

ROBSON SHIGUEAKI SASAKI

**SISTEMA ELETRÔNICO PARA CAPTURA DE GOTAS VISANDO AUMENTAR A
EFICIÊNCIA NA PULVERIZAÇÃO ELETROSTÁTICA**

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
2011

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

T

S252s
2011

Sasaki, Robson Shigueaki, 1986-
Sistema eletrônico para captura de gotas visando aumentar
a eficiência na pulverização eletrostática / Robson Shigueaki
Sasaki. – Viçosa, MG, 2011.
xiv, 69f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Mauri Martins Teixeira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 62-69

1. Pulverização. 2. Máquinas agrícolas. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 613.3

ROBSON SHIGUEAKI SASAKI

SISTEMA ELETRÔNICO PARA CAPTURA DE GOTAS VISANDO AUMENTAR A EFICIÊNCIA NA PULVERIZAÇÃO ELETROSTÁTICA

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: 16 de dezembro de 2011.



Paulo Marcos de Barros Monteiro
(Coorientador)



Gilton José Rodrigues



Mauri Martins Teixeira
(Orientador)

Aos meus pais, Amélia e Hélio,

Aos meus irmãos, Jeffer e Thiago,

Aos meus avós,

Aos tios e tias,

In memoriam ao tio Luiz e as tias Tereza e Maria Lúcia,

Aos primos e primas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a deus, que me deu forças para buscar mais uma conquista.

A meus pais, Helio Sasaki e Amélia Sasaki, e aos irmãos Jeffer Sasaki e Thiago Sasaki, pelo apoio, incentivo e carinho e que foram imprescindíveis para contornar os obstáculos até a conquista.

Ao professor orientador Mauri Martins Teixeira, pela paciência, ajuda e compreensão.

Aos amigos do laboratório de tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas que sempre estiveram presentes na execução deste trabalho.

A todos os amigos da área de Mecanização Agrícola.

A querida Laurie Midori pelo apoio e paciência ao longo desta jornada.

Aos professores Haroldo, Denílson e Paulo Monteiro, pelo apoio, incentivo e auxílio na execução deste trabalho.

Aos amigos de graduação e de república que me apoiaram desde o início.

Aos funcionários da Mecanização Agrícola Marcelo, Vantuil, Geraldo e Danilo.

Ao Álvaro e a Bell's Som pela ajuda na construção de alguns equipamentos, e que foram essenciais neste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de cursar a Pós Graduação.

A Capes, ao CNPq e a Fapemig pelo suporte financeiro deste trabalho.

BIOGRAFIA

Robson Shigueaki Sasaki, filho de Helio Sasaki e Amélia Sasaki, nasceu em São Gotardo –MG, no dia 8 de março de 1986. Ingressou no curso de Agronomia, pela Universidade Federal de Viçosa no ano de 2005, que concluiu em janeiro de 2010, e em março deste mesmo ano, iniciou o curso de pós graduação a nível de mestrado, no Departamento de Engenharia Agrícola.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Cultura do café	3
2.2. Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas	4
2.3. Eletrostática.....	5
2.4. Pulverização eletrostática	7
2.5. Processos de eletrificação de gotas.....	9
2.6. Fatores que afetam a pulverização eletrostática	10
2.6.1. Relação carga/massa (Q/M)	10
2.6.2. Efeito da distância do bocal do pulverizador ao alvo	12
2.6.3. Espectro de gota	13
2.6.4. Deposição de calda e alvo de pulverização	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1. Determinação da relação carga/massa (Q/M) em diferentes distâncias entre o bocal de pulverização e o alvo	17
3.2. Avaliação do efeito da condutividade elétrica da solução eletrolítica na relação carga/massa (Q/M).....	19
3.3. Avaliação do espectro de gotas	20
3.4. Avaliação da velocidade do ar em diferentes distâncias do pulverizador.....	21
3.5. Avaliação do efeito da distância do bocal de pulverização em relação ao alvo artificial na eficiência de deposição de líquido na pulverização eletrostática	22
3.5.1. Ensaios preliminares para avaliar o efeito da distância de pulverização na eficiência de deposição de líquido	22
3.5.2. Ensaio realizado para avaliar o efeito da distância de pulverização na eficiência de deposição de líquido	22

3.6. Desenvolvimento de um sistema de atração de gotas	25
3.7. Avaliação do sistema de atração de gotas	26
3.8. Avaliação da pulverização eletrostática e do sistema de atração de gotas utilizando alvos naturais	27
3.8.1. Avaliação do sistema de atração de gotas na cultura do café	27
3.8.2. Avaliação da deposição de líquido nas pulverizações	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Determinação da relação carga/massa em diferentes distâncias entre o bocal de pulverização e o alvo.....	31
4.2. Avaliação do efeito da condutividade elétrica da solução na relação carga/massa	32
4.3. Avaliação do espectro de gotas	35
4.4. Avaliação da velocidade do ar em diferentes distâncias do pulverizador.....	39
4.5. Avaliação do efeito da distância do bocal de pulverização ao alvo artificial na eficiência de deposição de líquido.....	41
4.5.1. Ensaios preliminares na avaliação do efeito da distância do bocal de pulverização ao alvo artificial na eficiência de deposição de líquido.....	41
4.5.2. Ensaio realizado para a determinação do efeito da distância do bocal de pulverização ao alvo artificial na eficiência de deposição de líquido.....	42
4.6. Desenvolvimento de um sistema de atração de gotas	49
4.7. Avaliação do sistema de atração de gotas	50
4.8. Avaliação da pulverização eletrostática e do sistema de atração de gotas utilizando alvos naturais	56
4.8.1. Monitoramento de tensão nas plantas	56
4.8.2. Avaliação da deposição de líquido em plantas de café.....	57
5. CONCLUSÕES	61
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interação entre duas partículas eletrizadas.....	5
Figura 2. Vetor campo elétrico (a) carga de prova positiva; (b) carga de prova negativa.....	6
Figura 3. Bocal de atomização de gotas com sistema de eletrificação por indução indireta (JAHANNAMA, et al. 2005).....	17
Figura 4. Esquema da gaiola de Faraday para a quantificação da relação carga/massa.	18
Figura 5. Esquema de disposição do alvo e do pulverizador na avaliação de deposição de calda. (A) Alvo transversal e longitudinal; (B) Bocal do pulverizador.....	23
Figura 6. Ligação do circuito elétrico do pulverizador ao osciloscópio.	25
Figura 7. Fonte de alta tensão corrente contínua, utilizado para eletrificar o alvo.....	26
Figura 8. Eletrificação do alvo natural.	28
Figura 9. Monitoramento de tensão elétrica na planta.....	29
Figura 10. Pontos de coleta de folhas na planta.....	30
Figura 11. Relação Q/M em diferentes distâncias entre o pulverizador e o alvo.....	31
Figura 12. Relação Q/M em função da distância de pulverização e condutividade elétrica da solução.....	34
Figura 13. Comportamento dos parâmetros da pulverização em diferentes distâncias e sistemas de pulverização: (a) $Dv_{0,1}$; (b) $Dv_{0,5}$; (c) $Dv_{0,9}$ e (d) Índice Span.	37
Figura 14. Velocidade do ar ($m s^{-1}$) em diferentes distâncias longitudinais e transversais.	40
Figura 15. Etiquetas hidrossensíveis.....	41
Figura 16. Calibração da solução padrão.....	42
Figura 17. Deposição de líquido ($\mu L cm^{-2}$) em função da distância transversal para diferentes distâncias longitudinais (DL).	46

Figura 18. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em função da distância longitudinal para diferentes distâncias transversais (DT).	48
Figura 19. (a) Sinal elétrico emitido pelo pulverizador; (b) Sinal elétrico emitido pela fonte utilizada para eletrizar o alvo.	50
Figura 20. Deposição de líquido em função da distância transversal para diferentes distâncias longitudinais (DL).....	53
Figura 21. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em função da distância longitudinal para diferentes distâncias transversais (DT).	55
Figura 22. Calibração para a solução padrão.....	58
Figura 23. Uniformidade de distribuição de líquido com o sistema de atração de gotas.	59
Figura 24. Uniformidade de distribuição de líquido com o sistema de atração desligado.	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Média da condutividade elétrica das soluções nas diferentes diluições de NaCl	33
Quadro 2. Relação Q/M (mC kg^{-1}) das diferentes soluções em diferentes distâncias do alvo	33
Quadro 3. Equações de regressão ajustadas para a relação Q/M em função da distância de pulverização para diferentes condutividades elétricas	35
Quadro 4. Média dos parâmetros da pulverização para as diferentes distâncias e sistema de pulverização	36
Quadro 5. Equações de regressões ajustadas para os parâmetros da pulverização em função da distância do bocal de pulverização ao alvo para os diferentes sistemas de pulverização.	38
Quadro 6. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes distâncias transversais e longitudinais com o alvo no sentido transversal ao jorro de pulverização	43
Quadro 7. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes distâncias transversais e longitudinais com o alvo no sentido longitudinal ao jorro de pulverização.....	44
Quadro 8. Equações de regressões ajustadas para a deposição de líquido em função da distância transversal para cada distância longitudinal e sistema de pulverização....	46
Quadro 9. Equações de regressões ajustadas para a deposição de líquido em função da distância longitudinal para cada distância transversal e sistema de pulverização....	48
Quadro 10. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes distâncias transversais e longitudinais com o alvo no sentido transversal ao jorro de pulverização	51
Quadro 11. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes distâncias transversais e longitudinais com o alvo no sentido longitudinal ao jorro de pulverização.....	52
Quadro 12. Equações de regressões ajustadas para a deposição de líquido em função da distância transversal para cada distância longitudinal e sistema de pulverização....	54
Quadro 13. Equações de regressões ajustadas para a deposição de líquido em função da distância transversal para cada distância longitudinal e sistema de pulverização....	56

Quadro 14. Média das tensões elétricas (V) em diferentes profundidades da planta.... 57

Quadro 15. Média das deposições de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes sistemas de pulverização e profundidade da planta..... 58

RESUMO

SASAKI, Robson Shigueaki, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2011. **Sistema eletrônico para captura de gotas visando aumentar a eficiência na pulverização eletrostática.** Orientador: Mauri Martins Teixeira. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Paulo Marcos de Barros Monteiro e Denílson Eduardo Rodrigues.

A pulverização eletrostática é um sistema que carrega eletricamente as gotas, fazendo com que elas sejam atraídas pela planta, aumentando a eficiência na aplicação de agrotóxicos e diminuindo as perdas para o meio ambiente. Sabe-se que a pulverização eletrostática, quando utilizada de maneira correta, proporciona vantagens em relação aos sistemas convencionais, no entanto, diversos fatores podem interferir na eficiência do sistema. Sendo assim, objetivou-se com este trabalho, avaliar o efeito da distância de pulverização, a condutividade elétrica da solução na eficiência de eletrificação da gota, e a eficiência de deposição de líquido em alvos posicionados em diferentes distâncias. Também, de acordo com a lei de Coulomb, em que cargas elétricas opostas se atraem, desenvolveu-se um sistema de atração de gotas, visando aumentar a deposição de líquido no alvo e reduzir a contaminação ambiental e os riscos de contaminação dos trabalhadores. Para avaliar o efeito da distância da pulverização e da condutividade elétrica na eficiência de eletrificação da gota, foram preparadas soluções com condutividade elétrica de 0,00; 17,03; 19,44; 35,92 e 64,59 mS cm⁻². Posteriormente, pelo método da gaiola de Faraday, determinou-se as relações carga/massa (Q/M) em diferentes distâncias longitudinais (0; 1; 2; 3; 4 e 5 m). A estas distâncias, combinadas com quatro distâncias transversais (0; 0,15; 0,30 e 0,45 m), avaliou-se a deposição de calda em alvos artificiais em três sistemas de pulverização (sistema eletrostático desligado; sistema eletrostático ligado e sistema de atração de gotas ligado). Para desenvolver o sistema de atração de gotas, utilizou-se um osciloscópio para determinar a polaridade da carga presente na gota, e uma fonte de alta tensão para eletrizar o alvo com carga de polaridade oposta à da gota. E utilizando plantas de café, avaliou-se o sistema de pulverização eletrostática e de atração de gotas em campo. Observou-se que a distância afetou a carga presente na gota, sendo que a relação Q/M próximo ao alvo foi de 4,11 mC kg⁻¹, e nas distâncias de 1, 2, 3, 4 e

5 m, esta relação foi reduzida para 1,38; 0,64; 0,31; 0,17 e 0,005 mC kg⁻¹, respectivamente. A condutividade elétrica afetou a relação Q/M, no entanto, aumentando a condutividade elétrica, não acarretou, necessariamente, aumento da relação Q/M. Com relação à deposição de líquido no alvo, observou-se que o sistema eletrostático, foi afetado tanto pela distância longitudinal como transversal, sendo que, a maior eficiência foi à distância transversal zero, com aumento de deposição com o sistema eletrostático até a distância de dois metros. Na avaliação do sistema de atração de gotas, este demonstrou-se eficiente e possibilitou eletrizar tanto alvo artificial como também natural. Em alvos artificiais, o sistema de atração de gotas ocasionou aumento de deposição de até 180 % em relação ao sistema eletrostático convencional e foi mais eficiente, principalmente, na distância transversal igual a zero, decaindo à medida que se aumentou tal distância. Nos ensaios de campo, o sistema eletrostático ligado proporcionou aumento de 37,21 % em relação ao sistema desligado. Quanto ao sistema de atração de gotas, demonstrou resultados satisfatórios, e proporcionou uma maior penetração de líquido nas copas do cafeeiro, com aumento de deposição de 33,9 % no interior do dossel da planta comparado ao sistema eletrostático convencional.

ABSTRACT

SASAKI, Robson Shigueaki, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2011. **Electronic system to capture droplets aiming to increase the efficiency of electrostatic spraying.** Adviser: Mauri Martins Teixeira. Co-advisers: Haroldo Carlos Fernandes, Paulo Marcos de Barros Monteiro and Denílson Eduardo Rodrigues.

Electrostatic spraying is a system which electrically charges the droplets, so that they are attracted by the plant, increasing the efficiency of pesticide application and reducing losses to the environment. It is known that electrostatic spraying, if used correctly provides advantages over conventional systems. However, several factors can affect the efficiency of the system. Therefore, the aim of this work was to evaluate the effect of spray distance, the electrical conductivity of the solution in the efficiency of electrification of the droplets, and the efficiency of deposition of liquid on targets positioned at different distances. Also, according to Coulomb's law, in which opposite electrical charges attract each other, it was developed a system of attracting droplets aiming to increase the deposition of liquid on the target and reduce pollution and risks of contamination of workers. To evaluate the effect of distance from the spray and electric conductivity on the efficiency of droplet electrification, solutions were prepared with electrical conductivity of 0.00, 17.03, 19.44, 35.92 and 64.59 mS cm⁻². Subsequently, by the Faraday cage method, we determined the relationship charge/mass (Q/M) at different longitudinal distances (0, 1, 2, 3, 4 and 5 m). At these distances, combined with four transverse distances (0, 0.15, 0.30 and 0.45 m), it was evaluated the spray deposition on artificial targets in three spray systems (electrostatic system off; electrostatic system on and droplet attraction system on). To develop the system to attract droplets, an oscilloscope was used to determine the polarity of the charge present on the droplets, and a high voltage source to electrify the target with a charge with opposite polarity. Using coffee plants, it was evaluated the electrostatic spraying system and attraction in the field. It was observed that the distance affected the charge present in the droplet, whereas the ratio Q/M close to the target was a 4.11 mC kg⁻¹, and in the distances of 1, 2, 3, 4 and 5 m, the ratio was reduced to 1.38, 0.64, 0.31, 0.17 and 0.005 mC kg⁻¹, respectively. Electrical conductivity affected ratio Q/M, however, a higher electrical

conductivity did not necessarily increase the ratio Q/M . With regard to deposition of liquid on the target, it was observed that the electrostatic system was affected by both the longitudinal and transverse distance, being that the efficiency was greater at transverse distance zero, with increased deposition with the electrostatic system to a distance of 2 m. In evaluating the droplet attraction system, this proved to be efficient and allowed to electrify both artificial targets as well as natural. In artificial targets, the system to attract droplets resulted in an increase of 180 % of deposition in relation to the conventional electrostatic system and was more efficient, especially in the transverse distance equal to zero, decreasing as this distance was increased. In field tests, the electrostatic system showed increase of 37.21 % over the system turned off. As for the droplet attraction system on, it showed satisfactory results, and provided a greater penetration of liquid in the coffee canopy, with increased deposition of 33.9 % in the interior of the canopy compared to conventional electrostatic system.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as inúmeras culturas cultivadas no território brasileiro, o café destaca-se desde o período colonial como gerador de emprego e renda. O Brasil, atualmente é o maior produtor e exportador do mundo e também o segundo maior consumidor mundial de café.

Devido à grande importância da cultura do café e o alto valor agregado do produto, tem-se buscado o desenvolvimento de tecnologias que aumentem sua produtividade que está diretamente relacionada aos tratamentos culturais. Dentre estes, destaca-se o uso correto da tecnologia de aplicação de agrotóxicos para o controle de plantas daninhas, doenças e insetos, pois estes agentes, além de reduzirem a produtividade, comprometem a qualidade da bebida do cafeeiro.

A aplicação de agrotóxicos deve ser realizada de forma eficiente, o uso de agrotóxicos, sem o emprego adequado da tecnologia de aplicação, pode causar a contaminação do meio ambiente, deixar resíduos nos alimentos, e aumentar o risco de intoxicação por parte dos trabalhadores rurais.

Sabe-se que fatores como a escolha do produto, volume de calda, condições meteorológicas favoráveis, tipo de equipamento, propriedades físico-químicas dos agrotóxicos e espectro da população de gotas são fatores determinantes para o sucesso no controle de pragas e doenças, e na redução das perdas para o meio ambiente. Apesar de se conhecer tais fatores, em condições de campo, dificilmente se consegue o controle destes, ou então, são fatores desconhecidos por parte dos agricultores, acarretando em perdas.

Há relatos de pulverizações ineficientes com excesso ou déficit de ingrediente ativo no alvo, e em alguns casos, mais de 50 % dos agrotóxicos utilizados são desperdiçados porque não atingem os alvos desejados acarretando em problemas ambientais e ineficiência da pulverização.

Em plantas arbóreas ou arbustivas, as pulverizações são complicadas devido à arquitetura das plantas e a alta densidade foliar dificulta atingir o alvo, principalmente quando o objetivo é a parte interna do dossel. Equipamentos como pulverizadores pneumáticos e hidropneumáticos são comumente empregados para estas culturas, no

entanto, nem sempre as pulverizações são eficientes. Muitas vezes, para atingir o interior do dossel, os produtores aumentam o volume de calda a ser pulverizado, acarretando em escoamento de líquido para o solo, agravando-se os problemas ambientais.

Visando contornar os problemas existentes na aplicação de agrotóxicos, aumentar a eficiência da pulverização, redução dos custos e redução dos problemas ambientais tem surgido algumas tecnologias. Entre estas, podemos destacar os equipamentos de precisão para aplicação a taxas variáveis, o uso da tecnologia embarcada, barras de luzes, piloto automático e a eletrificação das gotas por meio de pulverizadores eletrostáticos.

O pulverizador eletrostático é um sistema que carrega eletricamente as gotas. As cargas elétricas presentes nas gotas ocasionam uma diferença de potencial entre a gota e a planta, fazendo com que ocorra a atração entre ambos. Estas propriedades, na maioria das vezes, fazem com que haja aumento na deposição de agrotóxicos e redução na deriva, conseqüentemente, aumento na eficácia de controle e menores perdas de produto ao meio ambiente.

Há na literatura diversos trabalhos indicando que a pulverização eletrostática pode reduzir a dosagem de fitossanitários e, por tanto, reduzir os riscos ao operador e ao meio ambiente (KABASHIMA et al., 1995; CHAIM et al., 2002; SCHRODER e LOECK, 2006).

Entretanto, há trabalhos nos quais o uso da pulverização eletrostática não resultou em melhorias na aplicação de agrotóxicos, como afirmam Silva et al. (2000) e Silva et al. (1997), utilizando esta tecnologia na cultura do algodoeiro, eles verificaram que não houve diferença significativa na deposição de agrotóxicos. Magno Júnior (2008), testando a pulverização eletrostática em plantas cítricas, verificou que apesar de haver um aumento na deposição com a pulverização eletrostática, essa diferença não foi significativa estatisticamente.

O insucesso utilizando a pulverização eletrostática pode ser devido a diversos fatores como tensão aplicada no sistema de carregamento das gotas, velocidade de aplicação, a distância e o sentido de orientação do alvo em relação ao jorro de

pulverização, a umidade relativa do ar, o diâmetro das gotas e as características do líquido pulverizado, como a tensão superficial e a viscosidade.

Visando solucionar os problemas na aplicação de agrotóxicos na cultura do café, este trabalho teve por objetivo avaliar os fatores que influenciam na pulverização eletrostática e desenvolver um sistema de atração de gotas que possibilite aumentar a eficiência na deposição de agrotóxicos no interior da copa do cafeeiro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura do café

O cafeeiro é uma planta natural das estepes da Etiópia. Foi introduzido na América do sul pelos franceses, e que posteriormente, por volta de 1727, foi trazido ao Brasil pelo sargento Francisco de Melo Palheta, e inicialmente implantado no estado do Pará, expandindo-se posteriormente para os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

O Brasil é o principal produtor e exportador mundial de café, ocupando uma área superior a 2,3 milhões de hectares, com produção, na safra de 2009, de 36,9 milhões de sacas (CONAB, 2009). O cafeeiro é constantemente infestado por pragas e doenças, como bicho mineiro, ácaro da mancha anular, broca do café, cochonilha da raiz, ferrugem do café, cigarras, entre outros (TOLEDO et al., 2005). Quando o cafeeiro é acometido por esses agentes, necessita de cuidados, pois provocam queda na produção e na qualidade dos frutos colhidos, e, conseqüentemente, prejuízos aos produtores.

Na aplicação de agrotóxicos, devido à arquitetura do cafeeiro, tamanho da planta e densidade da copa, observam-se grandes entraves para se atingir o alvo, necessitando-se buscar novas tecnologias e/ou adaptações de técnicas de aplicações já utilizadas em outras culturas. O sucesso de uma nova técnica de pulverização pode, além de minimizar as perdas, melhorar a distribuição do produto na planta e reduzir o

volume de calda na pulverização, reduzindo-se também a poluição ambiental (MIRANDA, 2009).

