

**SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM  
MICROASPERSORES SOB CONDIÇÃO DE VENTO**

**MARCO ANTÔNIO FONSECA CONCEIÇÃO**

Tese apresentada à Escola Superior de  
Agricultura "Luiz de Queiroz",  
Universidade de São Paulo, para obtenção  
do título de Doutor em Agronomia, Área  
de Concentração: Irrigação e Drenagem.

**PIRACICABA**

**Estado de São Paulo - Brasil**

**Julho - 2002**

# **SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM MICROASPERSORES SOB CONDIÇÃO DE VENTO**

**MARCO ANTÔNIO FONSECA CONCEIÇÃO**

Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Tese apresentada à Escola Superior de  
Agricultura "Luiz de Queiroz",  
Universidade de São Paulo, para obtenção  
do título de Doutor em Agronomia, Área  
de Concentração: Irrigação e Drenagem.

**P I R A C I C A B A**

Estado de São Paulo - Brasil

Julho - 2002

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Conceição, Marco Antônio Fonseca  
Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento / Marco Antônio Fonseca Conceição. -- Piracicaba, 2002.  
110 p. : il.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.  
Bibliografia.

1. Distribuição de água 2. Irrigação por microaspersão 3. Vento I. Título

CDD 631.7

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

À minha esposa Maria Célia e aos meus filhos Pedro, Ana, Gabriel e André, pela inspiração e pelo carinho durante essa jornada.

*OFEREÇO*

Aos meus pais, Walda e Alceu, pelo apoio permanente durante toda a minha vida.

*DEDICO*

"...os que se voltam para a prática sem a ciência são como os marinheiros que embarcam sem timão e sem bússola e nunca sabem para onde vão."

Leonardo da Vinci

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela força necessária à realização de todos os empreendimentos.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária pela aprovação do meu pedido de pós-graduação e pelo apoio imprescindível à realização do curso.

À coordenação do programa de pós-graduação em Agronomia, área de Irrigação e Drenagem, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", pela minha aceitação no curso.

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudo.

Ao meu orientador Prof. Rubens Duarte Coelho pelo estímulo constante e pelo acompanhamento atencioso durante todo o curso.

Ao Dr. Jesús Montero Martinez, da Universidad Castilla-La Mancha, Espanha, por ter cedido o programa SIRIAS.

À empresa Irrigaplan Comércio e Representações Ltda. pela doação dos emissores utilizados nos ensaios experimentais.

Ao Prof. Marcos Vinícius Folegatti, coordenador do curso de Irrigação e Drenagem, pelo apoio dispensado desde o início.

Aos Professores Sérgio N. Duarte, do DER/ESALQ, Edson Matsura, da FEA/UNICAMP, e ao colega Dr. Eugênio F. Coelho, do CNPMF/EMBRAPA, pelas sugestões e correções do texto.

Aos Professores Angelocci, Durval, Frizzone, Pereira, Quirijn e Vetorazzi, pelas aulas enriquecedoras e pela amizade no dia-a-dia.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Rural e do Departamento de Ciências Exatas pela convivência proveitosa no período do curso.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, especialmente aos Srs. Gilmar e Hélio e às Sras. Davilmar e Vanda, e ao funcionário do Departamento de Ciências Exatas Sr. Lino, pelo apoio durante os trabalhos acadêmicos.

À Dra. Fátima Conceição Rezende pelas sugestões e colaboração nos ensaios experimentais.

Ao amigo e companheiro de curso Wellington Farias Araújo, pelo auxílio na coleta de dados e pela convivência fraterna de todas as horas.

Aos amigos Aderson, Anderson, Almiro, Moretti e Valdemício pela amizade e companheirismo ao longo de nossa permanência em Piracicaba.

A todos os companheiros de curso pelos bate-papos fundamentais a uma jornada harmoniosa.

Aos amigos da União Espírita de Piracicaba pelo apoio espiritual em todos os momentos.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	vii
SUMMARY.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Distribuição dos diâmetros de gotas .....	4
2.2 Distribuição de água na ausência de vento.....	11
2.3 Distribuição de água na presença de vento.....	13
2.4 Modelos para simulação da distribuição de água.....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 Descrição dos emissores.....	19
3.2 Determinação da distribuição dos diâmetros de gotas.....	20
3.3 Distribuição de água na ausência de vento.....	23
3.4 Distribuição de água na presença de vento.....	24
3.5 Simulações da distribuição de gotas e de água.....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1 Distribuição dos diâmetros de gotas.....	35
4.2 Distribuição de água dos microaspersores na ausência de vento.....	44
4.3 Distribuição da água na presença de vento.....	51
4.4 Simulação dos diâmetros de gotas.....	61
4.5 Simulação da distribuição de água na ausência de vento.....	66
4.6 Simulação da distribuição de água na presença de vento.....	75
4.7 Considerações finais.....	86
5 CONCLUSÕES.....	88
ANEXOS.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

# **SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM MICROASPERSORES SOB CONDIÇÃO DE VENTO**

Autor: MARCO ANTÔNIO FONSECA CONCEIÇÃO

Orientador: Prof. Dr. RUBENS DUARTE COELHO

## **RESUMO**

A ocorrência de ventos pode modificar a distribuição da água aplicada por microaspersores, comprometendo a eficiência e a uniformidade de aplicação. Os ensaios para avaliar essa distribuição são, geralmente, demorados sem que se consiga, muitas vezes, realizar as avaliações em todas as condições operacionais e ambientais necessárias. O uso de modelos matemáticos para simulações computacionais possibilita, assim, uma combinação mais diversificada e rápida das análises pretendidas. Apesar de ser considerada, normalmente, como um método de irrigação localizada, a microaspersão apresenta características hidráulicas e de operação mais próximas à aspersão do que ao gotejamento. Os modelos de simulação desenvolvidos para os sistemas de aspersão podem, assim, ser utilizados na microaspersão. O presente trabalho teve como objetivo geral, avaliar o desempenho de um modelo balístico, desenvolvido originariamente para sistemas de aspersão convencional, na simulação da distribuição de

