

# **Bico pneumático eletrostático para aplicação de inseticidas biológicos em florestas de eucalipto**

Aldemir Chaim  
Alberto Jorge Laranjeiro  
Deise Maria Fontana Capalbo

**Embrapa**

**Meio Ambiente**

## **REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**

**Presidente:** Fernando Henrique Cardoso

**Ministro da Agricultura e do Abastecimento:** Francisco Sérgio Turra

### **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa**

**Presidente:** Alberto Duque Portugal

**Diretores:** Dante Daniel Giacomelli Scolari

José Roberto Rodrigues Peres

Elza Angela Battaglia Brito da Cunha

#### **Embrapa Meio Ambiente**

**Chefe Geral:** Bernardo van Raij

**Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento:** Deise M Fontana Capalbo

**Chefe Adjunto Administrativo:** Vander Roberto Bisinoto

***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária***

***Embrapa Meio Ambiente***

***Ministério da Agricultura e do Abastecimento***

**BICO PNEUMÁTICO ELETROSTÁTICO  
PARA APLICAÇÃO DE INSETICIDAS  
BIOLÓGICOS EM FLORESTA DE EUCALIPTO**

Aldemir Chaim

Alberto Jorge Laranjeiro

Deise Maria Fontana Capalbo

*Jaguariúna, SP*

**1999**

EMBRAPA MEIO AMBIENTE - Boletim de Pesquisa 3.

Exemplares desta publicação podem ser solicitados à:

**Embrapa Meio Ambiente**

Rodovia SP-340 - km 127,5 - Bairro Tanquinho Velho

Caixa Postal 69 13820-000 - Jaguariúna, SP

Fone: (019) 867-8700 Fax: (019) 867-8740

e-mail:edis@cnpma.embrapa.br

**Comitê de Publicações:** Aldemir Chaim  
Célia M. M. de S. Silva  
Franco Lucchini  
Julio F. de Queiroz  
Magda A. de Lima  
Maria Cristina Tordin

**Revisão:** Lígia Abramides Testa

**Produção Gráfica:** Regina L. Siewert Rodrigues, Franco Ferreira de Moraes e Denise Moraes de Oliveira.

**Normalização:** Maria Amélia de Toledo Leme

**Tiragem:** 500 exemplares

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

CDD 632.94

©EMBRAPA MEIO AMBIENTE, 1999

## SUMÁRIO

<b>Resumo.....</b>	<b>05</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>06</b>
<b>Introdução.....</b>	<b>07</b>
<b>1. Materiais e métodos.....</b>	<b>17</b>
<b>2. Resultados e discussão.....</b>	<b>20</b>
<b>3. Conclusões.....</b>	<b>31</b>
<b>4. Referências bibliográficas.....</b>	<b>32</b>

# **BICO PNEUMÁTICO ELETROSTÁTICO PARA APLICAÇÃO DE INSETICIDAS BIOLÓGICOS EM FLORESTA DE EUCALIPTO<sup>1</sup>**

Aldemir Chaim<sup>2</sup>

Alberto Jorge Laranjeiro<sup>3</sup>

Deise Maria Fontana Capalbo<sup>4</sup>

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar um modelo de bico pneumático eletrostático adaptável aos pulverizadores tratorizados do tipo canhão, tendo em vista o uso desse equipamento nos tratamentos fitossanitários de florestas. Foram testadas diferentes dimensões de eletrodo de indução, orifício de pulverização, vazão de líquido e de ar. Uma das melhores combinações proporcionou um nível de carga da ordem de  $7,5 \mu\text{C/g}$  para uma vazão de líquido de  $2,7 \text{ mL/s}$ , tensão de  $1,000 \text{ V}$  e consumo de ar de  $368 \text{ L/min}$ . Esse bico operou com diâmetros de orifício de pulverização e eletrodo de indução de  $9,5 \text{ mm}$  e  $8,0 \text{ mm}$  respectivamente, proporcionando um campo eletrostático com, aproximadamente,  $660.000 \text{ V/m}$ .

---

<sup>1</sup> Patente solicitada – PI 9704018-5. nº/R: P-89833 em 17/7/97.

<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, M.Sc., Embrapa Meio Ambiente – Caixa Postal 69 CEP 13820-000 Jaguariúna (SP).

<sup>3</sup> Engenheiro Florestal, M.Sc., Equilíbrio Proteção Florestal, S/C Ltda. CEP 13416-110 Piracicaba (SP).

<sup>4</sup> Engenheira de Alimentos, Ph.D., Embrapa Meio Ambiente.

# **ELECTROSTATIC PNEUMATIC NOZZLE FOR SPRAYING BIOLOGICAL PESTICIDES ON EUCALYPTUS FOREST**

## **ABSTRACT**

This study aimed the development of a new electrostatic pneumatic nozzle for using on tractor mistblower sprayer in forests. Different sizes of induction electrodes, nozzle orifice, air and liquid flow rates were tested. The best result gave a charge level of approximately 7,5  $\mu\text{C/g}$ , with 2.7 mL/s of liquid flow rate, 1,000 V of electrode tension and 365 L/min for air consuming. This electrostatic pneumatic nozzle worked with an electrostatic field of approximately 660,000 V/m produced by a combination of both spraying orifice and induction electrode diameters of 9.5 mm and 8.0 mm, respectively.

## **INTRODUÇÃO**

As empresas produtoras de celulose têm buscado aumentar a exportação de seus produtos. Entretanto, os países importadores têm criado uma série de barreiras à importação, principalmente para aquelas empresas que não apresentem, dentro de sua cadeia produtiva, um projeto sustentável, para melhoria da qualidade ambiental. Em consequência disso, as empresas estão buscando opções para técnicas utilizadas no processo de produção de madeira. Entre elas, o tratamento fitossanitário das florestas tem-se apresentado como um fator muito preocupante, porque a principal técnica de aplicação de agrotóxicos empregada atualmente, para controle de pragas em floresta, é a pulverização por aeronaves. Pulverizadores terrestres do tipo canhão seriam uma das opções mais indicadas, devido à grande faixa que conseguem tratar em cada passada, quando as condições operacionais são favoráveis. Entretanto, é necessário que o aparelho produza gotas de tamanho adequado para permanecerem em suspensão no ar e atingirem as folhas das árvores. Em vista do pequeno peso, essas gotas apresentam limitações quanto à sedimentação na superfície das folhas. A pulverização eletrostática é alternativa promissora para melhorar a dispersão das partículas no ar e a deposição nas plantas. Neste caso, seria interessante o desenvolvimento de um pulverizador com bicos com sistema de carga por indução, em que o líquido mantém o potencial de zero volt por aterramento, podendo a voltagem de indução ser reduzida para valores inferiores a 4.000 volts.

As pesquisas sobre o uso de gotas com cargas eletrostáticas tiveram um grande crescimento, principalmente depois do sucesso do

pulverizador Electrodyn, desenvolvido por Coffee (1979). Vários projetos de bicos eletrostáticos foram desenvolvidos, mas os benefícios do uso de gotas com carga eletrostática não foram consistentes (Hislop, 1988). Isso ocorreu porque os projetos elaborados não geraram gotas com nível de carga suficiente para melhorar a deposição ou, por outro lado, o tamanho de gotas produzidas não era adequado para empregar carga eletrostática.