2.2. Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas

A tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas é uma ciência multidisciplinar dentro da agricultura, uma vez que se reporta ao controle de insetos, ácaros, plantas daninhas e agentes patogênicos, que considera aspectos da biologia, da química, da engenharia, da ecologia, da sociologia e da economia (FERREIRA, 2006).

Na maioria das vezes, dá-se muita importância ao produto fitossanitário a ser aplicado e pouca atenção à tecnologia de aplicação. No entanto, além de conhecer o produto a ser aplicado, também é necessário dominar a forma adequada de aplicação, de modo a garantir que o produto alcance o alvo de forma eficiente, minimizando-se as perdas (CUNHA et al., 2005).

O uso de agrotóxicos, embora seja responsável pela redução das perdas na produção agrícola em função do controle de pragas, doenças e plantas daninhas, poderá ser questionável devido ao risco de contaminação ambiental proporcionado pelo potencial de perdas de produtos para o meio ambiente. Por esta razão, um grande número de pesquisas têm se concentrado na melhoria das técnicas de pulverização (QUEIROZ e ANTUNIASSI, 2006).

Batte e Ehsani (2006) relatam o uso de controladores automáticos de seções nas barras de um pulverizador podendo reduzir, significativamente, as sobreposições, poupando produtos fitossanitários, combustível, e o tempo durante a aplicação, resultando num maior rendimento operacional.

O uso de sensores na aplicação de agrotóxicos também tem ganhado destaque (FOX et al., 2008; BALSARI et al., 2009; PEREIRA, 2006; DORUCHOWSKY et al., 2009; QUEIROZ e ANTUNIASSI, 2006) visando o monitoramento de plantas daninhas e das condições meteorológicas. Nesse sentido, a tecnologia de aplicação utilizando pulverizadores eletrostáticos também tem sido pesquisada (KIRK et al., 2001; KANG et al., 2004). Hislop (1988), numa revisão sobre pulverização eletrostática na agricultura,

constatou que ela permite a redução de 50 % no ingrediente ativo, sem reduzir a eficácia biológica nos tratamentos fitossanitários.

2.3. Eletrostática

A eletrostática é o ramo da Física que investiga as propriedades e o comportamento dos campos elétricos de cargas elétricas ou fontes de cargas estacionárias, ou seja, ela se ocupa das propriedades das cargas elétricas em repouso (RODITI, 2005).

O princípio básico da eletrostática consiste em que cargas com a mesma polaridade se repelem, e com polaridades contrárias se atraem (SILVA, 2011). A interação entre duas partículas eletrizadas é representada na Figura 1.

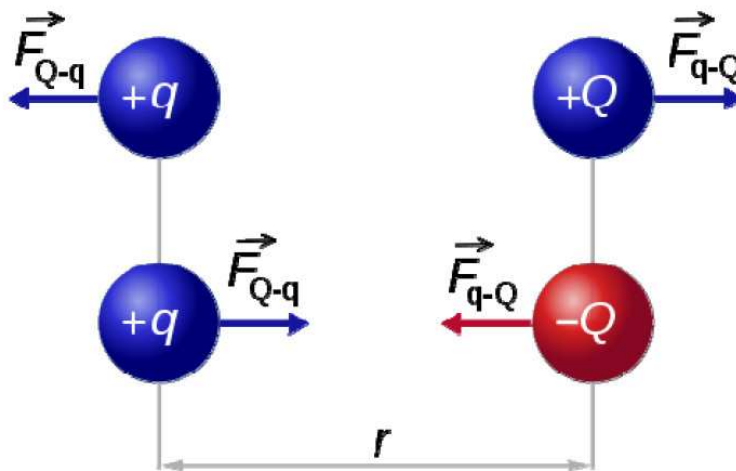


Figura 1. Interação entre duas partículas eletrizadas.

A intensidade da força elétrica entre as cargas Q e q é dada pela expressão que representa a lei de Coulomb (Equação 1).

$$F = k \frac{Q q}{d^2} \quad (1)$$

em que

F = força elétrica (N);
 K = constante ($9 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$);
 Q e q = cargas elétricas (C) e
 d = distância entre as duas cargas (m).

O campo elétrico de uma carga está associado a sua capacidade de criar forças elétricas sobre outras cargas elétricas. Essa capacidade está presente em torno de uma carga, independente de existirem ou não outras cargas em torno dela capazes de detectar esse campo. O campo elétrico E em um ponto P , criado por uma carga Q puntiforme em repouso, tem as seguintes características: 1) a direção é dada pela reta que une o ponto P e a carga Q ; 2) se a carga Q é positiva e uma carga de prova positiva for colocada no ponto P_1 , P_2 , P_3 e P_4 , o sentido do vetor do campo elétrico (E) é de afastamento e quando se coloca uma carga negativa o vetor campo elétrico é de aproximação (Figura 2).

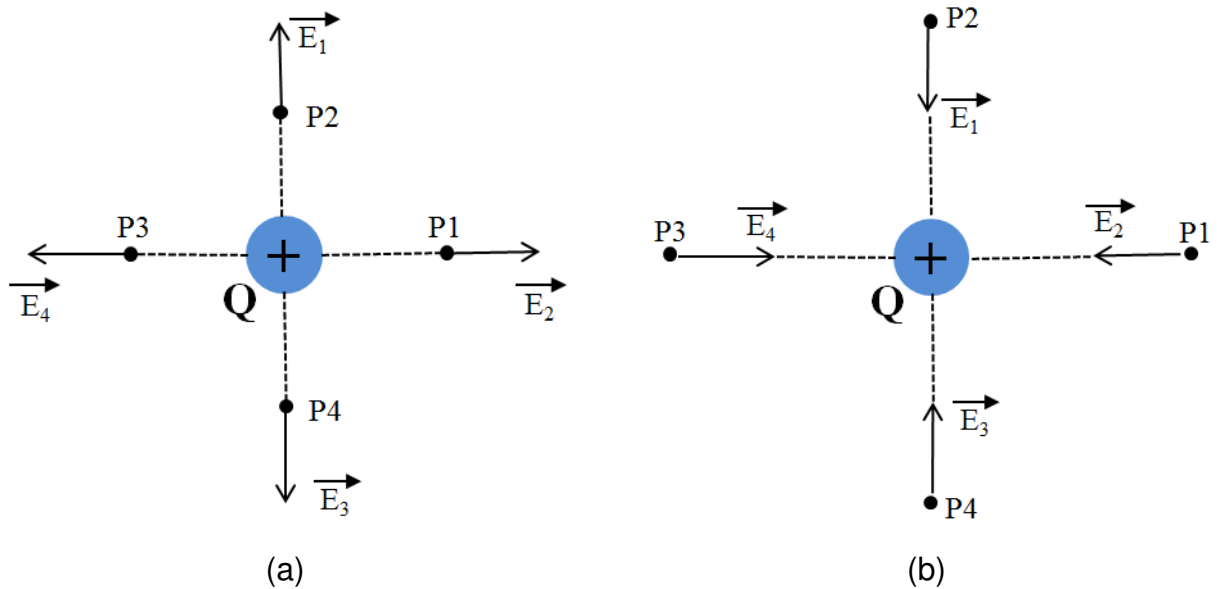


Figura 2. Vetor campo elétrico (a) carga de prova positiva; (b) carga de prova negativa.

O módulo de E pode ser obtido por meio da Equação 2.

$$E=K \frac{Q}{d^2} \quad (2)$$

em que

E = campo elétrico (N C⁻¹);

A eletrostática tem grande aplicabilidade, partindo desde a indústria eletrônica, metalúrgica, pesquisas ambientais, propulsão de veículos especiais até a atomização de líquidos, incluindo a pintura, impressão e pulverização eletrostática.

2.4. Pulverização eletrostática

Diversas pesquisas têm demonstrado as vantagens da pulverização eletrostática. Maynagh et al. (2009), relatam que dentre as vantagens da pulverização eletrostática, estão o aumento na eficiência da pulverização na deposição de agrotóxicos e a redução da deriva. Celen et al. (2009) relatam que as cargas presentes nas gotas, fazem com que haja repulsão entre si, ocasionando uma dispersão uniforme com ampla aplicação.

Esehaghbeygi et al. (2010), comparando o sistema eletrostático e o sistema centrífugo (bocal rotativo), no controle de plantas daninhas na cultura do trigo, observaram que o sistema eletrostático proporcionou melhor controle e, na presença de plantas daninhas com elevada massa foliar, houve maior penetração da gota devido as forças eletrostáticas. Maski e Durairaj (2006) verificaram um acréscimo de 42 % no controle do pulgão utilizando a pulverização eletrostática comparada ao sistema convencional. Wolf et al. (2000), ao aplicar 45 kV e espaçamento entre bicos de 0,5 m, obtiveram maior deposição e controle de plantas daninhas comparado ao sistema convencional.

Schroder e Loeck (2006), ao trabalhar com a pulverização eletrostática aérea no controle de plantas daninhas, avaliaram dois bicos (CP e eletrostático), quatro doses de herbicidas glifosato potássico (930, 1178, 1426 e 1674 g ha⁻¹), e dois volumes de pulverização (30 e 10 L ha⁻¹), e pressão de pulverização de 200 e 460 kPa, para os

tratamentos com bicos CP e eletrostáticos respectivamente, observaram que o controle das plantas daninhas com o sistema eletrostático foi superior ao de bicos CP.

Krausz (2003) trabalhou em lavouras comerciais de arroz nos Estados Unidos e comparou a deposição de calda utilizando o sistema convencional e eletrostático, utilizou o volume de pulverização, para o sistema convencional, de 46 e 93 L ha⁻¹ e, para o sistema eletrostático de 9,3 L ha⁻¹. Com a pulverização eletrostática observou maior uniformidade em ambas as faces das folhas.

Laryea e No (2005), avaliaram o efeito da velocidade do ventilador (1000, 1500 e 2000 rpm) e da pulverização eletrostática em duas variedades de macieira, verificaram que dependendo das dimensões da planta, a velocidade do ventilador e a técnica de pulverização utilizada, a pulverização eletrostática pode proporcionar um aumento na deposição em até 2,51 vezes comparada a convencional.

Xiongkui et al. (2011) desenvolveram um pulverizador hidropneumático automatizado eletrostático, com um sensor infravermelho para detecção de presença de plantas, e constataram que o sistema automatizado aliado ao sistema eletrostático possibilitou uma redução no uso de agrotóxicos entre 50 e 75 %, e aumentou a taxa de deposição no alvo de até 50 %, comparado aos sistemas convencionais de pulverização.

Já, Raetano et al. (2011), compararam três sistemas de pulverização na cultura da soja (convencional, convencional com assistência de ar e eletrostático com assistência de ar) e, utilizando dois volumes de pulverização (50 e 100 L ha⁻¹), verificaram que ao se utilizar o maior volume houve maior deposição utilizando a pulverização eletrostática.

Avaliando a aplicação eletrostática em pimentão, Derksen et al. (2007) conseguiram resultados similares, a volumes de aplicação seis vezes menores que em tratamentos convencionais. Olivet et al. (2011) verificaram que a pulverização eletrostática na cultura do pimentão produziu um incremento na cobertura entre 67 a 53 % na parte adaxial e abaxial da folha, respectivamente.

No entanto, vale ressaltar a existência de trabalhos realizados com a pulverização eletrostática que não proporcionaram melhoria na aplicação de agrotóxicos, como os realizados por Bayer et al. (2011) compararam a deposição de líquido utilizando pontas hidráulicas, equipamento eletrostático e atomizador rotativo de disco, e diferentes

volumes de aplicação por via aérea na cultura do arroz, verificaram que a pulverização eletrostática proporcionou menor penetração de gotas no interior da cultura e menores densidades de gotas comparado aos demais sistemas de pulverização.

Silva et al. (1997), compararam técnicas de pulverização no algodoeiro, e concluíram que as gotas carregadas eletrostaticamente não foram suficientes para aumentar a densidade de gotas e a porcentagem da área coberta em diferentes alturas na face superior das folhas, quando comparada à convencional.

2.5. Processos de eletrificação de gotas

Os principais processos utilizados para a eletrificação de gotas são o efeito corona, a indução indireta e a eletrificação direta. No efeito corona, um eletrodo pontiagudo submetido a altas tensões ioniza o ar, e as cargas livres se chocam com as gotas produzidas pelo bico, tornando-as eletricamente carregadas. Este processo é adequado para eletrificar gotas com tamanhos inferiores a 20 μm . As gotas maiores não adquirem carga com intensidade suficiente para aumentar a eficiência da aplicação (CHAIM, 2006; MATTEWS, 1989).

Na indução com eletrificação indireta, o líquido é mantido aterrado, ou seja, com voltagem igual a zero. Neste processo, as gotas adquirem a carga na presença de um intenso campo eletrostático, formado entre o eletrodo de indução mantido em alta voltagem e o jato de gotas. O eletrodo de indução deve ser posicionado na região da borda do jato onde as gotas se formam em uma distância suficiente para evitar centelhas de descarga entre o eletrodo e o líquido (CHAIM, 2006).

O sistema de indução é o mais utilizado devido suas vantagens: (1) a alta tensão não entra em contato com o líquido; (2) A intensidade do campo elétrico é inferior à resistência da repartição do ar, por isso a sua tensão de trabalho pode ser menor e o eletrodo de isolamento torna-se mais fácil; em princípio, não há corrente estabelecida a partir da fonte de alta tensão, por esse motivo, a corrente pode ser pequena (ZHAO et al., 2005).

Na indução com eletrificação direta, o líquido ou o bico recebe a ação da alta tensão e um eletrodo aterrado tem a função de promover um campo eletrostático. (CHAIM 2006).

2.6. Fatores que afetam a pulverização eletrostática

2.6.1. Relação carga/massa (Q/M)

A relação carga/massa (Q/M) é a quantidade de carga (Q), em coulombs, por unidade de massa (M), em kg, presente nas gotas pulverizadas. A quantidade máxima de carga em uma gota é limitada e é denominada de limite de Rayleigh (Equação 3), proposto por (TOLJIC et al., 2008).

$$\frac{qr}{m} = \frac{12\sqrt{2}}{\rho} \sqrt{\frac{\epsilon \gamma}{D^3}} \quad (3)$$

em que

qr/m = limite de Rayleigh ($C \text{ kg}^{-1}$);

ρ = densidade do líquido (kg m^{-3});

ϵ = permissividade elétrica ($F \text{ m}^{-1}$);

γ = Tensão superficial ($N \text{ m}^{-1}$) e

D = diâmetro da gota (μm).

O limite máximo de carga da gota é muito maior do que conseguido experimentalmente. Toljic et al. (2008), ao avaliarem diferentes tamanhos de gotas, relatam que mesmo considerando os picos máximos de cargas presentes na pulverização, a relação Q/M foi de apenas 1/8 da carga máxima teórica.

De acordo com Carlton et al. (1995), a relação Q/M mínima na pulverização eletrostática para se obter ganhos significativos na deposição das gotas sobre os alvos é de $0,8 \text{ mC Kg}^{-1}$. Para Law (1995), a relação Q/M mínima é em torno de 1 a 2 mC kg^{-1} .

No entanto, níveis de carga inferiores podem ser utilizados para alcançar benefícios com a eletrostática. Um nível mínimo considerado para pintura eletrostática a pó é de $0,1 \text{ mC kg}^{-1}$ (SINGH, et al., 1978). Já alguns pulverizadores utilizam a relação Q/M de $0,5 \text{ mC kg}^{-1}$ (HISLOP, 1988). Laryea e No (2005), obtiveram maior deposição com o sistema eletrostático trabalhando com relação Q/M de $0,28 \text{ mC kg}^{-1}$.

Em uma pulverização, diversos fatores afetam a relação Q/M. Jahannama et al. (2005), observaram que esta relação é afetada pela tensão de carregamento do eletrodo. Ao aumentar a tensão do eletrodo, aumenta-se também a relação Q/M, porém, esse aumento ocorre até certo limite, a partir do qual, o aumento da tensão ocasiona efeito negativo, corroborando os resultados de Chaim et al. (2002).

Jahannama et al. (2005), observaram que uma maior vazão de líquido, para uma mesma pressão do ar de pulverização, ocasiona redução na relação Q/M. Essa relação inversa entre a carga e a vazão, também observada por Chaim (1984, 1998) e Chaim et al. (1999), tem sido atribuída ao aumento do diâmetro das gotas. Maski e Durairaj (2010) e Kacprzyk e Lewandowski (2011) obtiveram resultados semelhantes quanto à vazão e tensão aplicada no eletrodo, ao avaliar a relação Q/M.

Hensley et al. (2008), no desenvolvimento de um pulverizador eletrostático, verificaram que a carga na gota foi influenciada pela localização do eletrodo, tensão de indução e pressão de trabalho. Observaram que, quanto maior a pressão de trabalho, maior foi a carga presente na gota.

Wilkerson e Gaultney (1989) relatam que a relação Q/M na gota é aumentada conforme se aumenta a condutividade do líquido. Resultados opostos foram obtidos por Abu-Ali e Barringer (2008), trabalhando com atomização eletrostática de líquidos na indústria alimentícia, verificaram que, para baixas tensões de carregamento, à medida que se aumentou a condutividade da solução ocorreu maior variabilidade entre os produtos fabricados, pois com o aumento da condutividade diminuiu o tempo para a carga se difundir para a solução, ocasionando a redução de carga na gota.

Maski e Durairaj (2010) verificaram que a deposição de agrotóxicos na pulverização eletrostática é influenciada por fatores como tensão aplicada no eletrodo de indução no carregamento das gotas, velocidade de aplicação, altura da barra de pulverização em relação ao alvo e sentido de orientação do alvo em relação à

pulverização. As características do líquido pulverizado como a tensão superficial e a viscosidade, podem interferir na pulverização eletrostática (ZHENG et al., 2002).

Maynagh et al. (2009), desenvolveram um pulverizador pneumático eletrostático, e observaram que a velocidade do ventilador afeta a carga na gota. De tal modo que, quanto maior a velocidade do ventilador, maior a carga.

2.6.2. Efeito da distância do bocal do pulverizador ao alvo

A eficiência na pulverização eletrostática está relacionada à distância do bico de pulverização em relação ao alvo, pois conforme se aumenta esta distância, altera-se o campo eletrostático, e existe a tendência de redução da carga na gota (ZHAO et al., 2005).

Zhao et al. (2008) trabalharam com simulação numérica em pulverização eletrostática, com gotas de 30 μm , relação Q/M de 5 mC kg^{-1} e duas distâncias do alvo (0,65 e 0,90 m), os autores verificaram que a cada 10000 gotículas, o número de gotículas sobre o alvo diminuiu de 4320 para 1360, quando a distância aumentou de 0,65 para 0,90 m, respectivamente. Isto ocorreu em função da perda de carga da gota no trajeto, devido à presença de cargas no espaço percorrido.

Moon et al. (2003) verificaram que, com o aumento da distância entre o bico de pulverização e o alvo, aumentou-se os valores de DMV e a relação Q/M diminuiu rapidamente com o aumento da distância. Já Law et al. (1997), observaram que a relação Q/M reduziu linearmente até 41 %, apresentando a relação Q/M de -7.3 mC kg^{-1} e $-4,3 \text{ mC kg}^{-1}$, quando o bico de pulverização foi posicionado a 0 e 0,50 m em relação ao alvo, respectivamente. Minguela e Cunha (2010) relatam que na aplicação aérea utilizando o sistema eletrostático, para evitar que as gotas se evaporem e aumentar a atração pelo alvo, a altura de voo não deve ser superior a 3 metros.

Chao et al. (2011) constataram o efeito da altura (0,2; 0,3 e 0,4 m) e do ângulo (0; 45 e 90°) da pulverização eletrostática na deposição de calda na cultura do tabaco e observaram que a maior deposição foi a altura de 0,4 m e ângulo entre 45 a 90°.

Dan et al. (2011), avaliaram a deposição em diferentes distâncias de pulverização (0; 0,15; 0,30; 0,45 e 0,60 m) na cultura do mate, utilizando quatro pulverizadores

eletrostáticos, e verificaram que a distância de pulverização influenciou na deposição de calda, sendo que, a distância ideal variou de acordo com o modelo do pulverizador.

2.6.3. Espectro de gota

O espectro de gotas de uma pulverização consiste em classificar uma amostra da população de gotas em classes de tamanhos, sendo comumente utilizados os parâmetros $Dv_{0,1}$; $Dv_{0,5}$; $Dv_{0,9}$ e Amplitude relativa (Span).

Na caracterização do espectro de gotas, o $Dv_{0,1}$ representa o diâmetro de gota tal que 10 % do volume do líquido pulverizado é constituído de gotas menores que esse valor, sendo que não deve ser analisado isoladamente, pois não caracteriza o tamanho de gota em uma pulverização. Em toda pulverização realizada, independente do sistema utilizado na fragmentação de gotas, dificilmente se obtém gotas totalmente homogêneas, sendo assim, o parâmetro utilizado para estimar o tamanho de gota é o $Dv_{0,5}$, também conhecido como diâmetro da mediana volumétrica (DMV). O DMV corresponde ao diâmetro da gota que divide uma população de gotas em duas partes de volumes iguais. Outro parâmetro da pulverização utilizado para caracterizar o espectro de gotas é o $Dv_{0,9}$, que representa o tamanho de gotas no qual 90 % do volume do líquido pulverizado é constituído de gotas menores que esse valor. Os parâmetros $Dv_{0,1}$ e $Dv_{0,9}$ devem ser analisados em conjunto possibilitando a estimativa da amplitude relativa ou índice Span. Este índice nos permite estabelecer o quão homogêneo está o espectro de gotas.

Em uma pulverização, os parâmetros DMV, índice Span e densidade de gotas são os principais fatores que definem a qualidade da aplicação de agrotóxicos. A aplicação eficiente requer cobertura adequada da superfície-alvo com gotas de tamanho apropriado (CUNHA et al., 2004). De acordo com Oliveira et al. (2007) é o diâmetro das gotas que determina a porcentagem de cobertura e também estabelece o seu potencial risco de deriva, penetração no dossel da planta, perdas por evaporação e, conseqüentemente, a porcentagem do volume total aplicado que permanece sobre o alvo.

