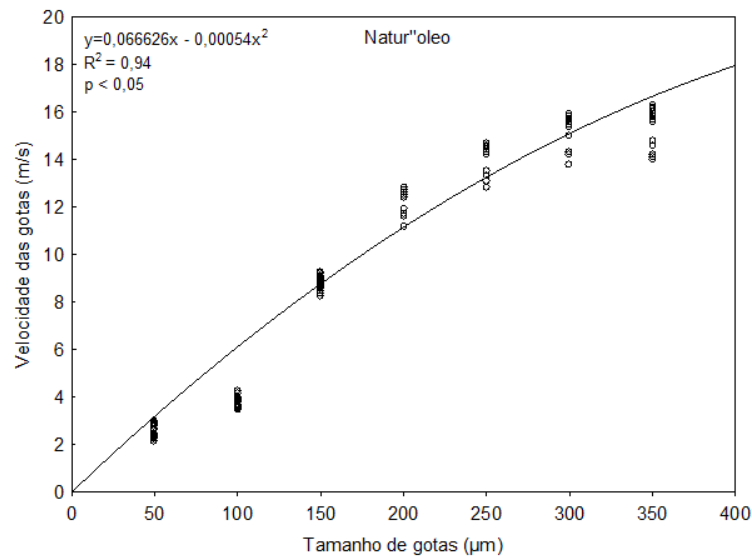
O modelo ajustado para o tamanho de gotas pulverizadas em relação às concentrações, com o uso de óleo vegetal, está representado nas Figuras 09 e 10. O aumento da concentração do óleo influenciou positivamente a velocidade das gotas, havendo um deslocamento do gráfico para extremidade

superior direita. A Figura 10 mostra que os dados foram ajustados ao modelo quadrático ( $R^2 = 0,94$ ,  $p < 0,05$ ), indicando que quanto maior a gota maior a sua velocidade. Quanto maior a resposta a concentração e aumento da viscosidade, maior é o tamanho das gotas e, conseqüente a velocidade da gota.

**Figura 09.** Efeito do tamanho de gotas e concentração do óleo vegetal na velocidade de gotas de pulverização.



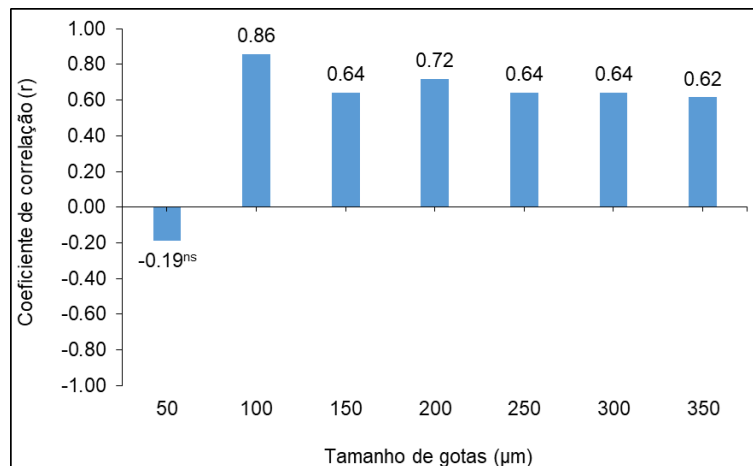
**Figura 10.** Efeito do tamanho de gotas contendo o óleo vegetal na velocidade das gotas de pulverização.



A correlação entre a viscosidade e a velocidade de gotas para cada tamanho de gotas está apresentada na Figura 11. Com exceção de gotas de 50 µm de DMV que

apresentou correlação negativa e não significativa, para os demais DMV houve correlação positiva entre a velocidade de gotas e a viscosidade.