De maneira geral, a eficiência da aplicação aumenta com a diminuição do tamanho das gotas. Himel (1969) e Himel & More (1969) têm estimado que aquelas compreendidas entre 20 e 50  $\mu\text{m}$  são ideais para o controle de insetos. É justamente nessa faixa de tamanho que ocorre o maior benefício da carga eletrostática (McCartney & Woodhead, 1983), aumentando expressivamente a deposição.

Hislop (1988), numa revisão sobre o emprego da eletrostática para aplicação de defensivos, afirmou que é possível reduzir, com facilidade, mais de 50% dos ingredientes ativos recomendados nas aplicações sem diminuir a eficácia biológica. Além de melhorar a eficiência no controle, a pulverização eletrostática reduz os efeitos colaterais dos inseticidas sobre aqueles organismos que vivem no solo porque, segundo Endacott (1983), as perdas para esse substrato chegam a ser 20 vezes menores do que as que ocorrem em uma pulverização convencional.

Nos últimos vinte anos, vários projetos de pulverizadores eletrostáticos foram elaborados, na tentativa de melhorar a eficiência de aplicação. No Brasil, Chaim (1984) desenvolveu e testou um protótipo de pulverizador manual eletrohidrodinâmico, para aplicação de volumes de calda entre 1 e 2 L por hectare e obteve sucesso de controle de trips em amendoim, empregando apenas 50% da dose recomendada de

deltametrina. Para compensar a dificuldade de desenvolvimento de formulações adequadas à pulverização eletrohidrodinâmica, a Embrapa (1994) desenvolveu um protótipo de pulverizador pneumático eletrostático, costal, acionado por alavanca manual para pulverização de caldas aquosas e oleosas. Para esse protótipo, foi necessário o desenvolvimento de bicos pneumáticos de baixas pressões, para reduzir o esforço físico do aplicador, com o bombeamento manual do ar. As informações de Fraser (1956) dão conta que a transferência de energia de um jato de ar paralelo a um jato de líquido é extremamente ineficiente para produção de gotas. Com esse conhecimento, procurou-se o desenvolvimento de um bico especial, capaz de produzir um jato de gotas carregadas, com pressões menores do que 14 kPa. Em um teste realizado com um protótipo, observou-se que, nas condições normais de pulverização com 14 kPa e vazão menor do que 10 mL/min, a alta tensão aplicada ao bico (2.000 volts) permitiu a pulverização de líquidos em gotas com índice de carga maior do que 6  $\mu\text{C/g}$ .

Geralmente, os projetos de bicos eletrostáticos baseiam-se no princípio de que todos os líquidos são eletricamente neutros, pois existe um equilíbrio entre os elétrons com cargas negativas e prótons com cargas positivas. Assim, para um corpo, por exemplo, uma gotícula de líquido se tornar carregada, é necessário destruir o balanço normal entre elétrons e prótons. A adição ou subtração de elétrons em um corpo proporciona o aparecimento de carga negativa ou positiva na sua superfície. Vários processos podem ser utilizados para adicionar ou retirar elétrons de determinado corpo, mas a indução eletrostática é a única maneira pela qual isso pode ser feito com o uso de baixa tensão.

A indução eletrostática ocorre entre dois corpos mantidos sob diferentes potenciais, separados por determinada distância. Nessa

situação, forma-se um campo elétrico, acumulando-se as cargas positivas no corpo mantido em potencial positivo e, as negativas, no outro. Assim, se um dos corpos constitui-se de um fluxo de líquido aterrado, serão acumuladas cargas na sua superfície, as quais, posteriormente, serão levadas com as gotas. À medida que as cargas são levadas pelas gotas, novas cargas fluem da terra para a superfície do líquido que está sendo pulverizado, no sentido de restabelecer o equilíbrio da indução.

O sistema de carga por indução tem sido utilizado basicamente em três tipos de bicos de pulverização: hidráulico (Law & Bowem, 1966; Carroz & Keller, 1978, e Marchant & Green, 1982), centrífugo (Carlton & Bouse, 1980, e Marchant, 1985) e pneumático (Law, 1978). Normalmente, o eletrodo de indução é posicionado a poucos milímetros do ponto em o que líquido se rompe em gotas, conseguindo-se um campo eletrostático muito intenso com voltagens relativamente muito baixas. Um dos problemas desse processo é que as gotas produzidas possuem polaridade oposta ao eletrodo de indução. Assim, elas são fortemente atraídas, depositando-se sobre a superfície do eletrodo e provocando o seu molhamento e gotejamento. A presença de líquido na superfície do eletrodo de indução gera pontos de ionização que descarregam as gotas formadas ou originam faíscas elétricas, reduzindo a efetividade do bico. Carlton & Bouse (1980) desenvolveram um sistema de indução para bicos centrífugos e solucionaram o problema do molhamento do eletrodo, colocando o bico num fluxo de ar em alta velocidade, o qual mantinha seco o eletrodo de indução. Marchant & Green (1982) desenvolveram um sistema de indução para bico hidráulico, no qual foi adaptado um eletrodo de indução oco, com várias perfurações, e um sofisticado sistema para aspirar o líquido que se

depositava na sua superfície. A solução mais engenhosa, entretanto, foi a apresentada por Law (1978), com a utilização de um bico pneumático de mistura interna. Esses bicos se caracterizam por proporcionar jatos concêntricos de ar e líquido, com a particularidade de possuir uma pequena constrição na capa que recobre a ponta de emergência do líquido, ou seja, a peça que direciona o ar para a pulverização do líquido. Essa constrição ou choque se situa a uma pequena distância do ponto de emergência do líquido e serve para melhorar a transferência de energia do ar para a produção das gotas. Law (1978) construiu essa capa com material dielétrico, contendo um eletrodo de indução miniatura embutido, justamente na região entre o orifício de emergência do líquido e a constrição, na zona de formação das gotas. Assim, o próprio ar que pulveriza o líquido arrasta as gotas carregadas para longe da influência do eletrodo de indução, mantendo-o seco.

O nível de carga das gotas produzidas pelo processo de indução depende muito da intensidade do campo elétrico proporcionado pelo eletrodo de indução e das características físico-químicas do líquido. Dessa forma, a condutividade e a permitividade do líquido são parâmetros de extrema importância, pois a relação entre eles fornece a constante de tempo de transferência de carga  $\tau = \epsilon/\sigma$ , onde  $\tau$  é a constante de transferência de carga em segundos;  $\epsilon$ , a permitividade do líquido ( $C^2/N \cdot m^2$ ) e  $\sigma$ , a condutividade do líquido (mho/m). Em termos de constante dielétrica  $k$  e resistividade  $\rho$  (ohm.m), esse tempo fica:  $\tau = k \cdot \rho \cdot \epsilon_0$  onde  $\epsilon_0$  é a permitividade do ar  $\cong 8,85 \cdot 10^{-12}$  ( $C^2/N \cdot m^2$ ).