Atualmente, a tendência das pulverizações é de redução do volume de calda, resultando em maior autonomia e capacidade operacional dos pulverizadores (ROMÁN et al., 2009) desta maneira se tenta relacionar o tamanho de gotas à penetração do produto, à uniformidade de distribuição e à efetividade de deposição (BAYER et al., 2011). No caso de gotas muito finas, geralmente, se consegue boa cobertura e uniformidade de distribuição da calda, mas essas gotas podem evaporar em condições de baixa umidade relativa do ar, ou serem levadas pela corrente de ar (SUMNER, 1997; MURPHY et al., 2000; WOLF, 2000).

Aplicações utilizando gotas pequenas, geralmente, proporcionam maior densidade de gotas sobre o alvo para um mesmo volume de calda de aplicação. No entanto, há riscos de contaminação ambiental devido à deriva por isso tem-se buscado alternativas que minimizem tais problemas (CROSS et al., 2001). Existem divergências quanto ao tamanho de gotas mais propícias à deriva. Para Zhu et al. (1994), gotas com diâmetro acima de 500 μm têm pouco problema de deriva e gotas abaixo de 50 μm , em geral, evaporam antes de atingir o alvo. Para Cunha et al. (2004) as gotas com diâmetro inferior a 100 μm são as principais responsáveis pelo aumento no risco da deriva. Já Lefebvre (1989), afirma que, gotas de diâmetros próximos a 150 μm são arrastadas com facilidade pelo vento e altamente suscetíveis a evaporação. Etheridge et al. (1999) são ainda mais rigorosos e afirmam que gotas abaixo de 200 μm são as mais suscetíveis a deriva. Stainier et al. (2006) verificaram que existe uma relação clara quanto ao parâmetro DMV e deriva, sendo que quanto menor o DMV maior o potencial de deriva.

Na pulverização eletrostática, procura-se trabalhar com gotas de diâmetro reduzido, pois conforme se aumenta o diâmetro da gota o carregamento da mesma fica comprometido. Existem poucos estudos acerca da pulverização eletrostática e risco potencial de deriva. No entanto, Laryea e No (2003) verificaram que a pulverização eletrostática reduziu as perdas por deriva, e a redução foi devido às forças de atração que agem entre a gota e a planta aterrada. Esehaghbeygi et al. (2010) afirmam que as forças eletrostáticas em pequenas gotículas são mais proeminentes do que as forças gravitacionais e, portanto, podem fornecer uma melhor deposição com redução da

deriva. Oliveira et al. (2011), avaliaram a pulverização eletrostática na cultura da soja, e observaram que houve redução da deriva em até 70,2 %.

Na pulverização eletrostática, não se observa uma relação clara quanto ao efeito do sistema eletrostático no espectro de gotas. Wilson (1982) e Xiaoying e Jianlong (2011), verificaram que o DMV diminuiu com o aumento da tensão do eletrodo. Em contrapartida, Laryea e No (2003) verificaram que à medida que se aumentou a tensão do eletrodo, houve um aumento no DMV. As diferenças na relação de tensão aplicada ao eletrodo e o DMV podem ser explicadas devido aos fatores envolvidos como tipo de bico, propriedades físicas e elétricas do líquido, método de carregamento e geometria do eletrodo na aplicação.

2.6.4. Deposição de calda e alvo de pulverização

O monitoramento nas aplicações de agrotóxicos é de suma importância, pois permite a análise da eficácia no controle de doenças, pragas e plantas daninhas. Também determinam os riscos de perdas para o meio ambiente. Diversas técnicas têm sido utilizadas para mensurar a qualidade em uma pulverização, comumente tem se empregado etiquetas hidrossensíveis, devido à facilidade de manuseio e análise. No entanto, apresentam custo elevado e imprecisão na mensuração das gotas.

Diversos trabalhos têm sido empregados com o uso do traçador azul brilhante (MEWES, et al., 2011; CUNHA et al., 2006). Este corante tem a vantagem de não influenciar nas características físicas da calda, como a tensão superficial das gotas, e não são absorvidos pelas folhas ou degradados pela luz solar por um período de até oito horas (MARCHI et al., 2005; SOUZA et al., 2007). Na avaliação da deposição, a superfície alvo a ser avaliada pode ser realizada em alvos naturais ou artificiais. Cooke e Hislop (1993) relatam que o tipo de alvo depende das circunstâncias de uso e das prioridades da pesquisa.

Os alvos artificiais têm como vantagens serem uniformes, apresentam facilidade na remoção do traçador, e podem ser posicionados, precisamente, em posições pré-estabelecidas. Não existe alvo artificial padrão, podendo variar conforme o tipo do marcador utilizado, o método analítico empregado e, sobretudo, a finalidade dos

estudos (REZENDE, 2011). Marchi et al. (2005), avaliaram a degradação de dois diferentes corantes, utilizaram-se placas de Petri como alvo, uma vez que elas são confeccionadas de material inerte e permitem a extração total dos corantes.

Na pulverização eletrostática, diversos alvos artificiais tem sido utilizados, Jahannama et al. (2005), para avaliar o efeito da pulverização eletrostática, utilizaram como alvo um disco metálico aterrado. Já Maski e Durairaj (2010) e Silva (1993) avaliaram a pulverização eletrostática, e utilizaram como alvo plantas artificiais metálicas. Moon et al. (2003), avaliaram o efeito da distância do bocal do pulverizador ao alvo, na relação Q/M, e utilizaram como alvo artificial uma placa metálica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Local dos ensaios

O experimento foi realizado no Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas (LADA), pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

Características do pulverizador

Foi utilizado um pulverizador eletrostático, marca Eletrostatic Spraying Systems, modelo ESS MBP 4.0, com capacidade do tanque de 15 litros. Este pulverizador utiliza-se do princípio pneumático para a formação e o fracionamento de gotas, além de utilizar o método de indução de cargas indireto para a eletrificação das gotas.

O pulverizador é composto de um motor a gasolina de 4 tempos, compressor de ar e lança, onde está acoplado o bocal de pulverização. O corpo e as partes do bocal de atomização são fabricadas de PVC, que por ser um material isolante, minimiza os efeitos de anulação das cargas na zona de atomização. O eletrodo de indução está inserido no bocal, adjacente à região de atomização primária, onde a energia cinética do fluxo de ar comprimido corta o fluxo de líquido em gotas (Figura 3). (JAHANNAMA, et al. 2005).

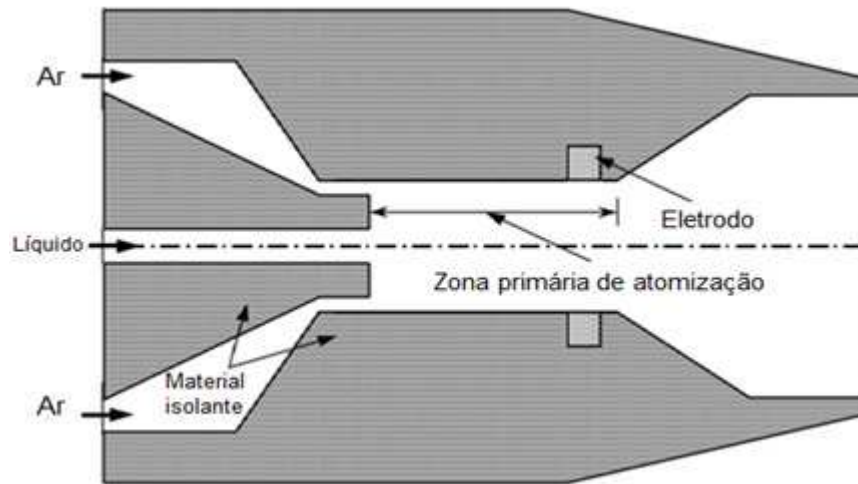


Figura 3. Bocal de atomização de gotas com sistema de eletrificação por indução indireta (JAHANNAMA, et al. 2005).

3.1. Determinação da relação carga/massa (Q/M) em diferentes distâncias entre o bocal de pulverização e o alvo

A fim de determinar a intensidade de carga, utilizou-se o método da gaiola de Faraday isolada e ligada a terra por um multímetro (Figura 4). Simmons e Lehtinen (1986) afirmam que este método é o mais consistente, se comparado aos outros. A gaiola de Faraday é feita de material condutor, isolada, de modo que quando eletrizada, possui campo elétrico nulo em seu interior e as cargas se distribuem de forma homogênea na parte mais externa da gaiola.

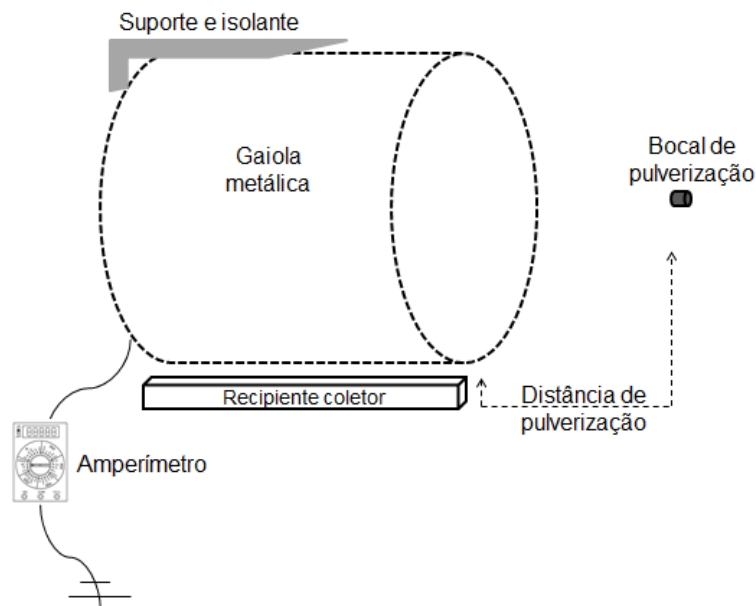


Figura 4. Esquema da gaiola de Faraday para a quantificação da relação carga/massa.

A gaiola de Faraday foi construída com as dimensões de 0,8 metros de diâmetro e 0,6 metros de comprimento. Essas medidas foram previamente estabelecidas para que todo o jorro da pulverização fosse captado pela gaiola ao longo dos tratamentos. Na construção da gaiola, montou-se uma estrutura de aço galvanizado envolto com tela metálica, malha 16 (abertura 1,36 mm) e fio 32 (0,23 mm).

As pulverizações foram realizadas no interior da gaiola, onde se realizaram as medições de corrente (A), com o auxílio de um multímetro, marca Minipa e modelo ET-2510, com precisão de $\pm 1\%$. Todos os ensaios foram realizados com a bateria do pulverizador completamente carregada. Com o objetivo de se verificar a carga presente na gota em diferentes distâncias, as pulverizações foram realizadas com água a 0; 1; 2; 3; 4 e 5 metros da gaiola de Faraday. Para cada distância pulverizada, realizaram-se 14 repetições.

Em todas as pulverizações colocou-se o pulverizador na aceleração máxima do motor, demarcou-se o tempo de 15 segundos até se estabilizar o equipamento e prosseguiu-se com as pulverizações. Posteriormente, com o auxílio de uma proveta graduada com precisão de 5 mL, mensurou-se a quantidade de líquido pulverizada ($L \text{ min}^{-1}$).

A partir dos dados de corrente elétrica e quantidade de líquido pulverizada, determinou-se a relação carga/massa presente na gota (Equação 4).

$$Q/M = \frac{i}{m} \quad (4)$$

em que

Q/M = Relação carga/massa ($C \text{ kg}^{-1}$);

i = Corrente elétrica contida no jato de pulverização ($C \text{ s}^{-1}$);

m = Fluxo de líquido (kg s^{-1}).

Adotou-se a massa específica da água igual a um, para se obter o fluxo em kg min^{-1} . As pulverizações foram realizadas em condições de laboratório e todas as condições meteorológicas foram monitoradas durante o ensaio. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa Sisvar, versão 5.3.

3.2. Avaliação do efeito da condutividade elétrica da solução eletrolítica na relação carga/massa (Q/M)

Para avaliar a condutividade elétrica da solução no efeito do carregamento das gotas, preparou-se soluções com diferentes graus de condutividade elétrica. As soluções foram preparadas com água destilada e NaCl. Utilizou-se NaCl com grau de pureza de 99 % nas diluições de 1; 2; 4 e 8 g para cada 100 mL de água e um tratamento controle (água destilada).

A análise de condutividade elétrica foi realizada utilizando um condutímetro, marca Marte, modelo MB-11, previamente calibrado. Na determinação da condutividade elétrica das soluções, para cada concentração, realizaram-se três repetições.

As pulverizações foram realizadas em diferentes distâncias e as relações de Q/M determinadas conforme já estabelecidas no item 3.1. O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado, esquema fatorial 5 x 6 (5 diluições x 6 distâncias), com 14 repetições por tratamento. O fator diluição foi considerado como

variável qualitativa, devido à finalidade do experimento. Os dados foram analisados usando o programa estatístico Sisvar, versão 5.3.

3.3. Avaliação do espectro de gotas

A análise do espectro de gotas foi realizada utilizando-se um analisador de partículas em tempo real (Spraytech, Malvern Instruments Co.), lente focal de 750 mm. Este analisador baseia-se na difração da luz após o choque com as gotas, em que seu diâmetro é proporcional ao ângulo de desvio do feixe de raio laser. O aparelho possui precisão de 1 %. O equipamento foi configurado para a mensuração de gotas na faixa entre 0,1 a 2500 μm , com a frequência de 2,5 kHz, e tempo de coleta de 1,2 segundos, totalizando 3000 leituras a cada pulverização realizada. As condições ambientais durante o experimento foram monitoradas.

Em se tratando de um aparelho elétrico, a fim de minimizar os erros, antes de se realizarem as pulverizações, montou-se uma proteção envolvendo o aparelho, feita de material isolante (isopor), para evitar que as gotas carregadas eletrostaticamente fossem influenciadas pelo aparelho.

Os parâmetros da pulverização avaliados foram $Dv_{0,1}$; $Dv_{0,5}$; $Dv_{0,9}$, Amplitude relativa (Span) e porcentagem de gotas abaixo de 100 μm . A amplitude relativa foi determinada de acordo com a Equação (5).

$$AR = \frac{Dv_{0,9} - Dv_{0,1}}{Dv_{0,5}} \quad (5)$$

em que

AR = amplitude relativa (adm);

$Dv_{0,9}$ = diâmetro da gota abaixo do qual está contido 90 % do volume correspondente às gotas da amostra (μm);

$Dv_{0,1}$ = diâmetro da gota abaixo do qual está contido 10 % do volume correspondente às gotas da amostra (μm) e

$Dv_{0,5}$ = diâmetro da mediana volumétrica (μm).

O ensaio foi conduzido em esquema fatorial (2 x 5), dois métodos de pulverização (Sistema de pulverização eletrostático ligado e desligado) combinados com cinco distâncias (1; 2; 3; 4 e 5 m), em delineamento inteiramente casualizado. Nas pulverizações utilizou-se água pura e para cada tratamento realizaram-se quatro repetições. Os dados foram analisados utilizando o software Sisvar, versão 5.3.

3.4. Avaliação da velocidade do ar em diferentes distâncias do pulverizador

O ensaio foi realizado em condições de laboratório, onde o pulverizador foi montado em um suporte onde permaneceu estático durante todo o experimento. Para mensurar as velocidades do ar, colocou-se o motor do pulverizador na aceleração máxima, deixando-o ligado por um período de 15 segundos até a estabilização da corrente de ar.

Com o auxílio de um termo anemômetro de fio quente, da marca Instrutherm, modelo TAFR-180, mediu-se as velocidades do ar em 10 distâncias longitudinais (0,5; 1; 1,5;...;5 metros), combinados com 10 distâncias transversais (± 0 ; $\pm 0,25$; $\pm 0,50$; $\pm 0,75$ e ± 1 m), convencionou, o sinal positivo e negativo, as distâncias transversais à direita e à esquerda, respectivamente, em relação ao pulverizador. As velocidades do ar foram medidas a altura de um metro, em relação ao solo, no qual o bocal do pulverizador foi instalado. A cada leitura, realizaram-se três repetições.

Os dados foram analisados utilizando o Software Estatistic 7.0, para obtenção do gráfico de superfície de contorno, demonstrando o comportamento do ar, ao longo das distâncias longitudinais e transversais.

3.5. Avaliação do efeito da distância do bocal de pulverização em relação ao alvo artificial na eficiência de deposição de líquido na pulverização eletrostática

3.5.1. Ensaios preliminares para avaliar o efeito da distância de pulverização na eficiência de deposição de líquido

Para avaliação do efeito da distância entre o bocal e o alvo na pulverização eletrostática, em ensaios preliminares, montou-se o pulverizador em uma barra com comprimento de 9 metros, equipado com um motor elétrico de indução trifásico de 735,49 W (1 CV) e rotação de 1715 rpm. O motor foi controlado por um inversor de frequência, capaz de gerar uma tensão e frequência trifásica ajustável, cuja finalidade foi controlar a velocidade do motor elétrico de indução trifásico, possibilitando trabalhar a uma velocidade constante. Utilizou-se o pulverizador nas velocidades de 1; 2 e 3 km h⁻¹ nas distâncias de 0,5; 1; 1,5 e 2 metros do alvo.

Para a avaliação das pulverizações, construíram-se plantas artificiais metálicas fabricadas de fio de cobre. A estas plantas artificiais, foram fixadas etiquetas hidrossensíveis e etiquetas plásticas para avaliar os parâmetros técnicos da pulverização e a deposição de calda no alvo.

3.5.2. Ensaio realizado para avaliar o efeito da distância de pulverização na eficiência de deposição de líquido

Para avaliar a influência da distância do alvo na eficiência da deposição de gotas utilizando a pulverização eletrostática, montou-se o pulverizador em um suporte, permanecendo o pulverizador estático durante as pulverizações. Utilizaram-se alvos artificiais, fabricados de madeira, onde foram fixadas placas metálicas aterradas. A cada alvo, fixaram-se duas placas metálicas, sendo uma no sentido transversal e outra no sentido longitudinal ao jorro de pulverização. A estas placas foram fixadas etiquetas plásticas, cujas dimensões foram 14,5 x 3 cm, que posteriormente foram utilizadas para a determinação da deposição de líquido. As pulverizações foram realizadas a cinco

distâncias longitudinais (1; 2; 3; 4 e 5 m) combinados com quatro distâncias transversais em relação ao eixo central (0; 0,15; 0,30 e 0,45 m) entre o alvo e o bico de pulverização (Figura 5).

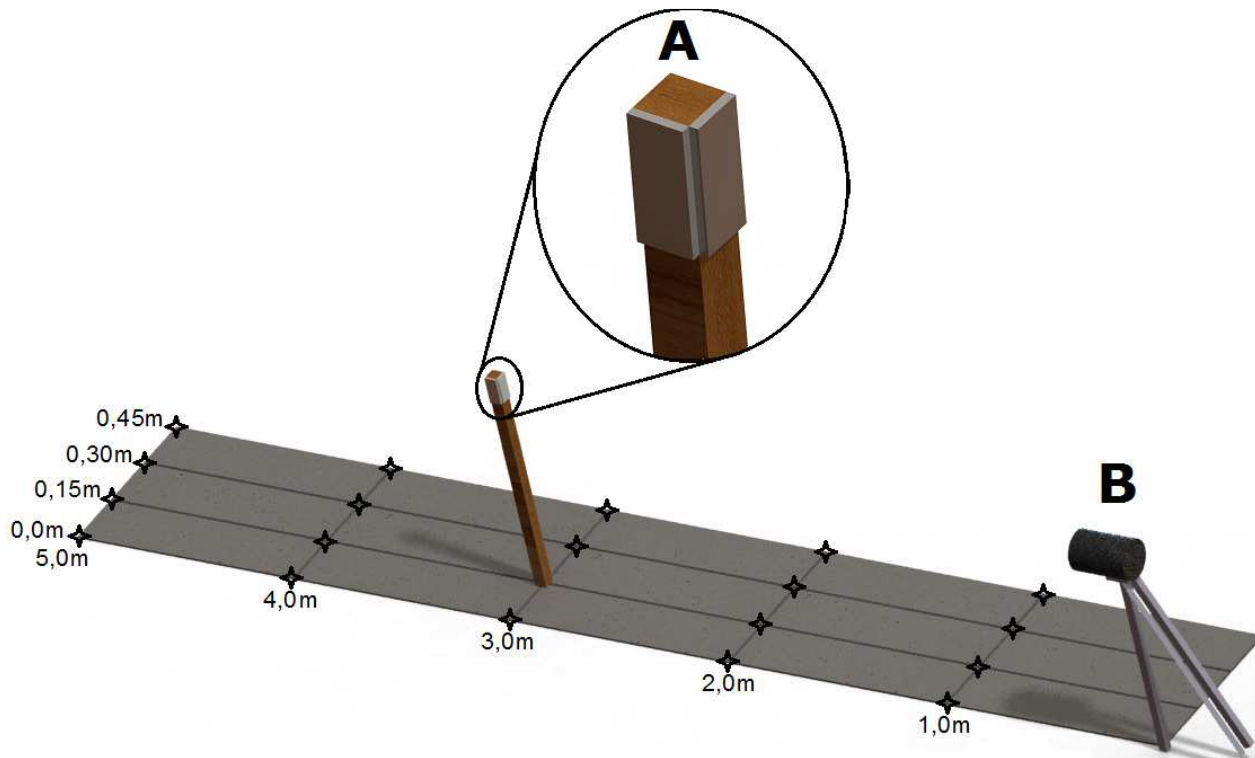


Figura 5. Esquema de disposição do alvo e do pulverizador na avaliação de deposição de calda. (A) Alvo transversal e longitudinal; (B) Bocal do pulverizador.

As pulverizações foram realizadas com água pura com o sistema eletrostático ligado e desligado, e posteriormente comparado à deposição de calda nos dois sistemas. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial $2 \times 5 \times 4$, sendo dois métodos de pulverização (sistema eletrostático ligado/desligado), cinco distâncias horizontais e quatro distâncias transversais, em duas orientações do alvo (longitudinal e transversal), com quatro repetição por tratamento, totalizando 320 unidades experimentais.