**Figura 11.** Correlação entre a viscosidade e a velocidade de gotas com diferentes tamanhos de gotas.

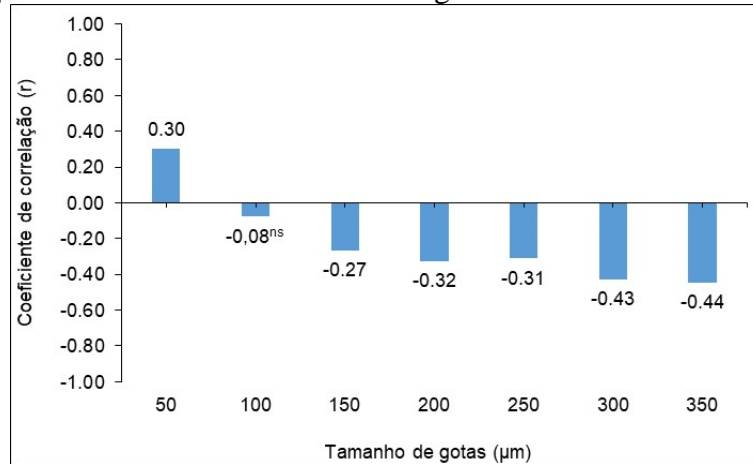


(ns) não significativo pela correlação de Pearson,  $p > 0,05$ .

A correlação entre a tensão superficial e a velocidade de gotas para cada tamanho de gotas está apresentada na Figura 12. Com exceção de gotas de 50 µm de DMV que apresentou correlação positiva, para os demais

DMV houve correlação negativa entre a velocidade de gotas e a tensão superficial. Para o tamanho de gotas de DMV de 100 µm a correlação não foi significativa.



**Figura 12.** Correlação entre a tensão e velocidade de gotas com diferentes tamanhos de gotas.

<sup>ns</sup>não significativo pela correlação de Pearson,  $p > 0,05$ .

#### 4 CONCLUSÕES

Caldas de maior viscosidade geraram gotas com maior velocidade, enquanto caldas de maior tensão superficial geraram gotas de menor velocidade. A velocidade de gotas tem relação quadrática com o tamanho de gotas, independente dos adjuvantes utilizados (óleo vegetal ou surfactante). As relações de

tamanho de gotas com viscosidade e tensão superficial serão melhor entendidas com a seleção de gotas maiores que 100 μm.

#### 5 AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida ao primeiro autor.

#### 6 REFERÊNCIAS

- BERNA, R. **Espectro de gotas geradas por ponta de jato plano de impacto para aplicação aérea na presença de adjuvantes em caldas de pulverização**. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017.
- BUTLER-ELLIS, M. C.; TUCK, C. R.; MILLER, P. C. H. The effect of some adjuvants on sprays produced by agricultural flat fan nozzles. **Crop Protection**, Guildford, v. 16, n. 1, p. 609-615, 1997.
- BUTLER-ELLIS, M. C.; TUCK, C. R.; MILLER, P. C. H. How surface tension of surfactant solutions influences the characteristics of sprays produced by hydraulic nozzles used for pesticide application. *Colloids Surfaces A: Physicochem. Engineering Aspects*, Wrest Park, v. 190, n. 3, p. 267-276, 2001.
- CARVALHO, F. K. **Viscosidade, tensão superficial e tamanho de gotas em caldas com formulações de inseticida e fungicida**. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.
- FRANÇA, J. A. L.; CUNHA, J. P. A. R.; ANTUNIASSI, U. R. Spectrum, velocity and drift of droplets sprayed by nozzles with and without air induction and mineral oil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 37, n. 3, p. 502-509, maio/jun. 2017.
- HAZEN, J. L. Adjuvants—terminology, classification, and chemistry. **Weed Technology**, Champaign, v. 14, n.4, p. 773-784, 2000.

NUYTTENS, D.; SCHAMPHELEIRE, M.; VERBOVEN, P.; BRUSSELMAN, E.; DEKEYSER, D. Tamanho da gota e características de velocidade dos sprays agrícolas. **Transações do ASABE**, St. Joseph, v. 52, n. 5, p. 1471-1480, set. 2009.

OLIVEIRA, R. B.; ANTUNIASSI, U. R. Caracterização física e química e potencial de deriva de caldas contendo surfactantes em pulverizações agrícolas. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 1, 2012.

OLIVEIRA, R. B.; ANTUNIASI, U. R.; GANDOLFO, M. A. Spray adjuvant characteristics affecting agricultural spraying drift. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, vol. 35 n.1 jan./feb. 2015.

QUEIROZ, M. F. P. **Espectro de gotas e características físicas de caldas com adjuvantes tensoativos e os herbicidas glyphosate e 2,4-d, isolados e em mistura**. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

SIJS, R.; BONN, D. The effect of adjuvants on spray droplet size from hydraulic nozzles. **Pest Management Science**, v 76. n.1, p.1-8, jan. 2020.