A maioria dos produtos aplicados por via líquida utiliza a água como diluente, e a calda formada apresenta boas características elétricas para um perfeito funcionamento do processo de carga por indução. Entretanto, devido aos problemas de deriva e evaporação, essa

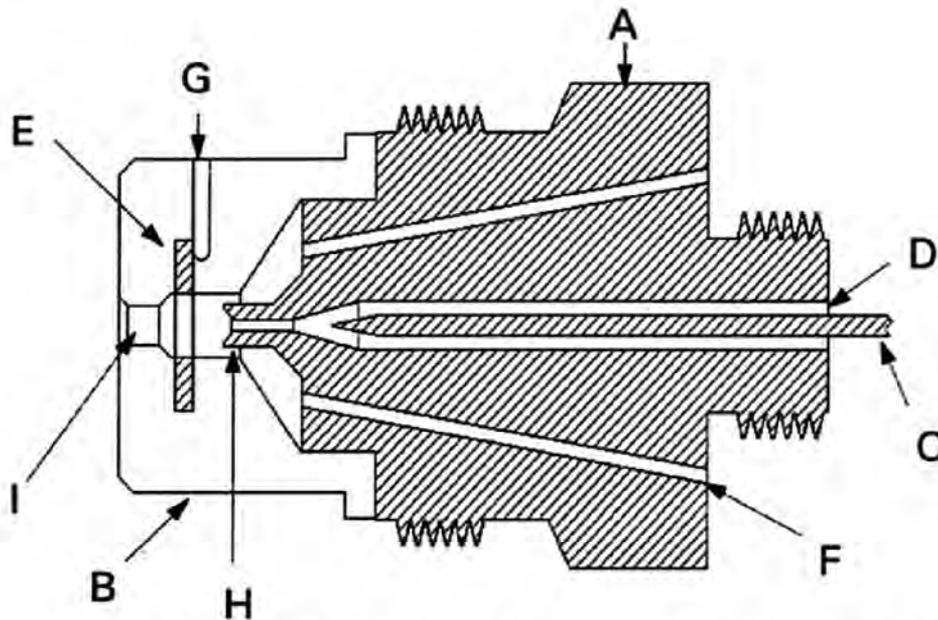
calda não é indicada para pulverizações com gotas entre 30 e 50  $\mu\text{m}$  de diâmetro mediano volumétrico. A deriva pode ser razoavelmente controlada pelo uso de gotas com carga eletrostática (Carlton & Bouse, 1980; Sharp, 1984), mas a evaporação só pode ser controlada com a utilização de adjuvantes na calda de pulverização. Esses adjuvantes podem alterar sensivelmente as características elétricas do líquido, prejudicando, conseqüentemente, o nível de carga das gotas (Law & Cooper, 1989).

O bico pneumático eletrostático desenvolvido por Law (1978) apresenta características interessantes; entre elas, o tamanho de gotas adequado para um controle mais eficiente de pragas e doenças e, principalmente, a manutenção do eletrodo de indução seco. Entretanto, exige o emprego de ar em pressões relativamente altas, acima de 100 kPa, o que obriga a utilização de compressores a pistão, com reservatório adicional de grande capacidade de armazenamento de ar. A necessidade de usar um compressor com tanque para armazenagem de ar surge como um problema extra no projeto de construção de um equipamento tratorizado, uma vez que, ao utilizar um compressor comercial, é necessário dispor de um gerador elétrico para fornecer energia ao funcionamento do motor. Na hipótese de o compressor ser acionado diretamente pelo trator, é necessário desenvolver um sistema extra de segurança para controlar a pressão do ar dentro do tanque.

Law (1978) utilizou um bico pneumático da Spraying Systems Company do tipo SU # 22B e desenvolveu uma capa de material dielétrico para promover a interface diretamente com o corpo metálico do bico (#40100), substituindo, portanto, a capa do ar original (#1401110), constituída de material metálico. Um pequeno eletrodo cilíndrico foi embutido dentro da capa dielétrica, em posição coaxial com

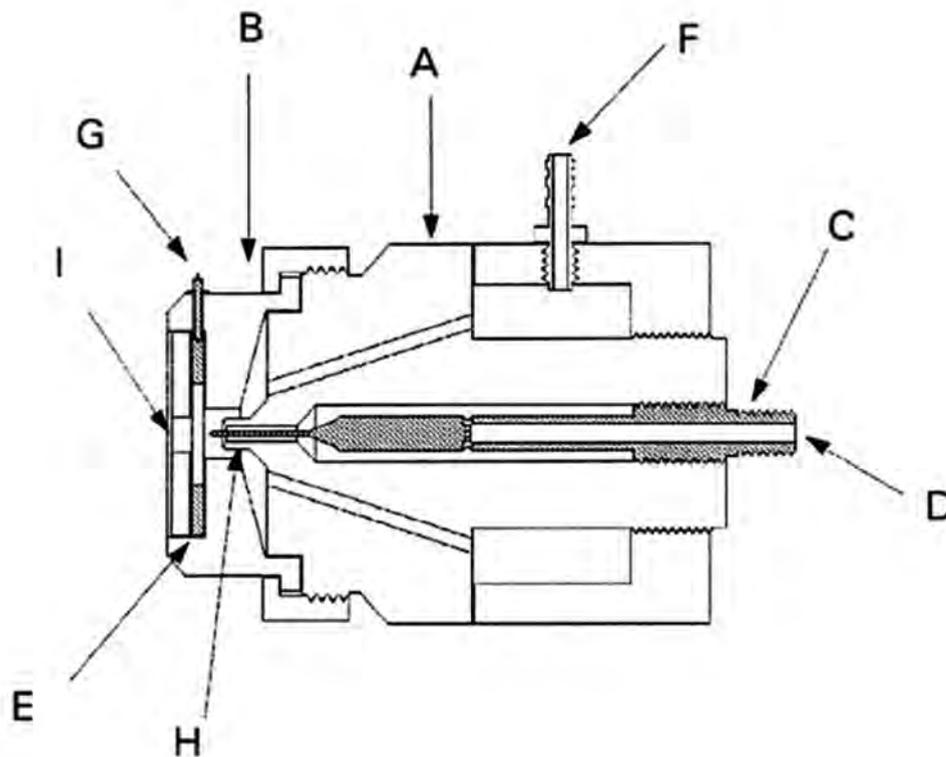
a linha central do orifício de emergência do líquido. Quando montadas as duas peças, o eletrodo de indução ficou posicionado a uma distância de 1,78 mm do orifício de emergência do líquido, ou seja, na zona de formação das gotas. O eletrodo para aterramento do líquido foi posicionado dentro do fluxo de líquido contido no interior do corpo metálico do bico, em um ponto distante da zona de formação das gotas. Segundo o autor, isso foi feito para assegurar que o campo elétrico mais intenso fosse estabelecido entre o eletrodo de indução e o jato emergente do líquido e não com o corpo metálico do bico. Verifica-se, nesse projeto, que os elétrons têm que se deslocar desde o eletrodo de aterramento até a zona de formação das gotas, unicamente através do líquido. Neste caso, o líquido se torna um pequeno condutor cilíndrico, com alguns milímetros de comprimento por 1 mm de diâmetro. A fórmula da resistência de um condutor homogêneo de seção constante é  $r = \rho l/s$ , onde  $r$  é a resistência (ohm);  $\rho$ , a resistividade do material (ohm.m);  $l$ , o comprimento (m) e  $s$ , a seção transversal (m<sup>2</sup>). Por essa fórmula, pode-se concluir que, se houver uma diminuição da distância entre o ponto de aterramento de líquido e o ponto de formação das gotas, no qual se processa a indução, as gotas produzidas poderão apresentar maiores níveis de carga, pois a resistência será menor. É discutível a necessidade de colocar um eletrodo para aterrar o líquido dentro do corpo metálico do bico, pois, como o corpo é melhor condutor do que o líquido, os elétrons só se deslocarão no líquido depois da sua emergência do orifício do corpo metálico. Dependendo da tensão aplicada, surge um campo de ionização muito intenso, por efeito corona, entre a ponta de emergência do líquido e o eletrodo de indução. Como a ponta do corpo metálico do bico desenvolvido por Law (1978) situa-se a 1,78 mm de distância do eletrodo de indução (Figura 1), o campo

eletrostático mais intenso pode não estar ocorrendo inteiramente com o líquido. Isso só seria possível se o corpo do bico, por onde passa o líquido, fosse construído com material isolante.