A cada pulverização, o pulverizador foi ligado por um período de 15 segundos até que se estabilizasse a vazão de ar e de líquido. Posteriormente pulverizou-se durante três segundos. Este tempo foi utilizado, pois, em ensaios preliminares, foi observado

que em períodos inferiores a três segundos a deposição de calda a partir da distância de dois metros foi de difícil detecção no espectrofotômetro. Para períodos superiores a 3 segundos ocorreu escorrimento de calda nas distâncias de um e dois metros.

Na avaliação da deposição de calda utilizou-se a metodologia proposta por Palladini (2000). O corante utilizado foi o azul brilhante (Corante Azul FCF, Duas Rodas Industrial), catalogado internacionalmente pela “Food, Drug & Cosmetic” como FD&C Blue n.1, na concentração de 3 g L^{-1} . Com a adição do corante a calda, determinou-se a curva de calibração da solução padrão.

Após as pulverizações, as etiquetas amostradoras foram acondicionadas em sacos plásticos, e posteriormente foram adicionados 50 mL de água destilada, sendo agitados por 30 segundos. Logo após, com o auxílio do espectrofotômetro, previamente calibrado, realizou-se as leituras de absorvância na faixa de 630 nm. A partir das leituras de absorvâncias, e com o uso da curva de calibração da solução padrão, os dados de absorvância foram transformados para valores de concentração (mg L^{-1}).

Com os dados da concentração inicial do corante na calda, volume da diluição utilizado para a lavagem das amostras e a absorvância detectada pelo espectrofotômetro, foi possível determinar o volume capturado pelo alvo (Equação 6). A concentração da amostra (mg L^{-1}) foi obtido por meio da leitura de absorvância e transformado com o uso da equação da curva de calibração da solução padrão.

$$C_i V_i = C_f V_f \quad (6)$$

em que

C_i = Concentração inicial da amostra (mg L^{-1});

V_i = Volume capturado pelo alvo (mL);

C_f = concentração da amostra (mg L^{-1}) e

V_f = Volume da diluição (mL).

Ao final, com o volume de calda capturada pelo alvo, e com a área da etiqueta, determinou-se a deposição de calda, em $\mu\text{L cm}^{-2}$. Os dados foram analisados usando o software Sisvar, versão 5.3.

3.6. Desenvolvimento de um sistema de atração de gotas

Para desenvolver o sistema de atração de gotas, partiu-se do princípio da lei de Coulomb, em que cargas de polaridades opostas se atraem. Sendo assim, determinou-se a polaridade da carga elétrica presente na gota, e com o auxílio de uma fonte de alta tensão, aplicou-se ao alvo cargas elétricas com polaridade oposta a da gota, visando atraí-las. Na determinação da polaridade da carga presente na gota, conectou-se o cabo de alta tensão que sai do circuito eletrônico do pulverizador para o eletrodo de indução e ligou-o a um osciloscópio, previamente calibrado (Figura 6).

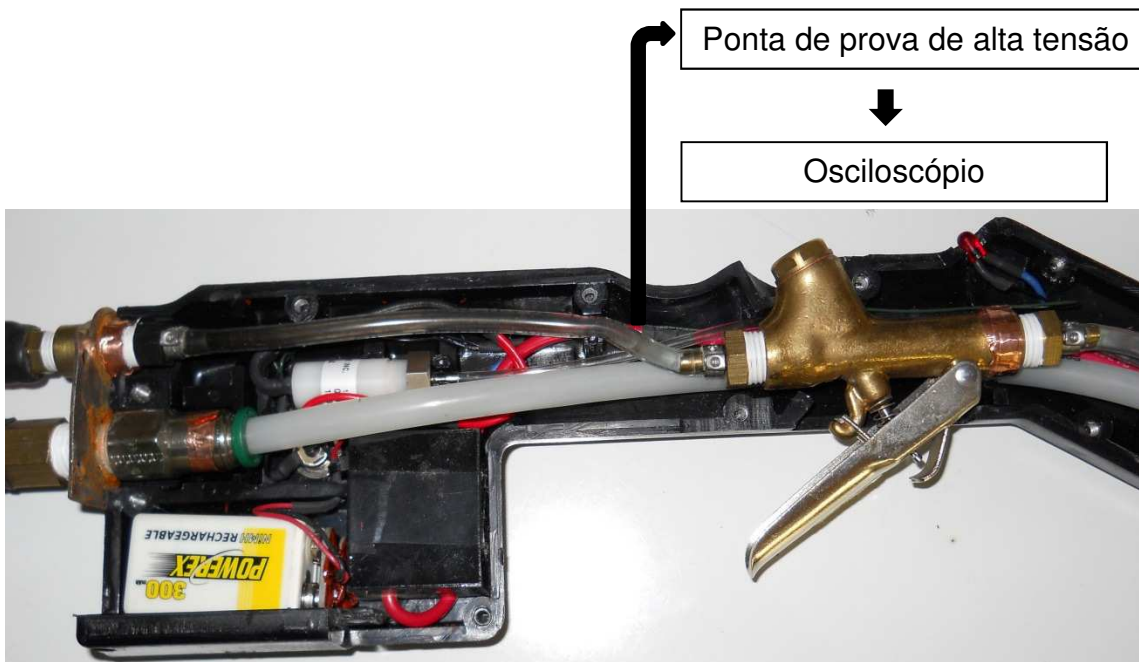


Figura 6. Ligação do circuito elétrico do pulverizador ao osciloscópio.

O osciloscópio utilizado foi da marca UNI, modelo OS – 9030, 30 MHz. Utilizou-se uma ponta de prova específica de alta tensão marca ICEL Manaus, modelo KV-40, para emitir o sinal ao osciloscópio, cujas tensões máximas de trabalho são de 40 e 28 kV, para corrente alternada e contínua, respectivamente. O fator de correção deste equipamento é de 1000 vezes o valor obtido, para se obter o valor real de tensão.

A fonte de alta tensão utilizada para eletrificação do alvo foi da marca Tecnotrafo, modelo 7kV, corrente contínua (Figura 7).



Figura 7. Fonte de alta tensão corrente contínua, utilizado para eletrificar o alvo.

O mesmo procedimento empregado para verificar a polaridade da carga elétrica das gotas também foi utilizado para verificar a polaridade da carga elétrica da fonte utilizada para eletrificar o alvo. Em se tratando de uma fonte de corrente contínua, após verificar o sinal elétrico da fonte no osciloscópio, aferiu-se os valores de tensões em um multímetro, por permitir maior acurácia nas leituras.

3.7. Avaliação do sistema de atração de gotas

A partir dos sinais elétricos previamente estabelecidos, procederam-se as avaliações do sistema de atração de gotas, realizando as pulverizações nos alvos, conforme estabelecido no item 3.5.2.

O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado, no esquema fatorial (2 x 5 x 4), dois sistema de atração (ligado e desligado), cinco distâncias longitudinais (1; 2; 3; 4 e 5 m) e quatro distâncias transversais (0; 0,15; 0,30 e 0,45 m), com o alvo posicionado na longitudinal e na transversal, fazendo-se quatro repetições por tratamento, totalizando 320 unidades experimentais.

Em todas as pulverizações, o sistema eletrostático do pulverizador permaneceu ligado, e constantemente, com o auxílio de um multímetro, as tensões da bateria utilizadas no pulverizador foram monitoradas, para garantir que a gota estivesse carregada. Nos tratamentos em que o sistema de atração de gotas estava ligado, também monitorou-se a tensão no alvo.

3.8. Avaliação da pulverização eletrostática e do sistema de atração de gotas utilizando alvos naturais

O ensaio foi realizado em um cafezal pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola, setor de tratamento de águas residuais, da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, no mês de agosto de 2011. As plantas de café possuíam altura média de 1,8 metros, diâmetro de copa médio de 1,42 metros e distância entre linhas de 2,2 m.

A fim de caracterizar as condições de teor de água do solo no local do experimento, coletaram-se aleatoriamente com o auxílio de um trado holandês, cinco amostras de solo, na profundidade de 0 a 20 cm. Posteriormente, determinou-se os teores de água pelo método gravimétrico em estufa a 105 °C por 24 horas.

3.8.1. Avaliação do sistema de atração de gotas na cultura do café

Com o intuito de verificar se o sistema era capaz de eletrificar as plantas aterradas, o sistema proposto foi ligado no caule da planta, conforme pode ser verificado na Figura 8.



Figura 8. Eletrificação do alvo natural.

Com o auxílio de um multímetro, marca Minipa, modelo ET – 2030A, realizou-se o monitoramento da tensão elétrica em toda planta. O monitoramento da tensão elétrica foi realizado em esquema de parcela subsubdividida. Na parcela considerou-se a altura da planta (superior, médio e inferior), na subparcela os pontos cardeais (norte, sul, leste e oeste), e na subsubparcela três profundidades (externo, mediano e interno), tomando-se nestes pontos os valores de tensão (Figura 9). O potencial de referência utilizado foi a terra. Este procedimento foi realizado em quatro plantas escolhidas aleatoriamente na área, totalizando 144 leituras.



Figura 9. Monitoramento de tensão elétrica na planta.

3.8.2. Avaliação da deposição de líquido nas pulverizações

Na avaliação do sistema proposto, procederam-se a três sistemas de pulverizações: 1) Sistema eletrostático ligado, planta eletrificada; 2) Sistema eletrostático ligado, planta aterrada e 3) Sistema eletrostático desligado e planta aterrada. A vazão do pulverizador utilizado foi de $0,2 \text{ L min}^{-1}$, velocidade média de $0,3 \text{ m s}^{-1}$ e volume de pulverização de 100 L ha^{-1} . No momento das pulverizações, as condições ambientais foram monitoradas. As pulverizações foram realizadas em um dos lados das plantas (face Sul), e como alvo, utilizou-se a folha do cafeeiro.

Na coleta das folhas, tomou-se como referência a face sul da planta, dividindo-a em três alturas (superior, médio e inferior) e a cada altura subdividiu em seis profundidades denominadas de P1, P2, ..., P6 (Figura 10).

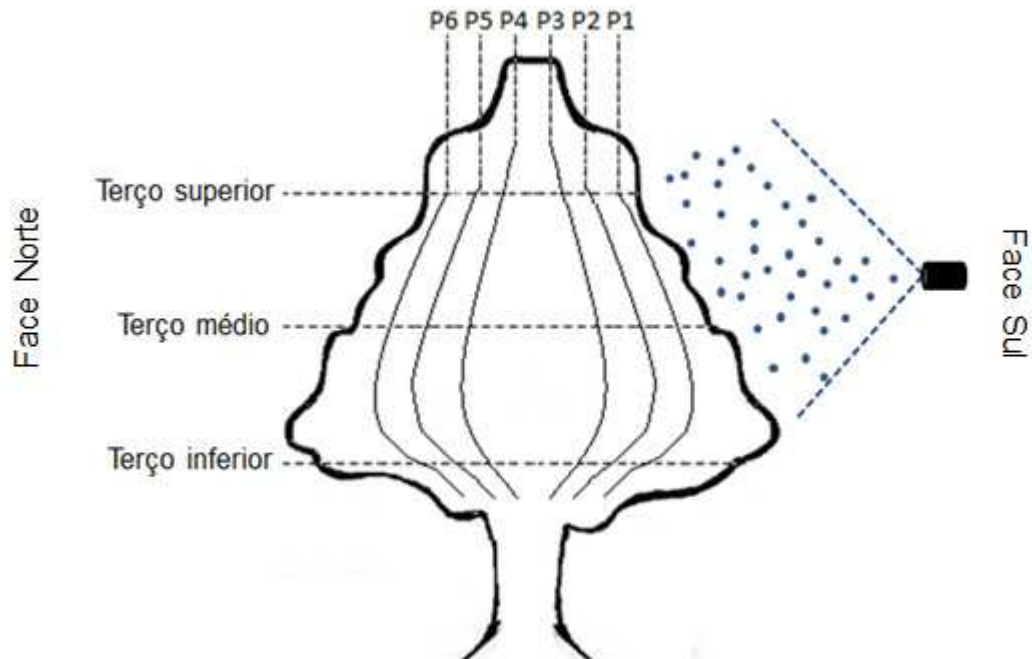


Figura 10. Pontos de coleta de folhas na planta.

O experimento foi conduzido em esquema de parcela subsubdivididas, sendo que na parcela foram considerados três sistemas de pulverização, na subparcela três alturas e nas subsubparcelas seis profundidades. A cada tratamento realizou-se quatro repetições, com um total de 216 unidades experimentais.

A fim de se minimizarem os erros e aumentar as leituras de absorvância no espectrofotômetro, a cada ponto amostral, coletaram-se duas folhas. Estas foram acondicionadas em sacos plásticos, lavadas em 50 mL de água destilada e determinada as absorvâncias no espectrofotômetro. Após serem lavadas, as folhas foram digitalizadas, com o auxílio de uma câmera fotográfica da marca Sony, modelo HX-1, com resolução de 9 mega pixel. Posteriormente com o auxílio do software de análises de imagens, ImageTools 3.0, determinou-se a sua área. Em seguida determinou-se a deposição do corante por unidade de área, conforme a metodologia proposta por Palladini (2000), utilizando-se 3 g L^{-1} do corante Azul Brilhante. Os dados foram analisados usando o software Estatístico Sisvar, versão 5.3.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Determinação da relação carga/massa em diferentes distâncias entre o bocal de pulverização e o alvo

Durante o ensaio, as condições de temperatura permaneceram entre 15 a 16 °C, umidade relativa entre 79 a 81%, e ausência de vento.

Na avaliação da relação carga/massa (Q/M) do pulverizador, observou-se que esta foi inversamente proporcional à distância entre o bocal de pulverização e o alvo. Ao se pulverizar a distância mínima do alvo, a relação Q/M encontrada foi de 4,11 mC kg⁻¹, enquanto que ao se distanciar 5 metros a relação encontrada foi de 0,052 mC kg⁻¹, (Figura 11). Resultados semelhantes foram obtidos por Moon et al. (2003) e Zhao et al. (2008).

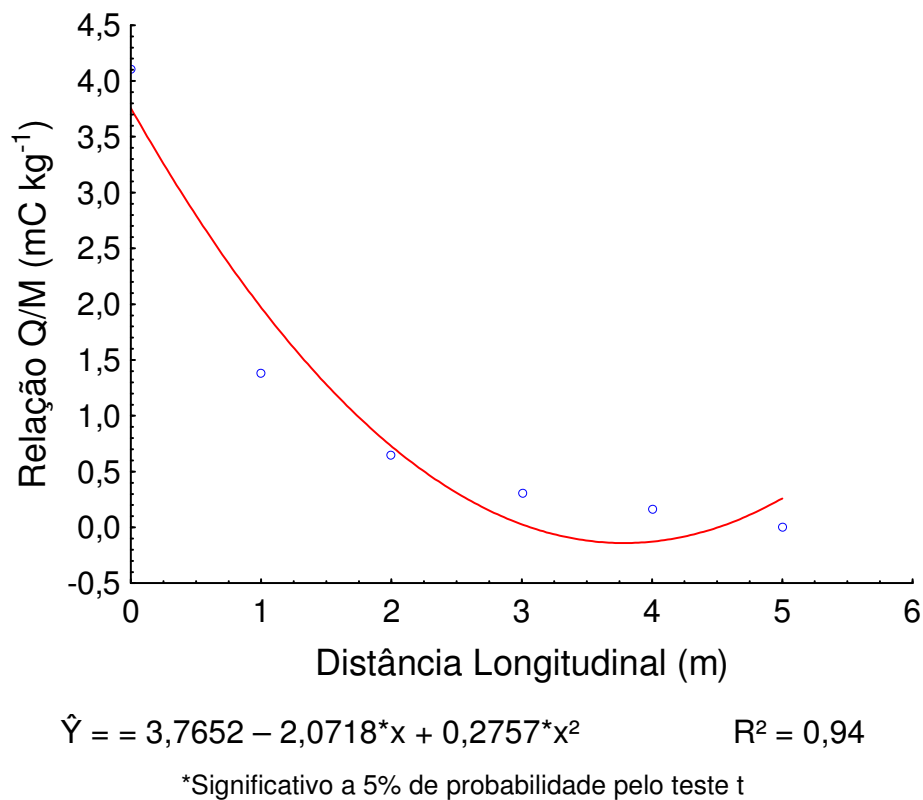


Figura 11. Relação Q/M em diferentes distâncias entre o pulverizador e o alvo.

Ao se distanciar do alvo, o trajeto a ser percorrido pela gota é maior, e neste percurso esta sofre a resistência do ar, o que ocasiona perdas da carga elétrica presente nas gotas, fazendo com que haja redução na relação Q/M. Também, à medida que se distância do alvo, gotas menores tendem a evaporar durante a sua trajetória podendo afetar a relação Q/M.

Na pulverização eletrostática, quanto maior a relação Q/M maior a eficiência na pulverização, pois a carga na gota afeta a força elétrica, que por sua vez, afeta o campo eletrostático entre a gota e o alvo.

Não existe uma relação Q/M ideal para a pulverização, entretanto, quanto maior esta relação melhor será a eficiência da pulverização eletrostática. De acordo com Carlton et al. (1995), a relação Q/M mínima na pulverização eletrostática para se obter ganhos significativos na deposição das gotas sobre os alvos é de $0,8 \text{ mC Kg}^{-1}$. Para Law (1995), a relação Q/M mínima é em torno de 1 a 2 mC kg^{-1} . Apesar destes valores servirem de referência, estudos recentes têm demonstrado que valores inferiores a estes ocasionaram aumento da deposição de calda ao alvo (LARYEA e NO, 2005).

4.2. Avaliação do efeito da condutividade elétrica da solução na relação carga/massa

A condutividade elétrica da solução indica o potencial da solução em conduzir a corrente elétrica. Este parâmetro está relacionado à quantidade de íons dissolvidos na solução. A água pura apresenta baixa condutividade elétrica. Com a adição de NaCl à água, este se dissocia em íons Na^+ e Cl^- . Quanto maior a quantidade de íons maior será a condutividade elétrica da solução. No presente ensaio, verificou-se que em todas as diluições realizadas a condutividade elétrica diferiu estatisticamente (Quadro 1).

Quadro 1. Média da condutividade elétrica das soluções nas diferentes diluições de NaCl

Diluição (g/100 mL)	Condutividade Elétrica (mS cm ⁻²)
0	0,00 e
1	17,03 d
2	19,44 c
4	35,92 b
8	64,59 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Na avaliação da relação Q/M das diferentes soluções em diferentes distâncias de pulverização ao alvo, verificou-se que houve interação entre os fatores distância e a condutividade elétrica da solução. Ao avaliar as diferentes soluções para uma determinada distância aplicou-se o teste de médias, conforme demonstrado no (Quadro 2).

Quadro 2. Relação Q/M (mC kg⁻¹) das diferentes soluções em diferentes distâncias do alvo

Condutividade Elétrica (mS cm ⁻²)	Distância entre o bocal de pulverização e o alvo (m)					
	0	1	2	3	4	5
0,00	4,11 a	1,38 b	0,64 a	0,31 a	0,17 a	0,05 a
17,03	4,54 c	1,17 a	0,65 a	0,27 a	0,11 a	0,04 a
19,44	4,59 c	1,37 b	0,67 a	0,30 a	0,098 a	0,05 a
35,92	4,36 b	1,18 a	0,62 a	0,30 a	0,16 a	0,08 a
64,59	4,08 a	1,23 a	0,63 a	0,30 a	0,13 a	0,05 a

Médias seguidas por uma mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Verificou-se que a maior relação Q/M foi obtida na distância mais próxima do alvo, sendo que a solução com condutividade elétrica de 19,44 mS cm⁻², apresentou o maior valor de Q/M. Apesar de as soluções apresentarem valores de condutividade elétrica diferentes, os valores de Q/M foram muito próximos e não se observou uma relação linear quanto à condutividade elétrica da solução e a relação Q/M. Na menor distância em relação ao alvo, a relação Q/M aumentou até a solução com condutividade elétrica de 19,44 mS cm⁻². Já, ao se avaliar o efeito da condutividade elétrica à distância de um

metro, verificou-se que o maior valor de Q/M foi com a solução de condutividade elétrica de $0,00 \text{ mS cm}^{-2}$. A partir da distância de dois metros, as diferentes soluções não diferiram estatisticamente quanto ao parâmetro Q/M.

Ao se avaliar uma determinada solução nas diferentes distâncias de pulverização, independente da condutividade elétrica, o comportamento da curva de regressão foi semelhante (Figura 12). À medida que se distanciou do alvo, houve a tendência de redução da relação Q/M. Os modelos de regressão apresentaram bons ajustes para explicarem o comportamento das diferentes soluções em função da distância de pulverização (Quadro 3).

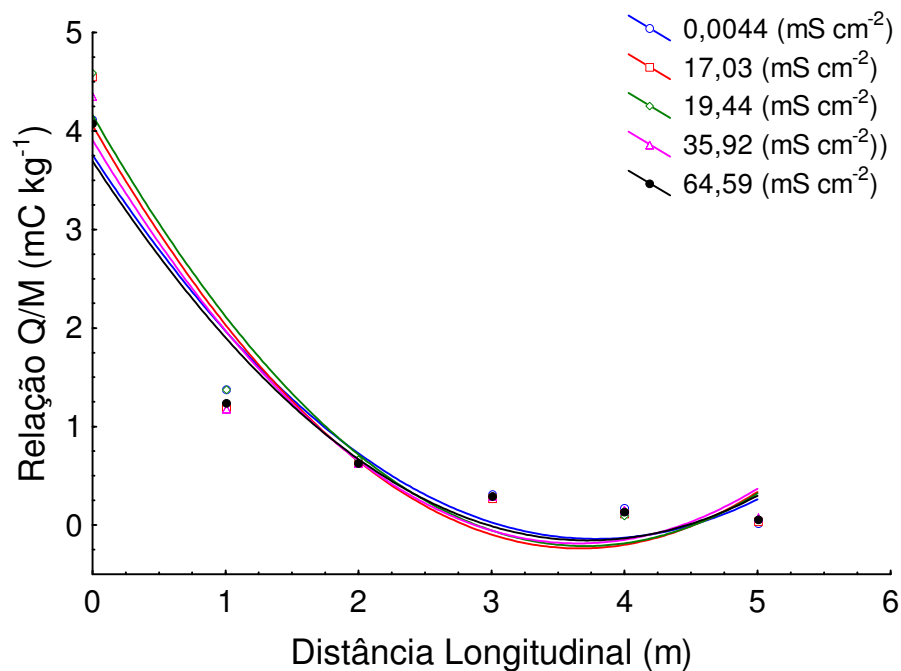


Figura 12. Relação Q/M em função da distância de pulverização e condutividade elétrica da solução.