**Fig. 1.** Representação esquemática do bico pneumático eletrostático, com corpo construído em latão, cujo projeto original foi desenvolvido por Law (1978). A: corpo do bico; B: capa de ar; C: eletrodo de aterramento do líquido; D: entrada de líquido; E: eletrodo de indução; F: entrada de ar; G: entrada do pino de conexão de alta tensão; H: ponta do bico; I: choque ou constrição da capa de ar.

Esse problema da transferência de carga é encontrado em quase todos os projetos de bicos eletrostáticos descritos na literatura, pois o eletrodo de indução quase sempre é posicionado muito próximo das estruturas metálicas que conduzem o líquido até a zona de formação de gotas. Chaim (1988) confirmou essas pressuposições com a obtenção de níveis de carga da ordem de  $22 \mu\text{C/g}$ , com algumas modificações no sistema de aterramento (Figura 2) do bico desenvolvido por Law (1978).



**Fig. 2.** Representação esquemática do bico pneumático eletrostático (modificado por Chaim, 1998), construído com náilon, sendo os eletrodos de indução e de aterramento em latão. **A:** corpo do bico; **B:** capa de ar; **C:** eletrodo de aterramento do líquido; **D:** entrada do líquido; **E:** eletrodo de indução; **F:** entrada de ar; **G:** pino de conexão para a alta tensão; **H:** ponta do bico; **I:** choque ou constrição da capa de ar.

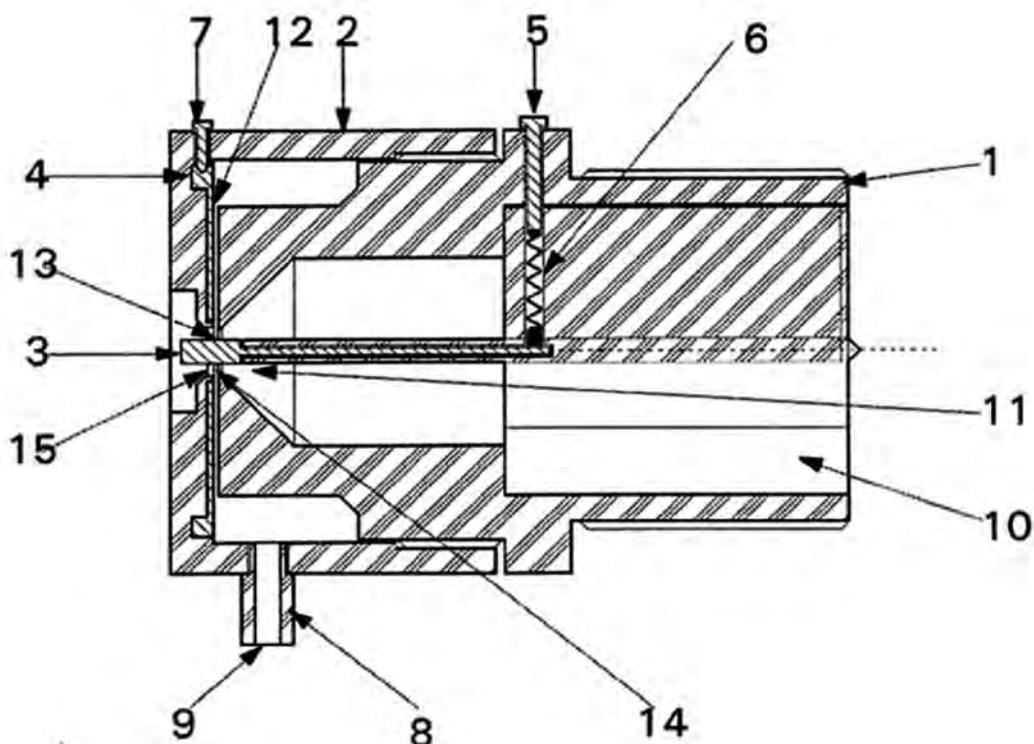
No contexto da eficiência da pulverização pneumática, segundo Fraser (1956), um dos primeiros bicos pneumáticos surgiu em 1866 e tem sido utilizado até hoje para pulverização de líquidos sob regime de pequenas vazões. Tal bico, classificado como do tipo injeção, opera com pressões de ar médias a altas. Nesse processo, quando a vazão do líquido é alta, a eficiência da aplicação da energia gasosa para a produção de gotas é baixa. Isso porque o jato de ar se apresenta na mesma direção do fluxo do líquido, contribuindo muito pouco para sua ruptura em gotas. Existem vários métodos para resolver esse problema: entre eles, o mais simples é transformar o líquido em uma fina lâmina,

antes de se encontrar com o fluxo do ar em alta velocidade. Uma das maneiras de produzir uma lâmina de líquido é forçá-lo a passar por algum dispositivo, com espaço interior delgado, proporcionado por duas faces planas e paralelas, ambas com orifícios centralizados em relação a suas áreas, concentricamente dispostos, de maneira a formar uma fresta anular, por onde o líquido possa emergir. Um dos orifícios deve possuir o diâmetro levemente inferior ao outro, de maneira que o ar, ao passar por ele, crie uma pressão negativa dentro do dispositivo, aspirando o líquido para a pulverização.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar um novo tipo de bico pneumático eletrostático, capaz de gerar gotas com nível de carga acima de  $1 \mu\text{C/g}$ , com baixa pressão de ar, com voltagem de indução inferior a 5.000 V, para aplicação de produtos biológicos em florestas.

## **1. MATERIAIS E MÉTODOS**

Foram construídos alguns protótipos de bicos pneumáticos eletrostáticos, conforme Figura 3. O proposto foi constituído, basicamente, por um corpo principal e uma capa de pulverização, confeccionados com material dielétrico (PVC); um eletrodo de indução com ponta cilíndrica embutido no corpo do bico, e um eletrodo de aterramento de líquido, com forma anelar, acoplado na face plana interna da capa, ambos confeccionados com material condutor (latão). Um parafuso, atuando sobre uma mola, permitiu a conexão do cabo de alta tensão ao eletrodo de indução, além de fixá-lo ao corpo principal do bico. A fixação do eletrodo de aterramento, bem como sua conexão a um cabo terra, foi proporcionado por um pequeno parafuso. Um tubo acoplado à capa permitiu a fixação de mangueira para admissão de líquido, conforme indicado pela seta (9). A abertura (10) localizada no corpo principal do bico permitiu a entrada do fluxo de ar, segundo mostrado pela seta (11). A conexão do corpo principal e a capa permitiram a formação de uma fenda (12) interna, que orientou a emergência do líquido por uma fresta anular (13), constituída entre os seus respectivos orifícios centrais (14) e (15).