Quadro 3. Equações de regressão ajustadas para a relação Q/M em função da distância de pulverização para diferentes condutividades elétricas

Condutividade elétrica da solução (mS cm ⁻²)	Equação ajustada	R ²
0,0044	$\hat{Y} = 3,7652 - 2,0718*x + 0,2757**x^2$	0,94
17,03	$\hat{Y} = 4,0615 - 2,3476*x + 0,3205*x^2$	0,91
19,44	$\hat{Y} = 4,1616 - 2,3616*x + 0,3188*x^2$	0,93
35,92	$\hat{Y} = 3,9042 - 2,236*x + 0,3056*x^2$	0,91
64,59	$\hat{Y} = 3,6979 - 2,0724*x + 0,2785*x^2$	0,92

**Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t de Student.

Na pulverização eletrostática, quanto maior a relação Q/M, maior sua eficiência, conseqüentemente, uma solução que possibilite aumentar os valores Q/M, auxiliará na pulverização eletrostática. No presente trabalho, apesar de algumas soluções aumentarem a relação Q/M, esta alteração foi pequena, podendo-se concluir que nem sempre aumentar a condutividade elétrica da solução resulta em maior Q/M, resultados opostos foram obtidos por Wilkerson e Gaultney (1989).

4.3. Avaliação do espectro de gotas

As condições de temperatura e umidade relativa durante os ensaios permaneceram entre 19 a 21 °C e 75 a 81%, respectivamente, com ausência de vento.

A avaliação do espectro de gotas foi possível somente até a distância de quatro metros, pois, ao se realizar a pulverização na distância de cinco metros, a quantidade de gotas que se passava pelo feixe de luz era ínfima, não possibilitando a leitura pelo analisador a laser.

Ao se avaliar estes parâmetros, comparando os sistemas de pulverização em uma determinada distância, verificou-se que o pulverizador com o sistema eletrostático ligado apresentou tendência de redução da amplitude relativa e aumento dos parâmetros $Dv_{0,1}$, $Dv_{0,5}$ e $Dv_{0,9}$ (Quadro 4).

Quadro 4. Média dos parâmetros da pulverização para as diferentes distâncias e sistema de pulverização

Parâmetros da pulverização	Sistema Eletrostático	Distância (m)			
		1	2	3	4
Dv _{0,1} (µm)	Ligado	19,25 a	23,5 a	21,5 a	34 a
	Desligado	12,5 b	14,5 b	18 a	27,25 b
Dv _{0,5} (µm)	Ligado	57,00a	66,50a	111,0a	92,00a
	Desligado	47,25b	62,75a	61,25b	95,25a
Dv _{0,9} (µm)	Ligado	169,78a	188,11a	239,36b	251,54b
	Desligado	170,91a	191,69a	192,83a	198,03a
Amp. Relativa (adm)	Ligado	2,66b	2,49b	1,97b	2,38a
	Desligado	3,36a	2,85a	2,88a	1,79b

Dentro de um parâmetro da pulverização, médias seguidas por de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Observou-se que o diâmetro das gotas aumentou com o sistema eletrostático. Resultados semelhantes foram obtidos por Laryea e No (2003). No entanto Zheng et al. (2002), relatam que a tensão do eletrodo altera a tensão superficial do líquido e as cargas presentes nas gotas diminuem a probabilidade de coalescência entre si, fazendo com que ocorra redução do diâmetro da gota.

Uma das possíveis causas do aumento dos parâmetros Dv_{0,1}, Dv_{0,5} e Dv_{0,9}, é que, ao realizar o carregamento das gotas, estas adquirem cargas elétricas de mesmo sinal, ocasionando a repulsão entre si, principalmente com as gotas de menor diâmetro. Ao haver a repulsão, estas desviam sua trajetória, no presente caso, do feixe de luz do analisador a laser.

A repulsão das gotas na pulverização eletrostática apresenta efeito positivo, pois possibilita a dispersão uniforme das mesmas e ampla aplicação, corroborando com os resultados de Celen et al. (2009). Outra possível causa, no aumento do diâmetro de gotas com o sistema eletrostático ligado, é que podem ocorrer interações entre a geometria do bico e do eletrodo, tensão aplicada e propriedades físicas e elétricas do líquido (LARYEA e NO, 2003).

Na avaliação do sistema de pulverização a diferentes distâncias, verificou-se que à medida que se afasta do alvo, aumentam-se os parâmetros $Dv_{0,1}$, $Dv_{0,5}$ e $Dv_{0,9}$. Com o sistema de pulverização eletrostático ligado, elevaram-se, consideravelmente, os valores dos parâmetro $Dv_{0,1}$, $Dv_{0,5}$, e $Dv_{0,9}$ e como são variáveis que determinam a amplitude relativa, concomitantemente, houve a tendência de redução deste índice (Figura 13).

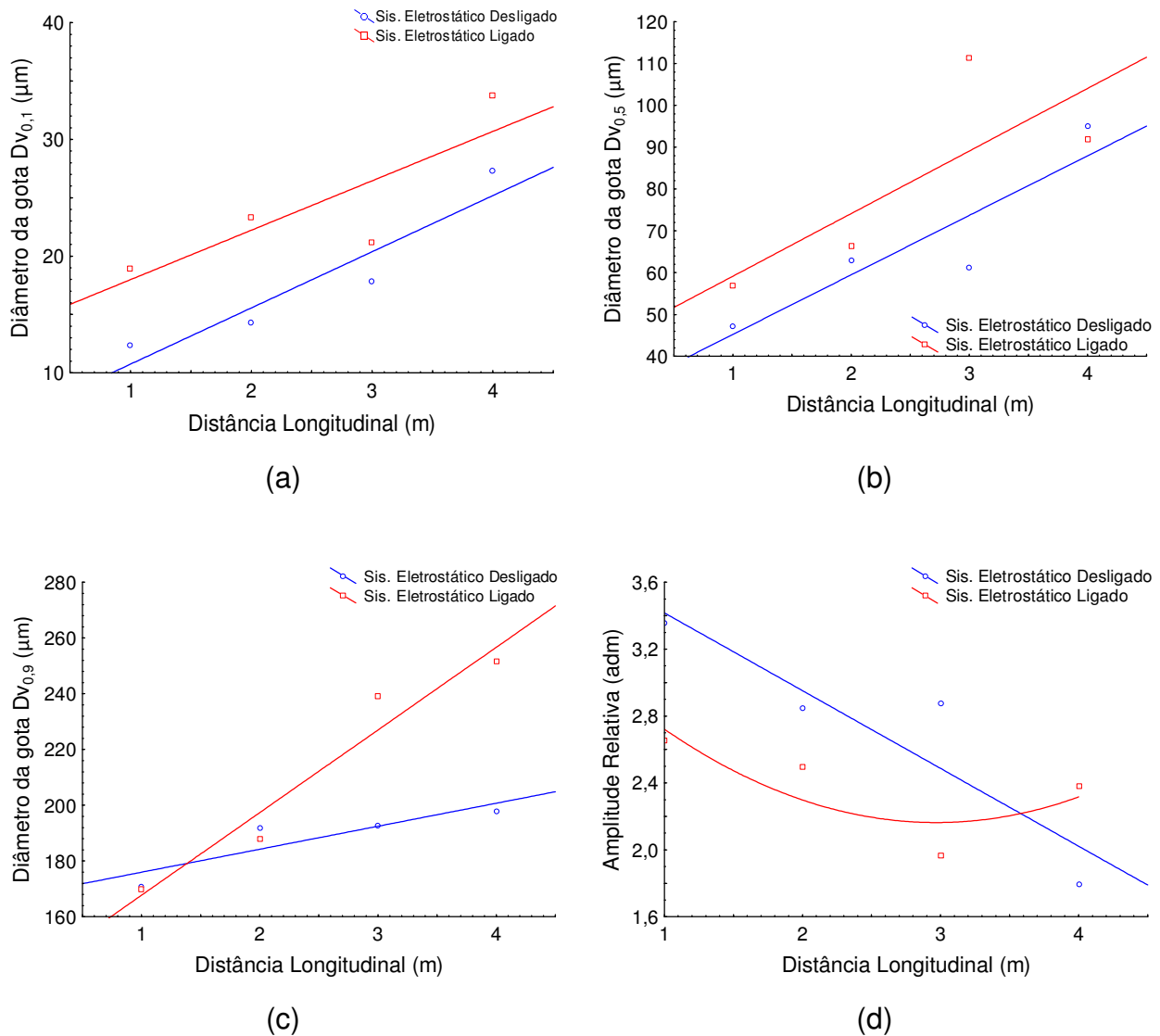


Figura 13. Comportamento dos parâmetros da pulverização em diferentes distâncias e sistemas de pulverização: (a) $Dv_{0,1}$; (b) $Dv_{0,5}$; (c) $Dv_{0,9}$ e (d) Índice Span.

A equação de regressão e os respectivos coeficientes de determinação, ajustados para os dados dos parâmetros da pulverização, em função da distância de pulverização ao alvo, explicaram bem o comportamento do espectro de gotas (Quadro 5).

Quadro 5. Equações de regressões ajustadas para os parâmetros da pulverização em função da distância do bocal de pulverização ao alvo para os diferentes sistemas de pulverização

Parâmetro da pulverização	Sistema de pulverização	Equação ajustada	R ²
Dv _{0,1}	Ligado	$\hat{Y} = 13,75 + 5,0927^{**}x$	0,96
	Desligado	$\hat{Y} = 5,93 + 4,8153^{**}x$	0,82
Dv _{0,5}	Ligado	$\hat{Y} = 44,21 + 14,96^{**}x$	0,58
	Desligado	$\hat{Y} = 31,023 + 14,23^{**}x$	0,76
Dv _{0,9}	Ligado	$\hat{Y} = 138,06 + 29,65^{**}x$	0,94
	Desligado	$\hat{Y} = 167,73 + 8,25^{**}x$	0,79
Amplitude Relativa	Ligado	$\hat{Y} = 3,43 - 0,85^{*}x + 0,144^{*}x^2$	0,67
	Desligado	$\hat{Y} = 3,88 - 0,46^{*}x$	0,83

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

*Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t de Student.

O aumento destes parâmetros (Dv_{0,1}, Dv_{0,5} e Dv_{0,9}) em função da distância de pulverização, provavelmente ocorreu devido a turbulência do ar do sistema pneumático do pulverizador. À medida que se afastou do alvo, as gotas menores tendem a desviarem suas trajetórias, e apesar de o ensaio ser realizado em condições de laboratório, as gotas podem sofrer a ação do ambiente, podendo acarretar a sua evaporação.

Observou-se que os diâmetros das gotas foram pequenos, independente do sistema e da distância de pulverização. Em uma pulverização, gotas de diâmetros reduzidos possuem as vantagens de aumentar as possibilidades de acerto do alvo e aumento da densidade de gotas depositadas no alvo. Em se tratando da pulverização eletrostática, gotas pequenas favorecem o carregamento das mesmas.

Durante a pulverização no campo, gotas de tamanho reduzido, em condições de baixa umidade relativa e altas temperaturas podem sofrer a evaporação (VILLALBA e HETZ, 2010). As gotas pequenas apresentam elevado risco de deriva, pois são mais propensas a se afastarem da zona de aplicação do que as gotas maiores (KIRK, 2007).

O percentual de gotas com diâmetro abaixo de 100 μm foi de 60 %, valor bastante elevado para as condições tropicais. Nestes casos há necessidade de maior controle das condições meteorológicas na pulverização eletrostática, pois estas gotas são facilmente arrastadas pelo vento ou evaporadas antes de alcançarem o alvo, concordando com os resultados obtidos por Cunha et al. (2004) que afirmam que gotas com diâmetro abaixo de 100 μm , favorecem a deriva.

Segundo Esehaghbeygi et al. (2010) por ser uma pulverização eletrostática, as forças elétricas também devem ser analisadas, pois podem auxiliar na redução da deriva. No entanto, Minguela e Cunha (2010) relatam que a avaliação da deriva na pulverização eletrostática deve ser realizada com muita cautela, uma vez que a atração elétrica somente ocorre quando a gota se aproxima do alvo, tendo em vista o isolamento provocado pelo ar.

4.4. Avaliação da velocidade do ar em diferentes distâncias do pulverizador

As condições ambientais durante a condução do ensaio foram monitoradas, e a temperatura variou entre 14 a 20 °C com umidade relativa entre 70 a 82 %, e ausência de vento.

Na aplicação de agrotóxicos, em culturas arbóreas ou arbustivas, quando realizada utilizando pulverizadores hidráulicos, a energia cinética da gota não é suficiente para transportar a gota até o interior do dossel, necessitando-se assim do auxílio de uma corrente de ar, geralmente, proveniente de ventiladores. A corrente de ar possui duas finalidades, fragmentação do líquido em gotas e transporte até o interior do dossel da planta.

No presente trabalho, verificou-se que à medida que se afasta, tanto no sentido horizontal como na transversal em relação ao bocal de pulverização, a velocidade do ar diminuiu (Figura 14).

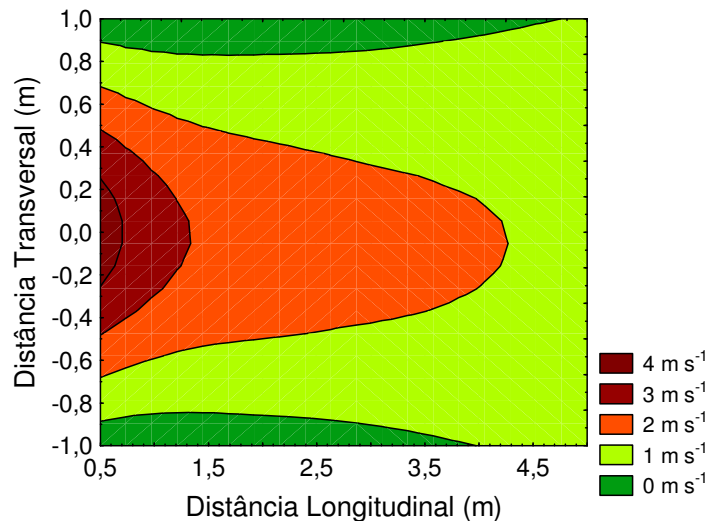


Figura 14. Velocidade do ar (m s^{-1}) em diferentes distâncias longitudinais e transversais.

O ar tem comportamento turbulento ao longo de sua trajetória. A velocidade do ar nas proximidades do bocal do pulverizador tende a ser mais elevada, e à medida que se afasta do pulverizador, este vai perdendo a velocidade, tornando desuniforme e espelhando-se durante a sua trajetória. Opiniões semelhantes foram expressadas por Fox et al. (2008).

Na pulverização pneumática e/ou hidropneumática, a velocidade do ar, na saída do ventilador e próximo da planta, é de grande importância. Se a velocidade do ar for pequena, não ocasiona ganhos expressivos na deposição no interior do dossel. Por outro lado, se a velocidade for excessiva, provoca maiores perdas por deriva devido ao produto químico atravessar a planta, sem que ocorra a deposição, ou então o produto não é distribuído uniformemente em todas as partes das plantas (DI PRINZIO et al., 2010).

4.5. Avaliação do efeito da distância do bocal de pulverização ao alvo artificial na eficiência de deposição de líquido

4.5.1. Ensaios preliminares na avaliação do efeito da distância do bocal de pulverização ao alvo artificial na eficiência de deposição de líquido

Observou-se que devido ao diâmetro da mediana volumétrica reduzido e a elevada densidade de gotas, as etiquetas hidrossensíveis foram consideradas inadequadas para se estudar o comportamento do espectro produzido pelo pulverizador eletrostático (Figura 15), corroborando os resultados obtidos por Salyani e Fox (1994).

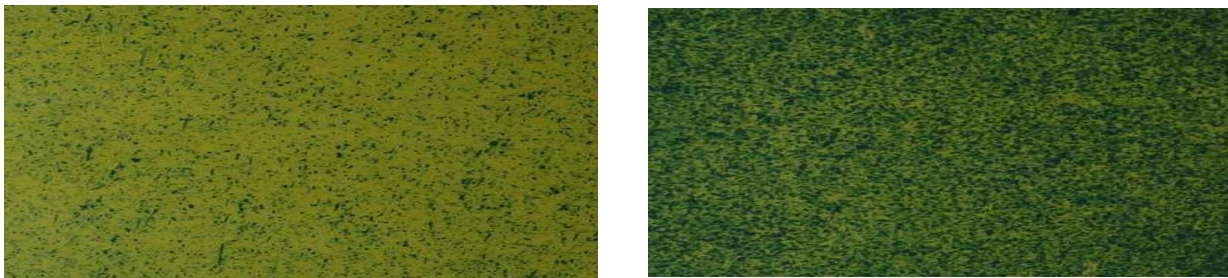


Figura 15. Etiquetas hidrossensíveis.

Na avaliação da deposição com a adição de corante na calda, verificou-se que não houve aumento de deposição utilizando a pulverização eletrostática. Uma das possíveis causas pode ser atribuída à utilização de plantas artificiais feitas com materiais de condutividade elétrica diferente, interferindo nos resultados. Sendo assim, estes ensaios não possibilitaram a averiguação da influência entre a distância do bico de pulverização ao alvo.

4.5.2. Ensaio realizado para a determinação do efeito da distância do bocal de pulverização ao alvo artificial na eficiência de deposição de líquido

As condições de temperatura variaram entre 15 a 19 °C e umidade relativa entre 76 a 83%, com ausência de vento. A curva de calibração padrão apresentou alta correlação entre a concentração do corante e absorbância (Figura 16).

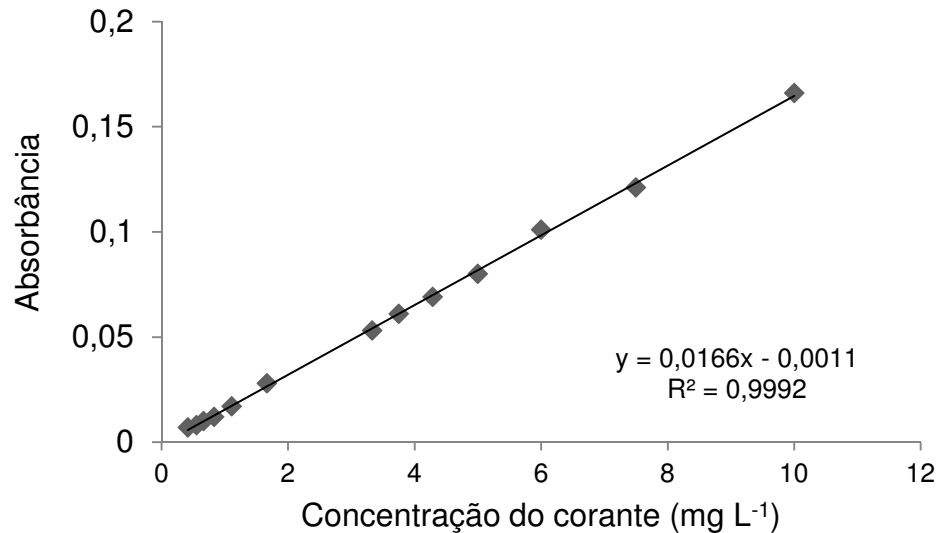


Figura 16. Calibração da solução padrão.

Na avaliação da distância de pulverização em relação ao alvo, procedeu ao desdobramento das interações entre os fatores. No desdobramento do sistema de pulverização (Ligado/Desligado), dentro de cada nível de distância transversal e longitudinal, aplicou-se o teste de média para verificar o efeito da pulverização eletrostática. Verificou-se que quando o alvo foi posicionado na transversal, o efeito do sistema eletrostático foi menos proeminente, comparado ao alvo na longitudinal.

Com o alvo na transversal, apesar de que na maioria dos casos ter aumentado a deposição com o sistema eletrostático ligado, com exceção da distância longitudinal de um metro, estes aumentos não diferiram estatisticamente (Quadro 6).

Quadro 6. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes distâncias transversais e longitudinais com o alvo no sentido transversal ao jorro de pulverização

Distância transversal (m)	Sistema Eletrostático	Distância Longitudinal				
		1	2	3	4	5
0	Ligado	4,49 b	1,57 a	0,45 a	0,21 a	0,2 a
	Desligado	5,06 a	1,28 a	0,42 a	0,13 a	0,1 a
0,15	Ligado	0,60 a	0,79 a	0,48 a	0,23 a	0,24 a
	Desligado	0,34 a	0,69 a	0,49 a	0,25 a	0,26 a
0,30	Ligado	0,27 a	0,23 a	0,34 a	0,28 a	0,23 a
	Desligado	0,21 a	0,47 a	0,30 a	0,25 a	0,19 a
0,45	Ligado	0,31 a	0,36 a	0,39 a	0,35 a	0,32 a
	Desligado	0,27 a	0,30 a	0,33 a	0,32 a	0,28 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna dentro de cada distância transversal, não diferem entre si, pelo teste F a 5 % de probabilidade.

A posição do alvo em relação ao jato de pulverização afeta a deposição em uma pulverização. Marchi et al. (2005b) verificaram que o ângulo da folha de *Eichhornia crassipes* afetou a deposição da calda. Maski e Duraijaj (2010) verificaram que o sentido de orientação do alvo em relação à pulverização, afetou a pulverização eletrostática, corroborando com o presente estudo.

Em uma pulverização, dependendo do ângulo do alvo e da distância do bocal pneumático, ocorre o impacto direto da gota ou então a força pneumática é maior que a força elétrica, fazendo com que a pulverização eletrostática não surta efeitos positivos. No presente estudo, utilizando o alvo posicionado na transversal, não houve aumento na deposição, razão pelo qual procederam-se as análises considerando somente o alvo no sentido longitudinal.