**Fig 3.** Corte lateral do bico pneumático eletrostático, desenvolvido para aplicação de inseticidas biológicos em florestas de eucalipto. 1: Corpo do bico; 2: Capa de pulverização; 3: Eletrodo de indução; 4: Eletrodo de aterramento; 5: Parafuso de conexão de cabo de alta tensão; 6: Mola de conexão; 7: Parafuso de conexão do cabo de aterramento; 8: Tubo de alimentação para líquido; 9: Entrada de líquido; 10: Entrada de ar sob pressão; 11: Direção do deslocamento do ar comprimido; 12: Fenda interna de escoamento do líquido; 13: Fresta anular de emergência do líquido; 14: Orifício de escape de ar do corpo do bico; 15: Orifício da capa de pulverização.

Foram realizados testes para medir a carga das gotas produzidas por bicos com diferentes configurações de eletrodo de indução e orifícios de ar e líquido. Mediu-se, também, a carga das gotas para diferentes tipos de caldas constituídas de diferentes proporções de água, formulação à base de *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* - Dipel®, e um óleo vegetal emulsionável - Natur'oil®.

O ar necessário para a pulverização foi proporcionado por um compressor centrífugo, de duplo estágio, com vazão de 3.500 L/min a uma pressão de 50 kPa.

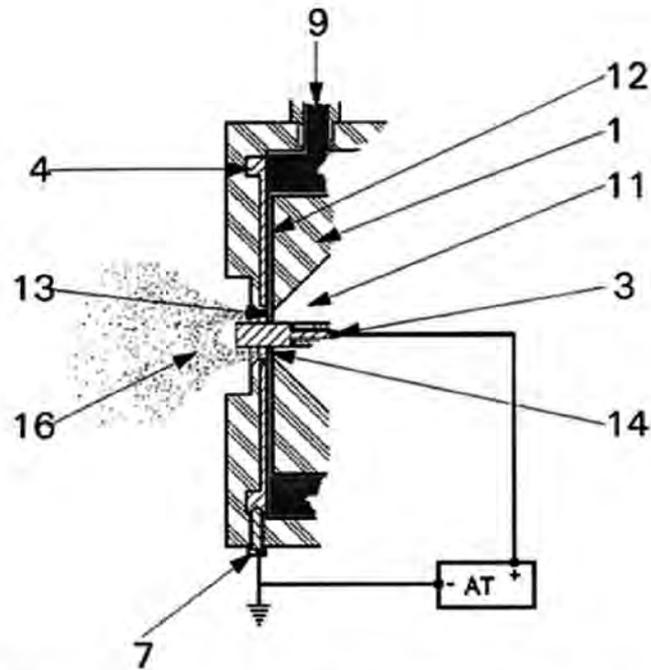
A carga das gotas foi estimada pela corrente elétrica do jato de líquido, conforme método descrito por Chaim (1998).

O consumo de ar dos bicos foi estabelecido mediante vazão máxima do compressor (3.500 L/min) a 50 kPa e o número de bicos suportados por esse equipamento, sem que houvesse queda de pressão.

As vazões de líquido foram estabelecidas a partir do tempo gasto por cada bico, para pulverizar um volume de 1 L.

## **2. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A Figura 4 apresenta o esquema do sistema de indução eletrostático em funcionamento. Pode-se observar que o eletrodo de indução retilíneo foi posicionado no centro do jato de ar, com a extremidade na zona de formação das gotas, enquanto o eletrodo de aterramento do líquido foi embutido no espaço interno do circuito de alimentação de líquido, sendo ambos interligados por uma fonte de alta tensão. Quando o eletrodo de indução foi submetido a uma tensão positiva, ocorreu a formação de um campo elétrico entre a sua superfície e a do líquido presente na fresta anular. Nessa situação, ocorreu o fenômeno da indução e as cargas negativas fluíram do eletrodo de aterramento, deslocando-se pelo líquido, até a sua superfície, onde se acumularam em grande quantidade. Com o escoamento do ar em alta velocidade pelo orifício do corpo do bico, ocorreu a fragmentação da lâmina líquida, originando as gotas com carga elétrica. À medida que as cargas foram levadas com as gotas, novas cargas fluíram do eletrodo de aterramento para manter o equilíbrio do campo elétrico. As gotas foram arrastadas pela movimentação turbulenta do ar para longe da zona de atração do eletrodo de indução.



**Fig. 4.** Detalhe do funcionamento do bico pneumático eletrostático. 1: Corpo do bico; 3: Eletrodo de indução; 4: Eletrodo de aterramento; 7: Parafuso de conexão do cabo de aterramento; 9: Mangueira de admissão do líquido; 11: Direção do deslocamento do ar comprimido; 12: Fenda interna de escoamento do líquido; 13: Fresta anular de emergência do líquido; 14: Orifício de escape de ar do corpo do bico; 16: Gotas com carga eletrostática

Na Tabela 1 é apresentada a vazão de ar por bico, considerando-se o dimensionamento dos orifícios de escape e o eletrodo de indução. Essa informação é importante para confecção de um pulverizador tratorizado, no qual deve haver um balanço entre o nível de carga desejado para as gotas, consumo de líquido, número de bicos, tipo de cultura a ser tratada e custo adicional dos compressores necessários ao projeto. Por exemplo, para a construção de um pulverizador do tipo canhão, capaz de aplicar volumes de calda de 6 L/ha, com faixa operacional de 30 m, seriam necessários 8 bicos com vazão de calda de 200 mL/min. Considerando a capacidade máxima de

um compressor (3.500 L/min), o consumo de ar por bico deveria ficar entre 200 e 400 L/min.

**Tabela 1.** Previsão da vazão de ar de bicos pneumáticos eletrostáticos, com diferentes dimensões de orifícios de saída e eletrodos de indução, submetidos à pressão de 50 kPa

<b>Tipo da capa</b>	<b>Orifício capa<sup>1</sup></b>	<b>Orifício corpo<sup>2</sup></b>	<b>Eletrodo<sup>3</sup></b>	<b>Vazão de ar<sup>4</sup></b>
<b>Latão</b>	6	5,5	2	368
	6	5,5	3	298
	6	5,5	4	200
	8	7,5	3	662
	8	7,5	4	564
	8	7,5	6	284
	10	9,5	2	1.207
	10	9,5	3	1.136
	10	9,5	4	1.039
	10	9,5	6	759
<b>PVC</b>	10	9,5	8	368
	6	5,5	2	368
	6	5,5	3	298
	6	5,5	4	200

<sup>1</sup>Diâmetro do orifício da capa do bico (mm).

<sup>2</sup>Diâmetro do orifício de saída de ar do corpo do bico (mm).

<sup>3</sup>Diâmetro do eletrodo de indução (mm).

<sup>4</sup>Consumo de ar por bico (L/min).

O esquema de funcionamento demonstrado na Figura 5 revela que o eletrodo de aterramento foi embutido na capa confeccionada em material dielétrico (PVC), sem que houvesse uma exposição direta de sua superfície ao eletrodo de indução. Com esse processo, diferente daquele descrito por Law (1978), assegurou-se o estabelecimento de um campo elétrico muito intenso entre o líquido emergente na fresta

anular e o eletrodo de indução. Por outro lado, como a extremidade interna do anel do eletrodo de aterramento foi posicionado muito próximo da zona de formação das gotas, as cargas se deslocaram por uma distância muito curta pela lâmina de líquido, reduzindo o tempo de transferência de carga, melhorando o nível de corrente elétrica no jato de gotas, principalmente para os casos de líquidos com maior resistividade elétrica.

Na Tabela 2 e nas Figuras 5 e 6, encontram-se alguns resultados de testes realizados em laboratório, com protótipos de bicos especialmente desenvolvidos para utilizar em um projeto específico de pulverizador agrícola tratorizado, com orifícios de saída, e eletrodos de indução de diâmetros variados, diferentes líquidos e voltagens de trabalho. Em vista das exigências do projeto específico, os ensaios foram realizados com os bicos operando sob um regime de vazões de líquido muito grande. Mesmo assim, os protótipos apresentaram níveis de carga razoáveis para uso no campo, pois segundo Law & Cooper (1989), o efeito benéfico das gotas com carga eletrostática começa a aparecer quando se atinge um nível de carga/massa de  $1 \mu\text{C/g}$ .

**Tabela 2.** Níveis de corrente elétrica e carga obtidos nos jatos das gotas, produzidos com protótipos de bicos com diferentes diâmetros de orifício de pulverização, diâmetros de eletrodos de indução, vazões e voltagens, submetidos a uma pressão constante de ar de 50 kPa

Líquido testado <sup>1</sup>	Orifício <sup>2</sup>	Eletrodo <sup>3</sup>	Líquido <sup>4</sup>	Ar <sup>5</sup>	Tensão <sup>6</sup>	Corrente <sup>7</sup>	Carga <sup>8</sup>
A(100)	9,5	6	5,0	759	2000	20,0	4,0
A(100)	7,5	3	6,9	662	2000	11,0	1,6
A(100)	7,5	3	3,3	662	2500	12,0	3,6
A(100)	5,5	2	9,0	368	2000	8,0	0,9
A(100)	5,5	2	6,7	368	2000	9,0	1,4
A(100)	5,5	2	5,0	368	2000	9,0	1,8
A(100)	5,5	2	3,2	368	2000	10,0	3,1
A (5) + N(95)	5,5	2	4,0	368	2000	7,0	1,8
A(20) + D20 + N(60)	9,5	3	4,0	1136	2000	7,0	1,8
A(65) + D(18,5) + N(16,5)	7,5	3	3,6	662	2500	14,0	3,9
A(65) + D(15) + N(20)	5,5	2	5,0	368	2000	8,4	1,7
A(65) + D(15) + N(20)	5,5	2	2,9	368	2000	5,0	1,7

<sup>1</sup>A = água, D = Dipel; N = Natur'oil. Os números entre parênteses representam o percentual de cada líquido na mistura.

<sup>2</sup>Diâmetro do orifício de pulverização (mm).

<sup>3</sup>Diâmetro do eletrodo de indução (mm).

<sup>4</sup>Vazão da calda (mL/s).

<sup>5</sup>Consumo de ar do bico (L/min).

<sup>6</sup>Voltagem aplicada ao eletrodo de indução (V).

<sup>7</sup>Corrente presente no jato de gotas ( $\mu$ A).

<sup>8</sup>Carga presente no jato de gotas ( $\mu$ C/g).

Em testes com bico pneumático eletrostático, Chaim (1998) encontrou uma relação inversa entre a vazão e a relação carga/massa. Esse comportamento também pode ser notado na Tabela 2, com os resultados da pulverização de água pelo protótipo de bico com diâmetro de orifício de 5,5 mm e eletrodo de 2 mm. Não houve diferença no nível de carga para esse mesmo protótipo, quando pulverizou somente água (5,0 mL/min) e a solução de água com Natur'oil (4,0 mL/min). Comparando os bicos com 7,5 mm de diâmetro de orifício, constata-se que a presença de adjuvante não apresentou um efeito prejudicial no nível de carga, para os casos de vazão semelhante. O bico com 5,5 mm de diâmetro de orifício promoveu um incremento expressivo no nível de carga quando houve uma redução na vazão de água de 5,0 para 3,2 mL/min. Esse incremento não foi registrado na pulverização da calda com adjuvantes. Dentro das diferentes possibilidades de combinações de dimensões de eletrodos e orifícios de pulverização, os protótipos superam o nível mínimo de carga para a ocorrência dos seus efeitos benéficos.

Na Figura 6, pode-se observar que a voltagem de indução influencia proporcionalmente a quantidade de carga das gotas dentro da faixa compreendida entre 500 e 1.500 volts. A partir dos 1.500 volts, ocorre o fenômeno de descarga por efeito corona estabilizando o nível de carga do jato de gotas.

Esse efeito também foi verificado por Chaim (1998) que obteve níveis de carga crescentes para faixas de voltagem entre 500 e 2.500 volts.

Pela lei de Coulomb, a diferença de potencial (V) e o campo elétrico (E) entre dois pontos podem ser expressos como:

$$V = \frac{q}{4 * \pi * \epsilon * r} \text{ (V)}$$

$$E = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r^2} \text{ (V/m)}$$

onde:

q = carga (Coulomb);

$\epsilon$  = permissividade do meio (Farads/metro);

r = distância entre os dois pontos (metro).

Assim, E pode ser expresso como:

$$E = \frac{V}{r} \text{ (V/m)}$$

Por essa fórmula, o campo elétrico existente entre o eletrodo de indução e o líquido para uma tensão de 500 volts, esteve em torno de 200.000 V/m; para uma tensão de 2.000 volts, o campo seria de 800.000 V/m. Na condição de um campo elétrico muito intenso, ocorre a ionização do ar ambiente, com cargas da mesma polaridade que o eletrodo de indução. Como têm carga de polaridade oposta ao eletrodo de indução, as gotas são parcialmente descarregadas pela ionização, reduzindo, conseqüentemente, a efetividade do bico. A vazão apresentou uma relação diretamente proporcional com a corrente elétrica do jato de gotas, para tensões entre 500 e 1.500 volts.