Com o alvo posicionado longitudinalmente em relação ao jorro de pulverização, verificou-se que o sistema de pulverização eletrostática aumentou a deposição até a distância de dois metros, independente da distância transversal, sendo que a partir deste ponto praticamente não houve ganho significativos de deposição com o sistema de pulverização eletrostática (Quadro 7).

Quadro 7. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes distâncias transversais e longitudinais com o alvo no sentido longitudinal ao jorro de pulverização

Distância Transversal (m)	Sistema eletrostático	Distância Longitudinal (m)				
		1	2	3	4	5
0	Ligado	0,91 a	0,25 a	0,17 a	0,10 a	0,13 a
	Desligado	0,42 b	0,11 b	0,12 a	0,09 a	0,09 a
0,15	Ligado	0,77 a	0,47 a	0,26 a	0,20 a	0,18 a
	Desligado	0,42 b	0,44 a	0,25 a	0,26 a	0,24 a
0,30	Ligado	0,41 a	0,44 a	0,28 a	0,22 a	0,20 a
	Desligado	0,23 b	0,29 b	0,25 a	0,20 a	0,25 a
0,45	Ligado	0,36 a	0,40 a	0,36 a	0,28 a	0,27 a
	Desligado	0,26 b	0,29 b	0,27 a	0,24 a	0,23 a

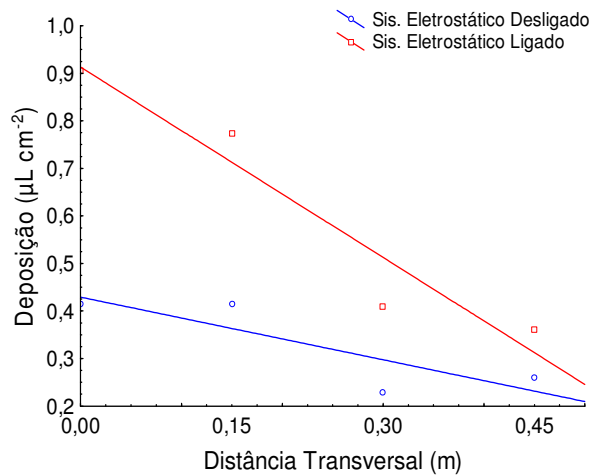
Médias seguidas de mesma letra na coluna dentro de cada distância transversal, não diferem entre si pelo teste F a 5 % de probabilidade.

A redução da eficiência do sistema eletrostático pode ser atribuída de acordo com o item 3.1, o qual se verificou que, para as distâncias de dois e três metros, a relação Q/M foi de 0,6 e 0,3 mC kg⁻¹, respectivamente. Existe grande divergência quanto aos valores mínimos de Q/M para acarretar ganhos significativos na deposição de agrotóxicos. No presente trabalho, a relação Q/M mínima que proporcionou aumento de deposição no alvo foi de 0,6 mC kg⁻¹, valores bem próximos aos citados por Carlton et al. (1995), que obtiveram uma relação mínima de 0,8 mC Kg⁻¹. No entanto Laryea e No (2005), obtiveram maior deposição trabalhando com relação Q/M de 0,28 mC kg⁻¹.

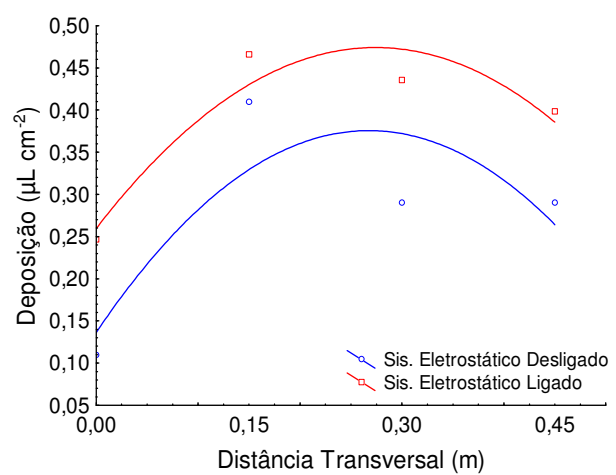
Em uma pulverização, quando se utiliza o princípio hidráulico na fragmentação de gotas, a distância entre a ponta de pulverização e o alvo, comumente empregado, é de 0,5 metros, devido à uniformidade de distribuição de líquido e a faixa de deposição. Já quando se utiliza do princípio pneumático convencional, a faixa útil de aplicação é variável de acordo com o tratamento a ser realizado, e de forma geral, possui uma ampla faixa de aplicação. No entanto, ao se combinar o sistema pneumático com o eletrostático, para se determinar a faixa útil de pulverização, deve-se levar em consideração, além do tratamento a ser realizado, a distância em que o sistema eletrostático será mais eficiente.

Ao se avaliar o comportamento dos sistemas de pulverização nas distâncias transversais para uma determinada distância longitudinal, verificou-se, que à medida

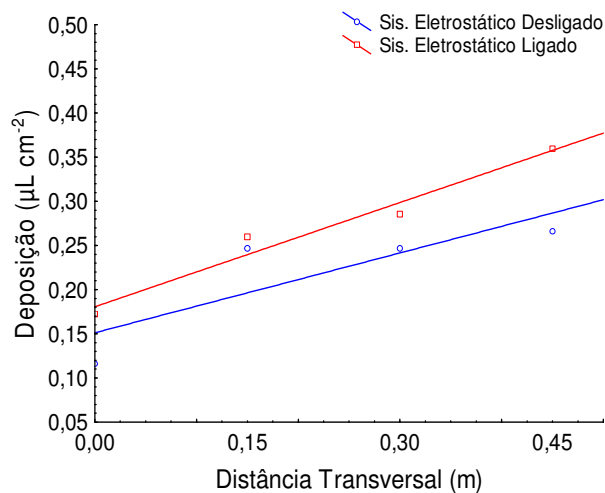
que se aumentou as distâncias longitudinais, menores foram os efeitos da pulverização eletrostática. Ao se considerar a distância longitudinal de um metro, com o aumento da distância transversal, a deposição de calda no alvo diminuiu, independente do sistema de pulverização. Já, a partir da distância de dois metros, o comportamento foi inverso. Conforme se aumentou a distância transversal, houve a tendência de aumentar a deposição de calda (Figura 17). No Quadro 8, estão demonstradas as equações de regressões ajustadas.



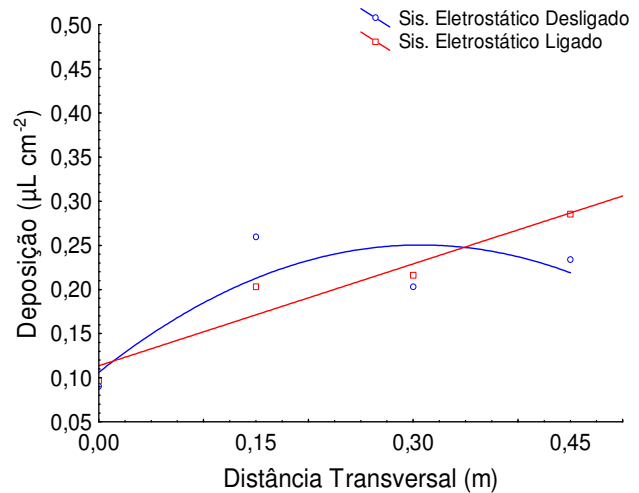
DL = 1 m



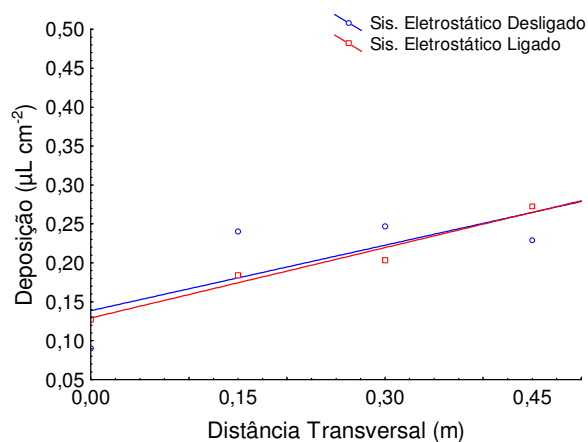
DL = 2 m



DL = 3 m



DL = 4 m



DL = 5 m

Figura 17. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em função da distância transversal para diferentes distâncias longitudinais (DL).

Quadro 8. Equações de regressões ajustadas para a deposição de líquido em função da distância transversal para cada distância longitudinal e sistema de pulverização

Dist. Longitudinal (m)	Sis. Eletrostático	Equação Ajustada	R ²
1	Ligado	$\hat{Y} = 0,913 - 1,3345^{**}X$	0,92
	Desligado	$\hat{Y} = 0,4292 - 0,4393^{**}X$	0,71
2	Ligado	$\hat{Y} = 0,2595 + 1,5667^{**}x - 2,8587^{**}x^2$	0,89
	Desligado	$\hat{Y} = 0,1362 + 1,7905^{**}x - 3,3467^{**}x^2$	0,69
3	Ligado	$\hat{Y} = 0,1807 + 0,3932^{**}x$	0,96
	Desligado	$\hat{Y} = 0,1512 + 0,3012^{**}x$	0,70
4	Ligado	$\hat{Y} = 0,1136 + 0,3849^{**}x$	0,91
	Desligado	$\hat{Y} = 0,106 + 0,9413^{**}x - 1,534^{**}x^2$	0,71
5	Ligado	$\hat{Y} = 0,1293 + 0,3012^{**}x$	0,96
	Desligado	$\hat{Y} = 0,1387 + 0,2803^{**}x$	0,53

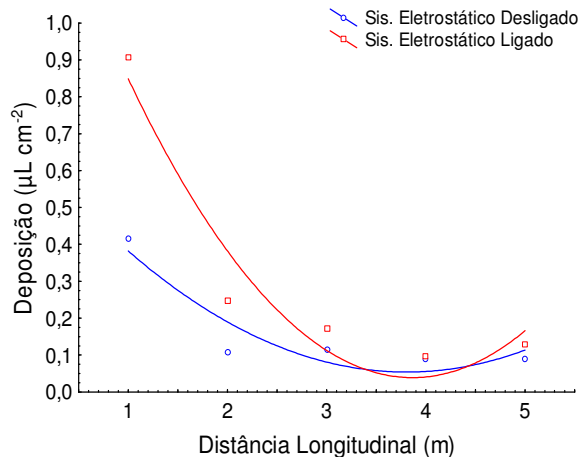
**Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t de Student.

*Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t de Student.

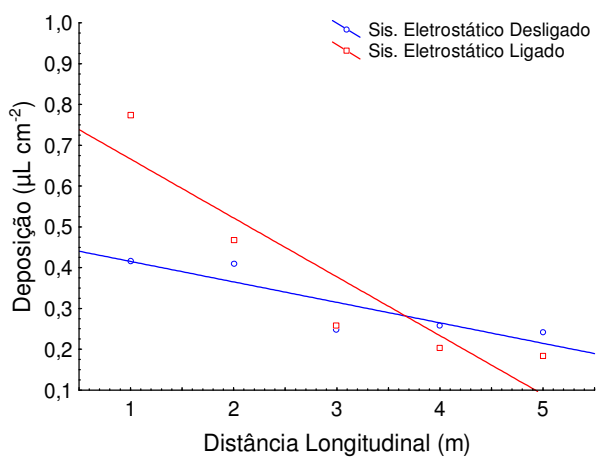
Nos pulverizadores pneumáticos, o fluxo de ar tem a característica de ser turbulento, e à medida que se afasta do pulverizador, tanto no sentido longitudinal, quanto no sentido transversal, a velocidade do ar diminui e ocorre um maior espalhamento, tornando-o desuniforme. Este maior espalhamento do ar, explica o comportamento entre as diferentes distâncias longitudinais.

Ao se realizar o desdobramento da distância longitudinal para cada distância transversal e sistemas de pulverizações, o sistema eletrostático proporcionou menores efeitos no aumento da deposição, conforme se aumentou a distância longitudinal.

Na distância transversal igual a zero, houve a tendência de o sistema eletrostático ligado aumentar a deposição até, aproximadamente, três metros no sentido longitudinal comparado com o sistema eletrostático desligado. Com o aumento da distância transversal, aumentaram-se as tendências de deposição no sentido longitudinal com o sistema eletrostático ligado (Figura 18). Na Figura 18 (DT = 0,30 m), a curva correspondente ao sistema desligado foi representada a título de demonstração, pois o teste de regressão não foi significativo, demonstrando não haver relação entre a distância e o sistema desligado. O mesmo ocorreu em (DT = 0,45 m) para ambos os sistemas de pulverização.



DT = 0 m



DT = 0,15 m

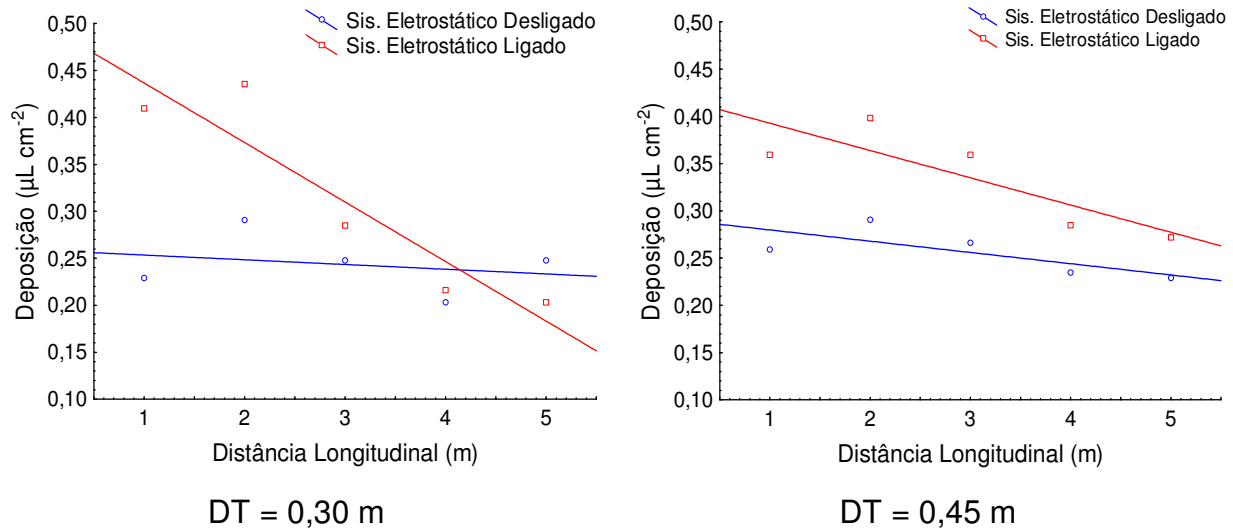


Figura 18. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em função da distância longitudinal para diferentes distâncias transversais (DT).

No Quadro 9, estão demonstradas as equações de regressões ajustadas.

Quadro 9. Equações de regressões ajustadas para a deposição de líquido em função da distância longitudinal para cada distância transversal e sistema de pulverização

Dist. Transversal (m)	Sis. Eletrostático	Equação Ajustada	R ²
0	Ligado	$\hat{Y} = 1,5123 - 0,7623 **x + 0,0986 **x^2$	0,94
	Desligado	$\hat{Y} = 0,6576 - 0,3173**x + 0,0417 **x^2$	0,87
0,15	Ligado	$\hat{Y} = 0,8107 - 0,1443**x$	0,84
	Desligado	$\hat{Y} = 0,4656 - 0,0502**x$	0,77
0,30	Ligado	$\hat{Y} = 0,5001 - 0,0634**x$	0,86
	Desligado	ns	
0,45	Ligado	ns	
	Desligado	ns	

Ns = Correlação não significativa.

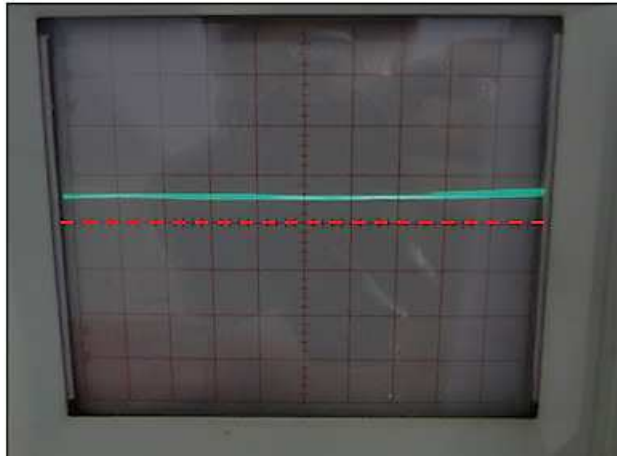
**Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t.

Ao aumentar a distância transversal, houve a tendência de o sistema eletrostático proporcionar maior eficiência ao longo das distâncias longitudinais. Este resultado pode ser atribuído pelo fato de que, na distância transversal zero, a força pneumática é maior do que nas demais distâncias, podendo diminuir a eficiência do sistema eletrostático.

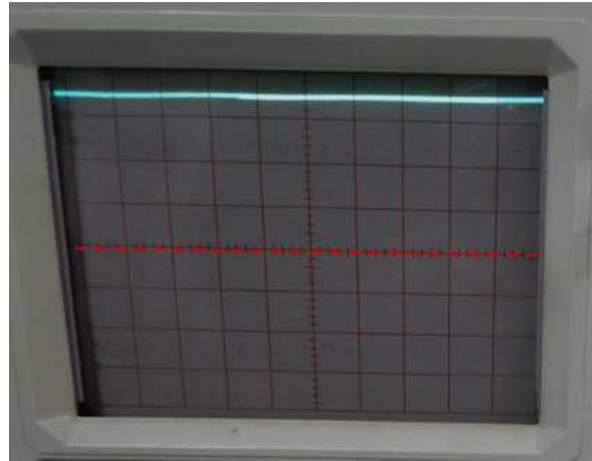
Atualmente, devido às questões ambientais e econômicas, tem se procurado reduzir as perdas em uma pulverização, sendo que, a pulverização eletrostática, se aplicada adequadamente, pode ser uma alternativa para reduzir tais perdas. No Brasil, a pulverização eletrostática é uma técnica pouco empregada por parte dos agricultores. Diversos pesquisadores têm demonstrado que quando empregados de maneira correta, o uso desta tecnologia pode trazer benefícios na aplicação de agrotóxicos.

4.6. Desenvolvimento de um sistema de atração de gotas

Antes de iniciar a leitura de tensão no osciloscópio, posicionou-se a escala de tensão em um volt por divisão. O sinal emitido do pulverizador possibilitou a leitura no osciloscópio de 0,6 volts. Aplicando-se o fator multiplicador da ponta de prova (x1000), a tensão real é de 600 volts positivos em relação a terra (Figura 19a). Na leitura do sinal elétrico emitido pela fonte de alta tensão utilizada para eletrizar o alvo, colocou-se no osciloscópio na escala de tensão de dois volts por divisão, e apresentou leituras de aproximadamente 7 volts, aplicando-se o fator multiplicador, 7 kV (Figura 19b). Esses valores de tensão foram comprovados no multímetro.



(a)



(b)

Figura 19. (a) Sinal elétrico emitido pelo pulverizador; (b) Sinal elétrico emitido pela fonte utilizada para eletrizar o alvo.

O presente pulverizador utiliza o processo de eletrificação de gotas por indução indireta. Neste caso as gotas adquirem cargas opostas ao eletrodo de indução. Como a tensão aplicada ao eletrodo foi positiva, as gotas saem com cargas negativas (CHAIM, 2006; ESS, 2010; MAYNAGH et al., 2009).

4.7. Avaliação do sistema de atração de gotas

As condições de temperatura variaram entre 15 a 19 °C e a umidade relativa entre 76 a 83%, com ausência de vento. Ao se avaliar o efeito do sistema de atração de gotas, ligado e desligado, observou-se que, quando o alvo foi posicionado no sentido longitudinal ao jorro de pulverização, o sistema foi mais eficiente quando comparado ao transversal.

No desdobramento do sistema de atração de gotas para cada nível da distância longitudinal e transversal, ao se avaliar o alvo na transversal, verificou-se que com o sistema de atração ligado, não se diferenciou do sistema desligado, exceto na distância de 1 metro, onde a deposição foi maior com o sistema ligado (Quadro 10).

Quadro 10. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes distâncias transversais e longitudinais com o alvo no sentido transversal ao jorro de pulverização

Distância Transversal (m)	Sis. de atração	Distância Longitudinal (m)				
		1	2	3	4	5
0	Ligado	5,64 a	1,33 a	0,67 a	0,39 a	0,32 a
	Desligado	4,49 b	1,57 a	0,45 a	0,21 a	0,20 a
0,15	Ligado	0,74 a	0,78 a	0,50 a	0,25 a	0,23 a
	Desligado	0,60 a	0,79 a	0,48 a	0,23 a	0,24 a
0,30	Ligado	0,47 a	0,47 a	0,39 a	0,26 a	0,18 a
	Desligado	0,27 a	0,47 a	0,34 a	0,28 a	0,23 a
0,45	Ligado	0,34 a	0,37 a	0,38 a	0,34 a	0,35 a
	Desligado	0,31 a	0,36 a	0,39 a	0,35 a	0,32 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna dentro de cada distância transversal, não diferem entre si, pelo teste F a 5 % de probabilidade.

Com o alvo no sentido transversal ao jorro de pulverização, ocorre o impacto direto entre a gota e o alvo, fazendo com que o sistema de atração de gotas não proporcionasse aumento na deposição. Ao se realizar a mesma avaliação, porém com o alvo no sentido longitudinal, o sistema de atração ligado acarretou o aumento da deposição.

Para a distância transversal zero, o sistema de atração apresentou resultados satisfatórios. À medida que se aumentou a distância transversal, juntamente com a distância longitudinal, houve a tendência de redução da eficiência do sistema, exceto para a distância de um metro (Quadro 11).