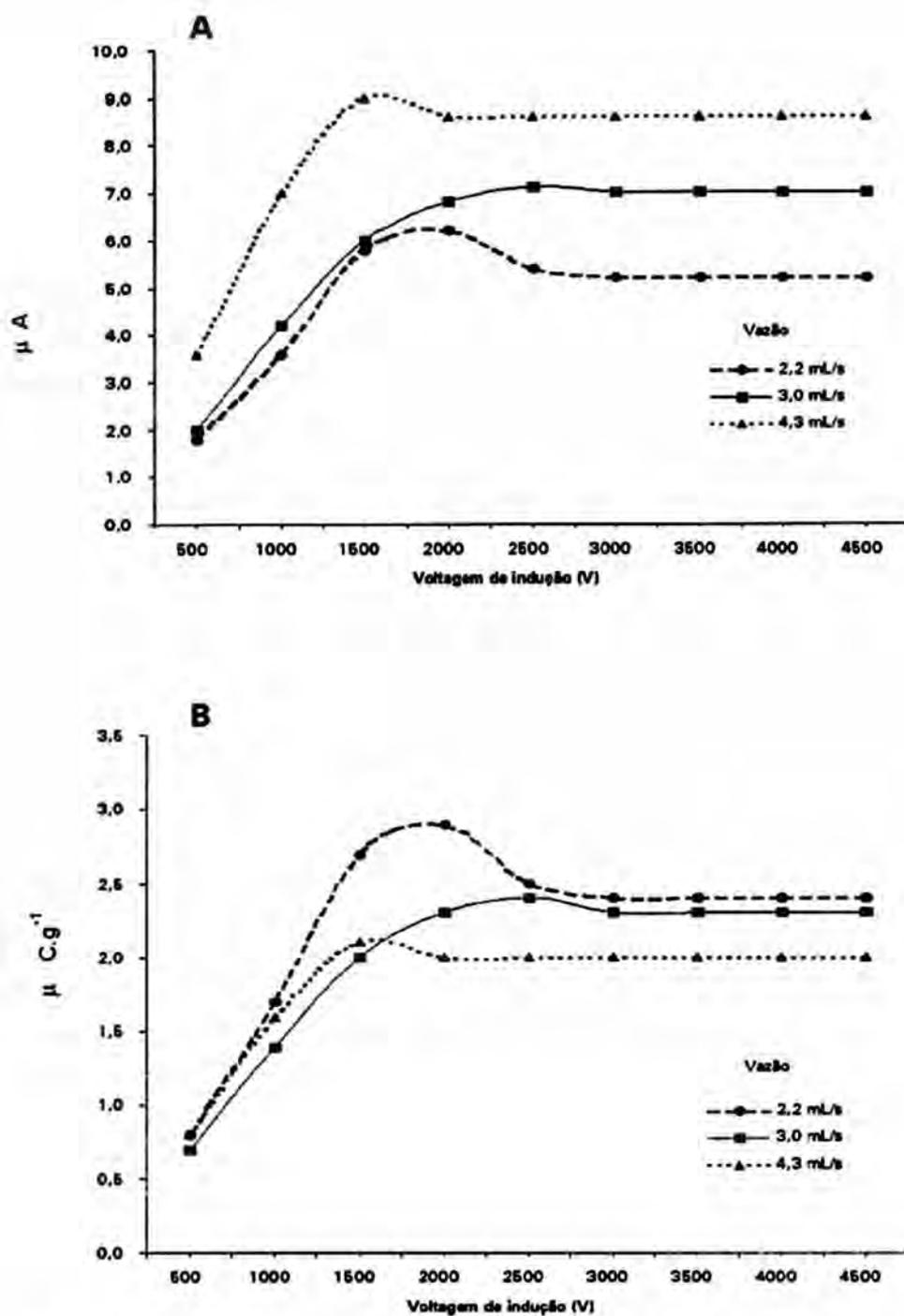


Fig. 5 Níveis de corrente elétrica e relação carga/massa obtidos com um bico, com orifício de pulverização de 5,5 mm e eletrodo de indução de 3,0 mm de diâmetro, pulverizando água sob diferentes voltagens de indução. A: Níveis de corrente. B: Níveis de carga.

No bico desenvolvido, o líquido foi forçado a emergir por uma fresta anular, de maneira a circundar o jato de ar em um ângulo de 90°, o que conferiu ao processo maior poder de pulverização, gerando gotas muito pequenas, com pressões muito baixas. Contribuiu também para melhorar a pulverização, a presença do eletrodo de indução retilíneo e cilíndrico, posicionado no centro do jato do ar e com uma extremidade na zona de formação das gotas, forçando-o a escoar por uma fresta anular, promovendo um aumento na velocidade periférica e melhor transferência da energia pneumática para a produção das gotas. Essa configuração foi responsável, também, pela manutenção do eletrodo de indução livre da presença de líquido. Isso pode ser comprovado pelos resultados da Figura 6, em que se compararam dois bicos com diâmetros de orifícios e eletrodos de indução diferentes: a tensão de 1.000 volts aplicada ao eletrodo de indução proporcionou os maiores índices de carga no jato de gotas para os dois bicos testados. Isso está relacionado à distância entre o eletrodo de indução e a superfície do líquido, que, no caso, foi de 1,5 mm para os dois bicos, com um campo eletrostático em torno de 660.000 V/m. Pode-se notar que o nível de carga é maior para o bico 1, com um orifício maior de pulverização e, conseqüentemente, maior vazão de ar, indicando que esse fator tem correlação positiva com a corrente elétrica do jato de gotas.