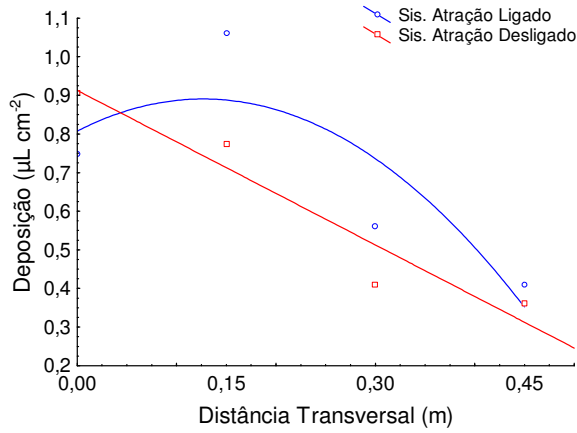
Quadro 11. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes distâncias transversais e longitudinais com o alvo no sentido longitudinal ao jorro de pulverização

Distância Transversal (m)	Sis. de atração	Distância Longitudinal (m)				
		1	2	3	4	5
0	Ligado	0,75 b	0,43 a	0,36 a	0,28 a	0,27 a
	Desligado	0,91 a	0,25 b	0,17 b	0,10 b	0,13 b
0,15	Ligado	1,06 a	0,63 a	0,29 a	0,22 a	0,23 a
	Desligado	0,77 b	0,47 b	0,26 a	0,20 a	0,18 a
0,30	Ligado	0,56 a	0,52 a	0,30 a	0,26 a	0,18 a
	Desligado	0,41 b	0,44 a	0,28 a	0,22 a	0,20 a
0,45	Ligado	0,41 a	0,42 a	0,37 a	0,30 a	0,28 a
	Desligado	0,36 a	0,40 a	0,36 a	0,28 a	0,27 a

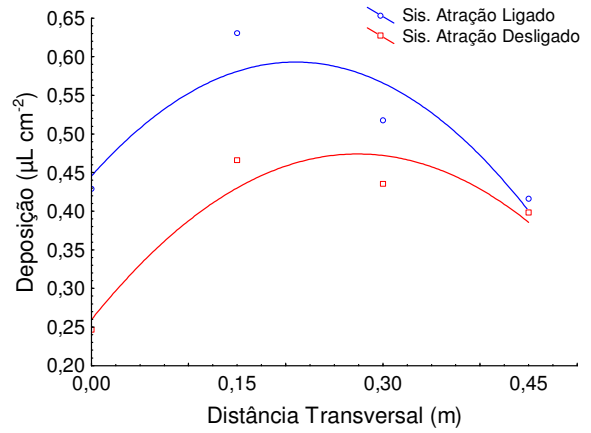
Médias seguidas de mesma letra na coluna dentro de cada distância transversal, não diferem entre si, pelo teste F a 5 % de probabilidade.

O sistema de atração de gotas demonstrou-se resultados satisfatórios. Na pulverização agrícola, uma nova tecnologia que possibilite aumentar a deposição de agrotóxicos no alvo e a homogeneidade de distribuição de calda é de grande relevância, pois reduz as possibilidades de perdas para o meio ambiente, maior eficácia de controle e redução do custo de produção. Opinião semelhante foi expressa por Miranda (2009).

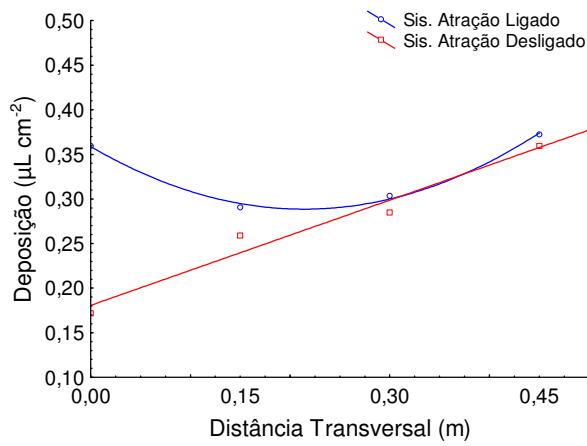
Ao se desdobrar a distância transversal, com o sistema de atração ligado e desligado, para as diferentes distâncias longitudinais, verificou-se que, nas distâncias longitudinais de um e dois metros, o sistema de atração foi eficiente até a distância de 0,45 metros na transversal. À medida que se aumentou a distância longitudinal, a eficiência ao longo da distância transversal foi reduzida (Figura 20).



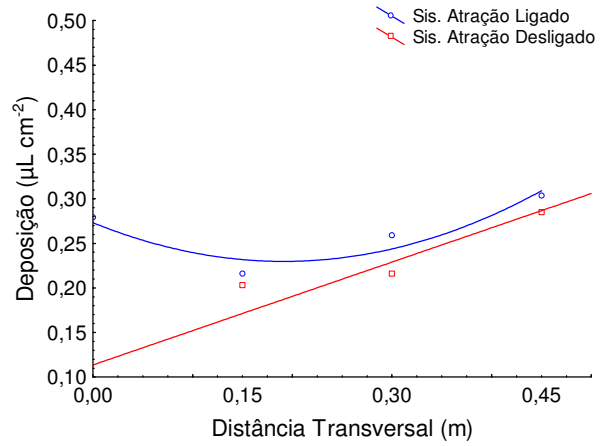
DL = 1 m



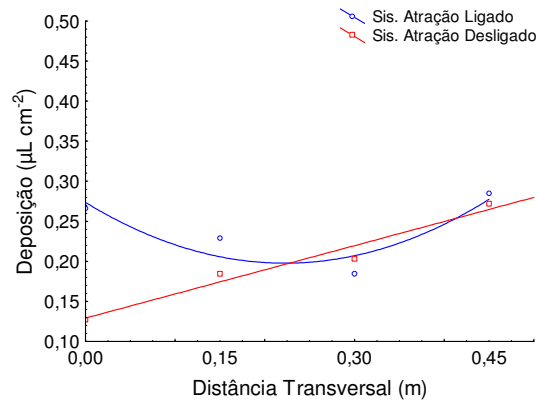
DL = 2 m



DL = 3 m



DL = 4 m



DL = 5 m

Figura 20. Deposição de líquido em função da distância transversal para diferentes distâncias longitudinais (DL).

No Quadro 12, estão demonstradas as equações de regressões ajustadas.

Quadro 12. Equações de regressões ajustadas para a deposição de líquido em função da distância transversal para cada distância longitudinal e sistema de pulverização

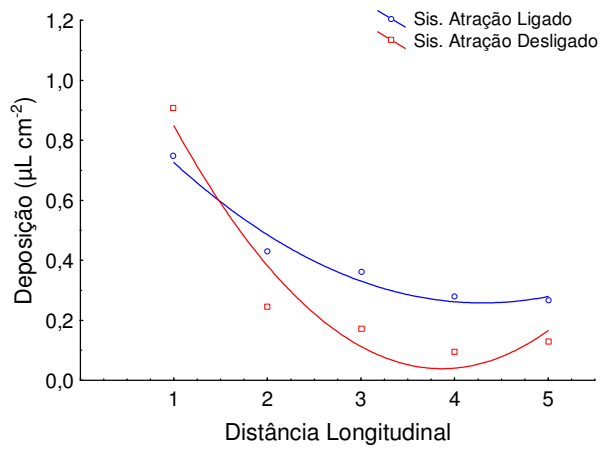
Dist. Longitudinal (m)	Sis. de atração	Equação Ajustada	R ²
1	Ligado	$\hat{Y} = 0,8076 + 1,3094^{**}x - 5,1595^{**}x^2$	0,71
	Desligado	$\hat{Y} = 0,913 - 1,3345^{**}x$	0,92
2	Ligado	$\hat{Y} = 0,4455 + 1,4056^{**}x - 3,3467^{**}x^2$	0,82
	Desligado	$\hat{Y} = 0,2595 + 1,5667^{**}x - 2,8587^{**}x^2$	0,89
3	Ligado	$\hat{Y} = 0,3589 - 0,6568^*x + 1,5339^*x^2$	0,98
	Desligado	$\hat{Y} = 0,1807 + 0,3932^{**}x$	0,93
4	Ligado	$\hat{Y} = 0,273 - 0,4539^*x + 1,1853 x^2$	0,86
	Desligado	$\hat{Y} = 0,1136 + 0,3849^{**}x$	0,91
5	Ligado	$\hat{Y} = 0,2736 - 0,6819^*x + 1,5339^*x^2$	0,81
	Desligado	$\hat{Y} = 0,1293 + 0,3012^*x$	0,96

**Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t de Student.

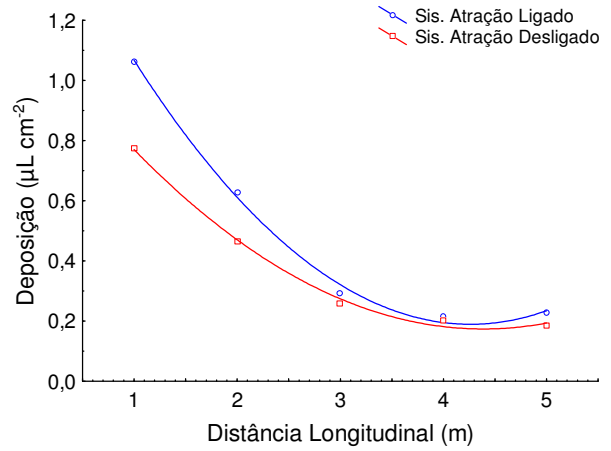
*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t de Student.

A perda de eficiência do sistema de atração de gotas pode ter ocorrido devido ao maior percurso desenvolvido pela gota. Esta tende a perder carga para o ar, e de acordo com a lei de Coulomb, a força entre duas cargas elétricas é diretamente proporcional ao produto dos valores (módulo) das duas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles (SILVA, 2011). Com a redução da carga presente na gota, a força de atração é reduzida. Nas distâncias longitudinais de um e dois metros, a carga presente na gota é elevada quando comparada às demais distâncias, possibilitando uma maior atração nas distâncias transversais.

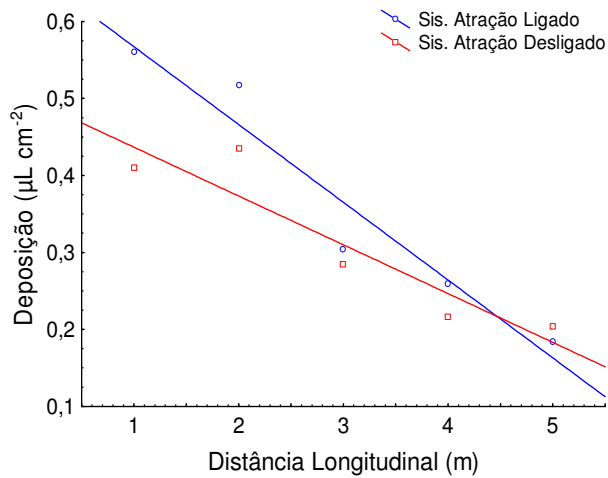
No desdobramento da distância longitudinal dentro de cada distância transversal, verificou-se que, com exceção da distância transversal zero, houve a tendência do sistema de atração de gotas apresentarem maior eficiência até a distância de quatro metros na longitudinal (Figura 21).



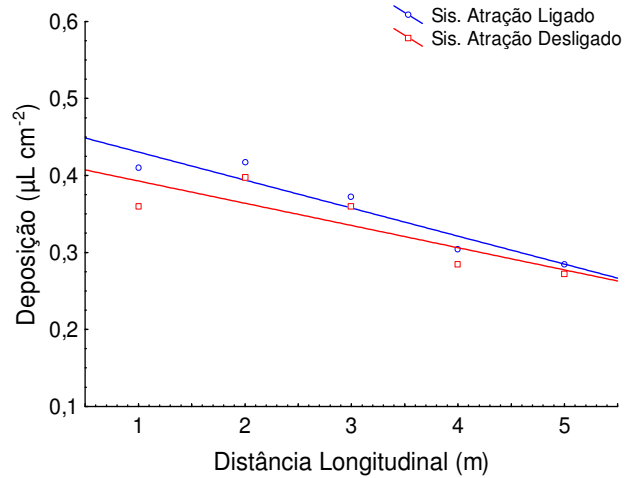
DT = 0 m



DT = 0,15 m



DT = 0,30 m



DT = 0,45 m

Figura 21. Deposição de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em função da distância longitudinal para diferentes distâncias transversais (DT).

No Quadro 13, estão demonstradas as equações de regressões ajustadas.

Quadro 13. Equações de regressões ajustadas para a deposição de líquido em função da distância transversal para cada distância longitudinal e sistema de pulverização

Dist. Transversal (m)	Sis. de atração	Equação Ajustada	R ²
0	Ligado	$\hat{Y} = 1,053 - 0,3699^{**}x + 0,04303^{**}x^2$	0,97
	Desligado	$\hat{Y} = 1,512 - 0,7323^{**}x + 0,09860^{**}x^2$	0,94
0,15	Ligado	$\hat{Y} = 1,688 - 0,7032^{**}x + 0,08247^{**}x^2$	0,99
	Desligado	$\hat{Y} = 1,1747 - 0,4563^{**}x + 0,05199^{**}x^2$	0,99
0,30	Ligado	$\hat{Y} = 0,6683 - 0,1010^{**}x$	0,94
	Desligado	$\hat{Y} = 0,5001 - 0,06338^{**}x$	0,86
0,45	Ligado	$\hat{Y} = 0,4669 - 0,0364^{**}x$	0,90
	Desligado	$\hat{Y} = 0,4217 - 0,02887^{**}x$	0,71

**Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t de Student.

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

A ineficiência do sistema a partir da distância de quatro metros pode ser atribuída a relação Q/M a partir deste ponto. A relação Q/M nas distâncias longitudinais de quatro e cinco metros foi de 0,17 e 0,05 mC kg⁻¹, respectivamente. Como a relação foi reduzida, a força elétrica entre a gota e o alvo também diminuiu, conseqüentemente, reduzindo-se o campo elétrico, fazendo com que o sistema perdesse eficiência.

4.8. Avaliação da pulverização eletrostática e do sistema de atração de gotas utilizando alvos naturais

4.8.1. Monitoramento de tensão nas plantas

No monitoramento da tensão elétrica da planta, ocorreu a eletrificação da planta como um todo. Não houve interação significativa entre os fatores avaliados (altura; profundidade e pontos cardeais), e para os efeitos de altura e pontos cardeais isoladamente. Houve efeito significativo somente para o fator profundidade (Quadro 14).

Quadro 14. Média das tensões elétricas (V) em diferentes profundidades da planta

Profundidade	Média das tensões (V)
Externo	106,8 b
Mediano	119,88 ab
Interno	163 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5 % de probabilidade pelo teste Tukey.

No presente trabalho, houve a tendência das cargas se concentrarem mais na parte interna da planta. Este resultado pode ter ocorrido porque a tensão foi aplicada na base do caule, acarretando a dissipação de grande parte da energia para o solo. Uma parte espalha-se por toda a planta, e à medida que vai se difundindo, se depara com resistências elétricas até chegar aos ramos e folhas externas, fazendo com que mais energia se dissipasse durante este trajeto, reduzindo os valores de tensão.

A maior diferença de potencial na parte interna do dossel é de grande importância, pois faz com que ocorra maior atração da gota para o interior da copa.

Na pulverização em plantas arbóreas e/ou arbustivas, a parte mais problemática a ser atingida é a parte interna do dossel. Mesmo os pulverizadores com assistências de ar, como os hidropneumáticos e os pneumáticos, em alguns casos não possibilitam atingir esta parte do dossel, ou então, dependendo do porte das plantas, exige-se um alto volume de pulverização, ocasionando perdas para o meio ambiente. Sendo assim, um sistema que possibilita o aumento da deposição no interior destas plantas é de grande interesse.

4.8.2. Avaliação da deposição de líquido em plantas de café

As condições ambientais durante a condução do experimento permaneceram com velocidade do vento entre 0,1 a 0,7 m s⁻¹, umidade relativa acima de 60 %, e temperatura entre 26 a 29 °C. O teor de água do solo no local do experimento foi de 0,14 g g⁻¹.

Antes de se proceder às pulverizações, com a adição de corante à calda, fez-se a calibração para a solução padrão (Figura 22).

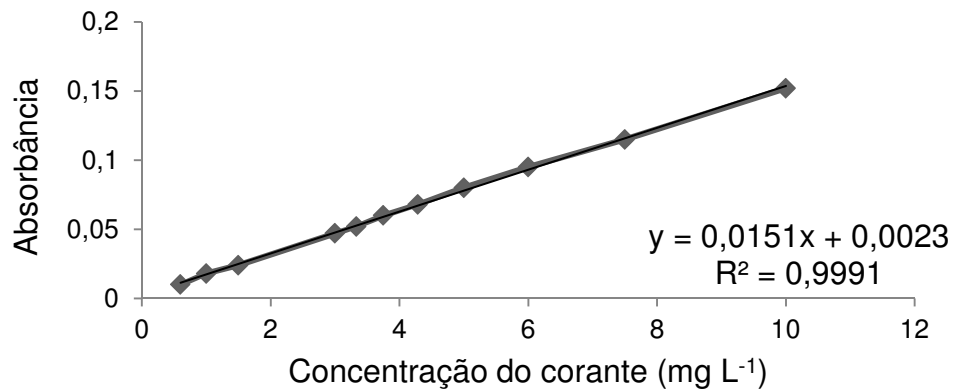


Figura 22. Calibração para a solução padrão

Na avaliação da deposição, houve, no presente ensaio interação somente entre o sistema de pulverização e a profundidade. Ao se considerar as diferentes profundidades, verificou-se que o sistema de atração de gotas foi eficiente. Ao se eletrificar o alvo, as maiores deposições ficaram na parte interna do dossel, enquanto que, com o sistema de pulverização eletrostático ligado, as maiores deposições ficaram na parte externa do dossel, (Quadro 15).

Quadro 15. Média das deposições de líquido ($\mu\text{L cm}^{-2}$) em diferentes sistemas de pulverização e profundidade da planta

Tratamentos		Profundidade					
Sistema	Eletrificação	Face Sul			Face Norte		
Eletrostático	do alvo	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Ligado	Ligado	0,72aAB	0,61abBC	0,83aA	0,45aC	0,47aC	0,59aBC
Ligado	Desligado	0,84aA	0,71aAB	0,62bB	0,42aC	0,41aC	0,57aBC
Desligado	Desligado	0,51bAB	0,50bAB	0,53bA	0,35aAB	0,32aB	0,38aAB

Médias seguidas por uma mesma letra maiúsculas na mesma linha não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na mesma coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Verificou-se que na parte interna do dossel (P3), ao se eletrificar a planta, houve aumento da deposição comparado aos demais tratamentos (Figura 23). Isto pode ser atribuído pelo fato de que as maiores tensões foram observadas na parte interna do dossel, fazendo com que a intensidade do campo elétrico entre a gota a esta profundidade aumentasse, e, conseqüentemente, ocorreu maiores deposições.

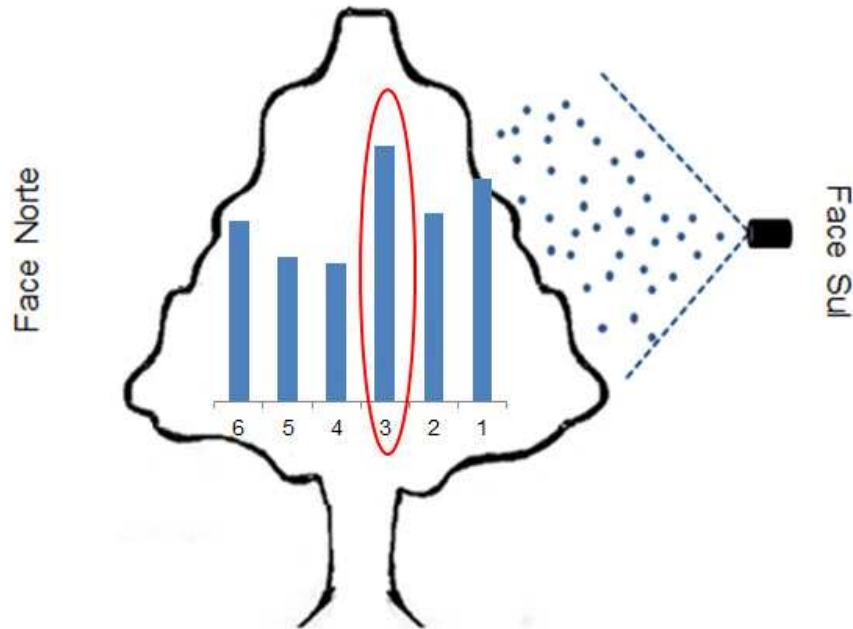


Figura 23. Uniformidade de distribuição de líquido com o sistema de atração de gotas.

Na pulverização em plantas arbóreas e/ou arbustivas, devido à arquitetura da planta e o efeito parede ocasionado pelas folhas, parte das gotas não atingem o interior do dossel das plantas, o que prejudica a uniformidade na distribuição de líquido. Esta desuniformidade proporciona baixa eficácia no controle de doenças, principalmente no caso de fungicidas que requerem cobertura uniforme de toda a planta (CUNHA, et al. 2006). O sistema de atração de gotas possibilitou maiores deposições na parte interna do dossel, sendo uma alternativa ao produtor, uma vez que, possibilita a redução de calda, menores perdas para o meio ambiente, a redução de custos de produção e maiores eficácias nos tratamentos.

Quando o sistema de eletrificação do alvo foi desligado, as maiores deposições foram obtidas na parte externa do dossel (P1) (Figura 24).

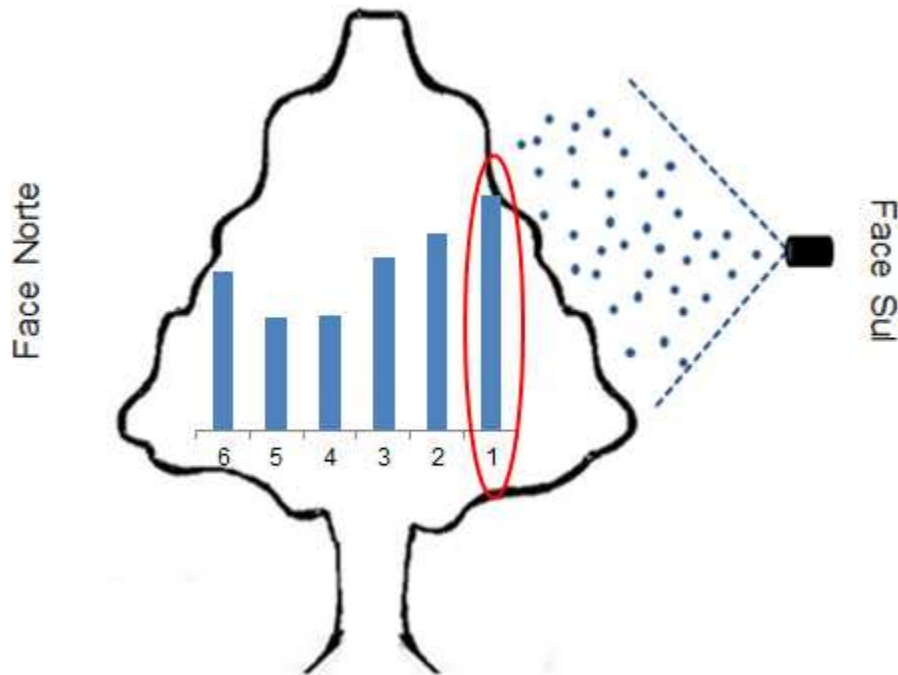


Figura 24. Uniformidade de distribuição de líquido com o sistema de atração desligado.