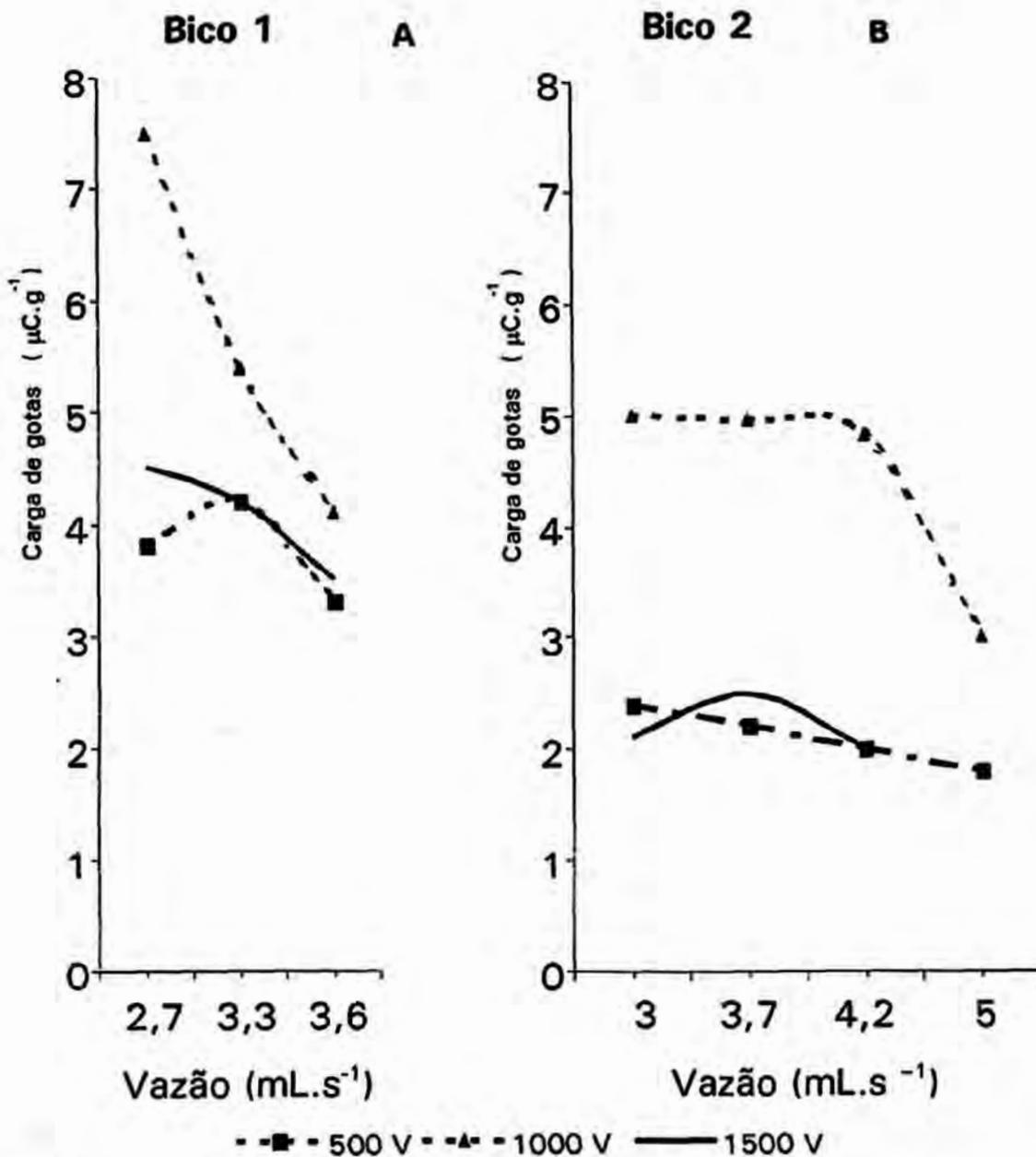


Fig. 6 Níveis de carga obtidos com dois bicos sob diferentes voltagens de indução, vazão de líquido, diâmetros de orifícios de pulverização e eletrodos de indução. **A** (Bico 1): diâmetro de orifício de pulverização de 9,5 mm e eletrodo de indução de 8,0 mm; **B** (Bico 2): diâmetro de orifício de pulverização de 7,5 mm e eletrodo de indução de 6,0 mm.

O melhor nível de carga (7,5 μC/g) foi obtido com um bico com diâmetros de orifício de pulverização e eletrodo de indução de 9,5 mm e 8,0 mm respectivamente, trabalhando com uma vazão de líquido de 2,7

mL/s, tensão de 1.000 volts e consumo de ar de 368 L/min. Todavia, considerando a possibilidade de adaptação do compressor utilizado no experimento a um equipamento tratorizado, o bico mais adequado para uso num pulverizador do tipo canhão é aquele com um consumo de ar em torno de 284 L/min, proporcionado pela combinação do orifício de 7,5 mm e eletrodo de indução de 6,0 mm. Esse protótipo, calibrado para pulverizar água numa vazão de 3,0 mL/s, sob uma tensão de 1.000 volts, gerou gotas com nível de carga em torno de 5,0  $\mu\text{C/g}$ . Para efeito de comparação, Carroz & Keller (1978) obtiveram relação c/m de 5,6  $\mu\text{C/g}$ , com voltagem de indução de 30.000 V em bicos hidráulicos; Law (1978) encontrou relação c/m na ordem de 4,8  $\mu\text{C/g}$  com 2.000 V de voltagem de indução e aproximadamente 294 kPa de pressão de ar; Carlton & Bouse (1980) obtiveram 20  $\mu\text{C/g}$  usando voltagem de indução de 7.000 V, e Marchant (1985) encontrou relação c/m com valores próximos a 1  $\mu\text{C/g}$  utilizando voltagem de indução de 4.000 V.

### **3. CONCLUSÕES**

1) O bico pneumático eletrostático gera gotas com níveis de carga superiores a  $1 \mu\text{C/g}$ , quando pulveriza calda contendo água, óleo emulsionável e formulação de *Bacillus thuringiensis var. kurstaki*.

2) O nível carga das gotas depende da voltagem de indução, velocidade do ar e vazão do líquido, bem como do espaçamento entre o eletrodo de indução e a região de formação de gotas.

3) Os maiores níveis de carga são obtidos com voltagem de indução em torno de 1.000 volts.

4) O bico pneumático eletrostático pode ser adaptado em pulverizadores do tipo canhão para uso em florestas.

#### **4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- CARLTON, J. B.; BOUSE, L. F. Electrostatic spinner-nozzle for charging aerial sprays. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.22, n.6, p.1369-1377, 1980.
- CARROZ, J. W.; KELLER, P. N. Electrostatic induction parameters to attain maximum spray charge. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.21, n.1, p.63-69, 1978.
- 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 hipogae* L.). Jaboticabal: FACA-UNESP, 1984. 107 p. Tese de Mestrado.
- 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, 1998.
- COFFEE, R. A. Electrodynamics energy: a new approach to pesticide application. In: *BRITISH CROP PROTECTION CONFERENCE: PEST AND DISEASES, 1979*, Brighton. *Proceedings...* Croydon: BCPC, 1979. p.777-789.
- EMBRAPA, Brasília, DF; Aldemir Chaim. Pulverizador pneumático eletrostático costal acionado por alavanca manual. 27 de outubro de 1988. BR nº PI 8805580. 25 de outubro de 1994.
- ENDACOTT, C. J. Non-target organism mortality: a comparison of spraying techniques. In: *INTERNATIONAL CONGRESS OF PLANT PROTECTION, 10.*, 1983, Brighton. *Proceedings...* Croydon: BCPC, 1983, v.2, p. 502.
- FRASER, R. P. The fluid kinetics of application of pesticidal chemicals. *Advances in Pest Control Research*, New York, v.23, p.1-206, 1956.
- GRAHAM-BRYCE, I. J. Cop-protection: a consideration of effectiveness and disadvantages of current methods and the scope for improvement. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, London, v.281, p.163-179, 1977.

- HIMEL, C. M. The optimum size for insecticide spray droplets. **Journal of Economic Entomology**, College Park, v.62, n.4, p. 919-925, 1969.
- HIMEL, C. M.; MORE, A. D. Spray droplet size in control of spruce budworm, boll weevil, bollworm, and cabbage looper. **Journal of Economic Entomology**, College Park, v.62, n.4, p.916-918, 1969.
- HISLOP, F.C. Electrostatic ground-rig spraying: an overview. **Weed Technology**, North Dakota, v.2, p.94-104, 1988.
- LAW, S. E.; BOWEN, H. D. Charging liquid by electrostatic induction. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.9, n.4, p.94-105, 1966.
- LAW, S. E. Embedded-electrode electrostatic-induction spray nozzle: theoretical and engineering design. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.21, p.1096-1104, 1978.
- LAW, S. E.; COOPER, S. C. Induction charging characteristics of conductivity enhance vegetal-oil sprays. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.30. n.1, p.75-79, 1989.
- MARCHANT, J. A.; GREEN, R. A. An electrostatic charging system for hydraulic spray nozzles. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.27, p.386-392, 1982.
- MARCHANT, J. A. An electrostatic spinning disc atomiser. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.28, p. 386-392, 1985.
- McCARTNEY, H. A.; WOODHEAD, T. Electric-charge, image-charge forces and deposition of pesticide drops. **Pesticide Science**, Oxford, v.14. n.1, p.49-56, 1983.
- SHARP, R. B. Comparison of drift from charged an uncharged hydraulic nozzles. In: **BRITISH CROP PROTECTION CONFERENCE: PEST AND DISEASES**, 1984, Brighton. **Proceedings...** Croydon: BCPC, 1984. v.3, p.1027-1031.

# **Embrapa**

---

***Meio Ambiente***