Isto pode ter ocorrido pelo fato de que, quando se tem um objeto eletrizado, este tende a se descarregar em um corpo aterrado o mais próximo possível, no presente caso, a parte externa do dossel. Almekinders et al. (1992), relatam que quando se trabalha com a pulverização eletrostática a capacidade de penetração da gota é reduzida.

Observou-se que as menores deposições foram quando o sistema eletrostático e atração permaneceram desligados. Estes resultados demonstram que ambos os sistemas melhoraram a pulverização, podendo ser uma alternativa a ser utilizada em campo.

5. CONCLUSÕES

A relação Q/M da gota foi afetada pela distância de pulverização. Próximo ao alvo à relação Q/M foi de $4,11 \text{ mC kg}^{-1}$, e nas distâncias de 1, 2, 3, 4 e 5 m, esta relação reduziu para 1,38; 0,64; 0,31; 0,17 e $0,005 \text{ mC kg}^{-1}$, respectivamente.

Nem sempre o aumento da condutividade elétrica da solução acarretou em aumento da relação Q/M.

A eficiência de deposição da gota utilizando a pulverização eletrostática foi influenciada pelas características e orientação do alvo pulverizado.

Houve a tendência de o sistema eletrostático proporcionar aumento de deposição em alvo artificial até a distância de três metros, no sentido longitudinal.

O sistema de atração de gotas foi eficiente e possibilitou o aumento de deposição em alvos artificiais em até 180 % em relação ao sistema eletrostático convencional.

Houve efeito da distância, tanto transversal como longitudinal, na eficiência do sistema de atração de gotas em alvo artificial.

Em campo, foi possível eletrizar a planta de café e as maiores tensões elétricas foram observadas na parte interna do dossel, com 163 volts decaindo para 119,9 e 106,8 volts, para as partes mediana e externa da copa da planta, respectivamente.

Em plantas de café a pulverização eletrostática proporcionou aumento de deposição de calda de 37,2 %, comparado ao sistema eletrostático desligado.

A eletrificação da planta proporcionou maior deposição de líquido na parte interna do dossel.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU –ALI, J.; BARRINGER, S. A. Optimization of liquid electrostatic coating. **Journal of Electrostatics**, Boston, v. 66, p. 184–189, março, 2008.

ALMEKINDERS, H.; OZKAN, H.E. ; REICHARD, D.L.; CARPENTER, T.G.; BRAZEE R.D. 1992. Spray Deposit patterns of an electrostatic atomizer. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 35, n. 5, p. 1361-1367, setembro – outubro, 1992.

BALSARI, P.; MARUCCO, P.; TAMAGNONE, M. A crop identification system (CIS) to optimize pesticide applications in orchards. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, Ashford, ISAFRUIT Special Issue, p. 113-116, 2009.

BATTE, M. T.; EHSANI, M. R. The economics of precision guidance with auto-boom control for farmer-owned agricultural sprayers. **Computers and electronics in agriculture**, Amsterdam, v. 53, p.28-44, Agosto, 2006.

BAYER, T.; COSTA, I. F. D.; LENZ, G.; ZEMOLIN, C.; MARQUES, L. N.; STEFANELO, M. S. Equipamentos de pulverização aérea e taxas de aplicação de fungicida na cultura do arroz irrigado. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, PB, v.15, n. 2, p.192–198, 2011.

CELEN, I. H.; DURGUT, M. R.; AVCI, G. G.; KILIC, E. Effect of air assistance on deposition distribution on spraying by tunnel-type electrostatic sprayer. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 4, n. 12, p. 1392-1397, Dezembro, 2009.

CARLTON, J. B.; BOUSE, L. F.; KIRK, I. W. Electrostatic charging of aerial spray over cotton. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.38, n.6, p. 1641-1645, 1995

CHAIM, A. **Pulverização eletrostática**: principais processos utilizados para eletrificação de gotas. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 18 p. (Documento 57).

CHAIM, A.; PESSOA, M. C. P. Y.; FERRACINI, V. L. Eficiência da deposição de agrotóxicos obtida com bocal eletrostático para pulverizador costal motorizado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 4, p.497-501, abril, 2002.

CHAIM, A.; LARANJEIRO, A. J.; CAPALBO, D. M. F. **Bico pneumático eletrostático para aplicação de inseticidas biológicos em floresta de eucalipto**. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1999. 33 p. (Boletim de Pesquisa, 3).

CHAIM, A. Aperfeiçoamento de bico de pulverização eletrostática para geração de gotas com alto nível de carga. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 4, p. 463-470, abril, 1998.

CHAIM, A. **Desenvolvimento de um pulverizador eletrohidrodinâmico: avaliação do seu comportamento na produção de gotas e controle de trips (*Enneothrips flavens* Moulton, 1951), em amendoim (*Arachis hypogaea* L.).** 1984. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, Jaboticabal, 1984.

CHAIM, A.; VALARINI, P. J.; OLIVEIRA, D. A.; MORSOLETO, R. V.; PIO, L. C. **Avaliação de perdas de pulverização em culturas de feijão e tomate.** Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1999. 29 p. (Boletim de Pesquisa, 2).

CHAO, F.; CHENGSHENG, Z.; FANYU, K.; CHA, W. J.; JING, W. Effects of Spray Height and Spray Angle on Spray Deposition in Tobacco Plants. In: Conference on Industrial Electronics and Applications, 6, 2011. Beijing - China. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011, p. 2390 – 2393.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira.** 2009. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso realizado em: 25 set. 2010.

COOKE, B. K., HISLOP, E. C. **Spray tracing techniques.** In: MATTHEWS, G. A., HISLOP, E. C. (Ed) Application technology for crop protection. Wallingford: CAB, 1993. p. 85-100.

CROSS, J. V.; WALKLATE, P. J.; MURRAY, R. A.; RICHARDSON. G. M. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 2. Effects of spray quality. **Crop Protection**, Oxford, v. 20, p.333-343, 2001.

CUNHA, J. P. A. R.; REIS, E. F.; SANTOS, R. O. Controle químico da ferrugem asiática da soja em função de ponta de pulverização e de volume de calda. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n. 5, p. 1360 – 1366, setembro-outubro, 2006.

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

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, outubro, 2004.

DAN, C.; FANG-XIU, W.; WEI-GUANG, R.; WEI-XIN, W. Evaluation of Different Sprayers in the Tea Plants. In: Conference on Industrial Electronics and Applications, 6, 2011. Beijing - China. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011, p. 2403 – 2407.

DERKSEN, R. C.; VITANZA, S.; WELTY, C.; MILLER, S.; BENNETT, M.; ZHU, H. Field evaluation of application variables and plant density for bell pepper pest management. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 50, n. 6, p. 1945-1953, 2007.

DI PRINZIO, A.; BEHMER, S.; MAGADALENA, J. C. Equipos pulverizadores terrestres. In:_____. **Tecnología de aplicación de agroquímicos**. Argentina: Área de comunicaciones del INTA Alto Valle, 2010. cap. 9, p. 107-120.

DORUCHOWSKI, G.; SWIECHOWSKI, R.; HOLOWNICKI, R.; GODYN, A. Environmentally-dependent application system (EDAS) for safer spray application in fruit growing. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, Ashford, Isafruit Special Issue, 107-112, 2009.

ESS - Electrostatic Spraying Systems (2010). **Romainian Survery on Electrostatic Pesticide Spraying**. Disponível em: <<http://www.dsp.pub.ro/leonardo/itc-incsee/Chapter%202/Level%201/SubChapter%202.4/SubChapter%202.4.htm>>. Acesso realizado em : 07 de Out. de 2011.

ETHERIDGE, R. E.; WOMAC, A. R.; MUELLER, T. C. Characterization of the spray droplet spectra and patterns of four venturi-type drift reduction nozzles. **Weed Technology**, v. 13, n. 4, p.765-70, 1999.

ESEHAGHBEYGI, A.; TADAYYON, A.; BESHARATI, S. Comparison of Electrostatic and Spinning-discs Spray Nozzles on Wheat Weeds Control. **Journal of American Science**, Nova York, v. 12, n. 6, 2010.

FERREIRA, M. C. **Tecnologia de Aplicação de Produtos Fitossanitários em cana-de-açúcar**. In: Atualização em produção de cana-de-açúcar, 2006, v. 1, p. 293-303.

FOX, R. D.; DERKSEN, R. C.; ZHU, H.; BRAZEE, R. D., SVENSSON, S. A. A history of air-blast sprayer development and future prospects. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 51, p. 405-410, 2008.

HENSLEY, J. L.; FENG, X.; BRYAN, J. E. Induction charging nozzle for flat fan sprays. **Journal of Electrostatics**, Boston, v. 66, p. 300-311, maio, 2008.

HISLOP, F. C. Electrostatic ground-rig spraying: an overview. **Weed Technology**, North Dakota, v. 2, p. 94-104, 1988.

JAHANNAMA, M. R.; WATKINS, A. P.; YULE, A. J. Electrostatic effects on agricultural air-atomized sprays and deposition. Part I: an experimental study. **Atomization and Sprays**, v. 15, p. 603 – 628, 2005.

KABASHIMA, J.; GILES, D. K.; PARRELLA, M. P. Electrostatic sprayers improve pesticide efficacy in greenhouses. **California Agriculture**, California, v. 49, p.31-35, 1995.

KACPRZYK, R.; LEWANDOWSKI, M. Post-dispersion electrification of droplets in a system with pneumatic atomization. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 301, 2011.

KANG, T. G.; LEE, D. H.; LEE, C. S.; KIM, S. H.; LEE, G. I.; CHOI, W. K.; NO, S. Y. Spray and depositional characteristics of electrostatic nozzles for orchard sprayers. *Transaction of the ASAE*, St. Joseph, Paper No. 041005, 2004.

KIRK, I. W.; HOFFMANN, W. C.; CARLTON, J. B. Aerial electrostatic spray system performance. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, p. 1089 – 1092, 2001.

KIRK, I. W. Measurement and prediction of atomization parameters from fixed-wing aircraft spray nozzles. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, p. 693–703, 2007.

KRAUSZ, J. P. La tecnología de fumigación electrostática se prueba en arroz. **AgAirUpdate Latinoamerica**, Perry, v.6, n.2, p. 14, 2003.

LARYEA, G. N.; NO, S. Y. Development of electrostatic pressure-swirl nozzle for agricultural applications. **Journal of Electrostatics**, Boston, v. 57, p. 129–142, 2003.

LARYEA, G. N.; NO, S. Y. Effect of fan speed and electrostatic charge on deposition of orchard canopy sprays. **Atomization and Sprays**, v.15, p. 133-144, 2005.

LAW, S. E. Electrostatic atomization and spraying, In ____ Chang, A.J.; Kelly, J.M. Crowley (Eds.), **Handbook of Electrostatic Processes**, Marcel Dekker, New York, 1995, p. 413–440.

LAW, S. D.; COOKE, J. R.; COOPER, S. C. Space Charge Suppression of Electrostatic-Induction Spray Charging. **Journal of Electrostatics**, Boston, v. 40-41, p. 603-608, 1997.

LEFEBVRE, A. H. **Atomization and sprays**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. 421 p.

MAGNO JÚNIOR, R. G. **Desenvolvimento de sistema eletrônico para pulverização e atração de gotas em plantas cítricas**. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado – Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

MARCHI, S. R.; MARTINS, D.; CONSTA, N. V.; TERRA, M. A.; NEGRISOLI, E. Degradação luminosa e retenção foliar dos corantes Azul Brillhante FDC-1 e Amarelo Tartrasina FDC-5 utilizados como traçadores em pulverizações. **Planta Daninha**, Viçosa - MG, v. 23, p. 287-294, 2005.

MARCHI, S. R.; MARTINS, D.; COSTA, N. V.; CARBONARI, C. A.; TERRA, M. A. Depósitos de calda de pulverização nas faces adaxial e abaxial de folhas de *Eichhornia crassipes* dispostas em diferentes ângulos. **Planta daninha**, Viçosa – MG, v. 23, p. 321-328, 2005b.

MASKI, D.; DURAIRAJ, D.; 2006. Abaxial deposition and biological efficacy of electrostatically charged spray. **Transaction of the ASABE**, St. Joseph, Paper number 061116, Julho, 2006.

MASKI, D.; DURAIRAJ, D. Effects of charging voltage, application speed, target height, and orientation upon charged spray deposition on leaf abaxial and adaxial surfaces. **Crop Protection**, Oxford, v.29, p.134-141, 2010.

MATTEWS, G. A. Electrostatic spraying of pesticide: a review. **Crop protection**, Oxford, v. 8, p. 3-15, 1989.

MAYNAGH, B. M.; GHOBADIAN, B.; JAHANNAMA, M. R.; HASHJIN, T. T. Effect of Electrostatic Induction Parameters on Droplets Charging for Agricultural Application. **Journal of Agricultural Science and Technology**, Tehran, v. 11, p.249-257, 2009.

MEWES, W. L. C.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C.; CECON, P. R.; ALVARENGA, C. B. Deposição de calda em eucalipto, utilizando pulverização pneumática. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, p. 283-288, 2011.

MINGUELA, J. V.; CUNHA, J. P. A. R. **Manual de aplicação de produtos fitossanitários**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2010. 588 p.

MIRANDA, G. R. B. **Distribuição de inseticidas em frutos do cafeeiro (*Coffea Arábica* L.) e eficiência no controle da broca-do-cafeeiro (*Hypothenemus hampei* F.)**. Tese (Agronomia – Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, 2009.

MOON, J. K.; LEE, D. H.; KANG, T. G.; YON, K. S. A capacitive type of electrostatic spraying nozzle. **Journal of Electrostatics**, Boston, v. 57, p. 363–379, março, 2003.

MURPHY, S. D.; MILLER, P. C. H; PARKIN, C. S. The effect of boom section and nozzle configuration on the risk of spray drift. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 75, n. 2, p.127-37, 2000.

OLIVEIRA, A. R.; BOLLER, W.; FORCELINI, C. A.; BLUM, R.; LOPES, A. Fungicidas, doses e volumes de calda no controle químico da ferrugem da folha da aveia (*Puccinia coronata* f. sp. avenae). **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, p.48-55, 2007.

OLIVEIRA, M. A. O.; ANTUNIASSI, U. R.; VELINI, E. D.; SIQUERI, F. V.; OLIVEIRA, R. B.; PONTELLI, C. O.; BELTRAMELLO, L. G. F.; Z Aidan, S. E. Desempenho de um sistema eletrostático com assistência de ar na deposição de calda e no controle da deriva em aplicações de fungicidas. In: Simpósio Internacional de Tecnologia de Aplicação de Agrotóxicos, 5, 2011, Cuiabá. **Resumos...** Cuiabá/MT.

OLIVET, J. J.; CUNHA, J. P. A. R.; AREOSA, M. Aplicação pneumática com carga eletrostática em estufa de pimentões. In: Simpósio Internacional de Tecnologia de Aplicação de Agrotóxicos, 5, 2011, Cuiabá. **Resumos...** Cuiabá/MT.

PALLADINI, L.A. **Metodologia para avaliação da deposição em pulverizações**. 2000. 111f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

PEREIRA, F. J. S. **Sistema de comutação de pontas na barra de pulverização para ajuste do tamanho de gotas às condições climáticas e aplicação em taxas variáveis**. 2006. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006.

QUEIROZ, C. A. S.; ANTUNIASSI, U. R. Avaliação de um sensor de detecção de plantas daninhas por análise de imagens. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 1-11, 2006.

RAETANO, C. G.; CHRISTOVAM, R. S.; SERRA, M. E.; REZENDE, D. T.; PONTELLI, C. O.; ZAIDAN, S. E.; BELTRAMELLO, L. G. F. New application technology to improve the spray deposition and coverage on soybean plants. In: Simpósio Internacional de Tecnologia de Aplicação de Agrotóxicos, 5, 2011, Cuiabá. **Resumos...** Cuiabá/MT.

REZENDE, D. T. **Análise comparativa de métodos para quantificação dos depósitos da pulverização em diferentes alvos**. 2011. Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu, 2011.

RODITI, I. **Dicionário Houaiss de Física**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2005.

ROMÁN, R. A. A.; CORTEZ, J. W.; FERREIRA, M. C.; OLIVEIRA, J. R. G. Cobertura da cultura da soja pela calda fungicida em função de pontas de pulverização e volumes de aplicação. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, p.223-232, 2009.

SALYANI, M.; FOX, R. D. Performance of image analysis for assessment of simulated spray droplet distribution. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 37, p. 1083 – 1089, 1994.

SCHRODER, E. P.; LOECK, A. E. Avaliação do sistema de pulverização eletrostática aérea na redução do volume de calda e dosagem do herbicida glifosate. **Revista Brasileira Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 3, p. 319-323, 2006.

SILVA, O. R. R. F. **Mejora de la eficiencia de la pulverización hidráulica mediante la técnica de incorporación de carga eléctrica en la gota**.1993. Tese (Doutorado – Engenharia Rural) Universidade Politécnica de Madrid – Madrid, 1993.

SILVA, O. R. R. F.; MARQUES, L.; CARVALHO, O. S.; VIEIRA, R. M. Avaliação do depósito de gotas através da pulverização eletrostática e da convencional sobre a cultura do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 1, p.101-105, 1997.

SILVA, O. R. R. F.; CARVALHO, O. S.; MARQUES, L. Determinação das perdas por escorrimento da pulverização eletrostática e convencional sobre o cultivo do algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 4, n.2, p.123-130, 2000.

SILVA, J. N. Uma abordagem histórica e experimental da Eletrostática. **Estação científica**, Macapá, v. 1, n. 1, p. 99-113, 2011.

SIMMONS, H.C.; LEHTINEN, J.R. Characteristics of electrostatically charged air atomized spray for pesticide application. **Pesticide Formulation and Application Systems**, v. 7, p. 116-132, 1986.

SINGH, B.C.; O'NEIL.; BRIGHT, A. W. A parametric study of electrostatic powder coating. **Journal Electrostatics**, Boston, v. 4, p. 325 – 334, julho, 1978.

SOUZA, R. T.; VELINI, E. D.; PALLADINI, L. Aspectos metodológicos para análise de depósitos de pulverizações para determinação de depósitos pontuais. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 195-202, 2007.

STAINIER, C.; DESTAINA, M. F.; SCHIFFERS, B.; LEBEAU, F. Droplet size spectra and drift effect of two phenmedipham formulations and four adjuvants mixtures. **Crop Protection**, Oxford, v. 25, p. 1238–1243, 2006.

SUMNER, P. E. **Reducing spray drift**. Georgia: University of Georgia, 1997. 11p. (ENG97-005).

TOLEDO, M. A.; MARTINELLI, N. M.; FERREIRA, M. C.; FERNANDES, A. P. Pragas-chave do cafeeiro das regiões da Alta Mogiana, Cerrado de Minas Gerais e do Espírito Santo. In: Congresso Brasileiro de pesquisas Cafeeiras, 31., 2005, Guarapari. **Trabalhos apresentados...** Rio de Janeiro: MMA/SRD/PROCAFÉ/PNFC, 2005, P. 379-380.

TOLJIC, N.; ADAMIAC, K.; CASTLE, G. S. P. Determination of Particle Charge to Mass Ratio Distribution in Electrostatic Applications: A Brief Review. **Proceedings...** ESA Annual Meeting on Electrostatics 2008, Paper G2.

VILLALBA, J.; HETZ, E. Deriva de productos agroquímicos - Efecto de las condiciones ambientales. In _____. **Tecnología de aplicación de agroquímicos**. Argentina: Área de comunicaciones del INTA Alto Valle, 2010. cap. 3, p. 45-54.

WILKERSON, J. B.; GAULTNEY, L. D. Electrostatic atomization of vegetable oil for pesticide spraying. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Paper no. 891524, 1989.

WILSON, J. M. A linear source of electrostatically charged spray. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 27, 9. 355 – 362, 1982.

WOLF, T. M.; HARRISON, S. K.; HALL, F. R.; COOPER, J. Optimizing post emergence herbicide deposition and efficacy through application variables in no till systems. **Weed science**, v. 48, p. 761 – 768, 2000.

XIAOYING, W.; JIANLONG, W. Study on Charged Spray Characteristics of Two-fluid Nozzle. In: International Conference on New Technology of Agricultural Engineering (ICEA), China, **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011, p. 2403 – 2407.

XIONGKUI, H.; AIJUN, Z.; YAJIA, L.; JIANLI, S. Precision orchard sprayer based on automatically infrared target detecting and electrostatic spraying techniques. **International Journal of Agricultural and biological engineering**, Beijing, v. 4, p. 35-40, 2011.

ZHAO, S.; CASTLE, G. S. P.; ADAMIAK, K. The Effect of Space Charge on the Performance of an Electrostatic Induction Charging Spray Nozzle. **Journal of Electrostatic**, Boston, v. 63, p. 261–272, 2005.

ZHAO, S.; CASTLE, G. S. P.; ADAMIAK, K. Factors affecting deposition in electrostatic pesticide spraying. **Journal of Electrostatics**, Boston, v. 66, p. 594–601, 2008.

ZHENG, J.; ZHOU, H.; XU, Y. Advances in pesticide electrostatic spraying in China. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Paper no. 021034, 2002.

ZHU, H.; REICHARD, D. L.; FOX, R. D.; BRAZEE, R. D.; OZKAN, H. E. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 37, n. 5, p. 1401-1407, 1994.