água aplicada por microaspersores operando sob condição de vento. As avaliações experimentais foram realizadas em condições de laboratório empregando-se microaspersores da marca Dan 2001, com diâmetros de bocais iguais a 0,84 mm (violeta), 1,00 mm (cinza), 1,10 mm (marrom), 1,25 mm (azul), 1,33 mm (verde), 1,48 mm (laranja) e 1,75 mm (amarelo). Os bocais violeta, cinza e marrom trabalharam com rotor preto e os demais bocais trabalharam com rotor azul. O efeito do vento foi provocado artificialmente empregando-se um conjunto de quatorze ventiladores de 200 W de potência e 0,50 m de diâmetro interno. Para as simulações da distribuição de água foi utilizado o programa computacional SIRIAS (SIMulación de Riego por ASPersión), desenvolvido para aspersores convencionais e que se baseia na teoria balística das trajetórias de gotas. As simulações da distribuição de água na ausência de vento apresentaram desempenhos considerados ótimos para todos os bocais analisados. Por sua vez, o desempenho do modelo para simular a distribuição de água na presença de vento variou conforme o bocal e o rotor utilizado. Para os bocais que empregaram rotor preto, o desempenho foi classificado como péssimo para o de cor violeta e muito bom para os bocais cinza e marrom. Para os demais bocais que operaram com rotor azul o desempenho foi considerado regular.

# **SIMULATION OF MICROSPRINKLER WATER DISTRIBUTION UNDER WINDY CONDITION**

Author: MARCO ANTÔNIO FONSECA CONCEIÇÃO

Adviser: Prof. Dr. RUBENS DUARTE COELHO

## **SUMMARY**

Wind occurrence can modify water distribution by microsprinklers, reducing application efficiency and uniformity. Experimental tests to evaluate this distribution are, normally, cumbersome and frequently they can not be realized at all the operational and environmental conditions. The use of mathematical models for computational simulations permits, therefore, a more diversified and quickly combination of the intended analyses. Although it can be considered as a localized irrigation method, microsprinklers present operational and hydraulic characteristics closer to sprinkler than to drip irrigation. Simulations models developed for sprinkler systems can, therefore, be employed by microsprinklers. The present work had as a general objective the evaluating of a ballistic model, originally developed for sprinkler systems, on simulating water distribution by microsprinklers under windy condition. Experimental tests were carried out in laboratory using Dan 2001 microsprinklers with nozzle sizes of 0.84 mm (violet), 1.00 mm (gray), 1.10 mm (brown), 1.25 mm (blue), 1.33 mm (green), 1.48 mm

(orange) and 1.75 mm (yellow). The violet, gray and brown nozzles operated using black spin and the others used blue spin. The wind effect was artificially simulated using fourteen fans (200 W power). Computational simulations were run employing the software SIRIAS, that is based on a ballistic model originally developed for sprinkler systems. Water distribution simulations in conditions of wind absence presented excellent performance for all the analyzed nozzles. In the other side, the model performance for windy condition varied according the nozzle and the utilized spin. For the black spin nozzles the performance was classified as very bad, for the violet one, and very good, for the gray and brown nozzles. For the others nozzles, that operated with blue spin, the performance was considered as regular.

## **1 INTRODUÇÃO**

Na irrigação localizada a água é aplicada próxima à região radicular da cultura, procurando-se minimizar as perdas por evaporação direta. Os principais sistemas de irrigação localizada são os de gotejamento e de microaspersão. É comum a utilização da irrigação por gotejamento nas espécies cultivadas em fileiras, empregando-se a microaspersão naquelas que apresentam maior espaçamento entre plantas. Só na Flórida (EUA), por exemplo, existem cerca de 210.000 ha de citros irrigados por microaspersores (Boman & Parsons, 1999).

As perdas de água nos sistemas de microaspersão são, normalmente, maiores do que na irrigação por gotejamento. Isso ocorre devido à maior superfície molhada de solo e porque, na microaspersão, a água é lançada ao ar, ocorrendo perdas por evaporação direta e deriva pelo vento.

Os ventos podem comprometer a eficiência do sistema, havendo necessidade de se avaliar o seu efeito sobre a distribuição de água dos emissores, para adequá-los às condições ambientais em que operam. Os ensaios de distribuição são, entretanto, demorados e, nem sempre, as avaliações são realizadas em todas as condições operacionais e ambientais necessárias.

As simulações por meio de modelos matemáticos possibilitam maior rapidez e combinações mais diversificadas nas análises pretendidas. Esses modelos podem ser caracterizados como determinísticos ou estocásticos (Addiscott & Wagenet, 1985). Os modelos estocásticos se baseiam em condições que envolvem, freqüentemente, análises de probabilidades. Já nos modelos determinísticos assume-se que os processos estudados apresentam uma relação causal definida com os eventos observados.

Os modelos determinísticos podem, por sua vez, ser classificados como mecanísticos ou funcionais (Addiscott & Wagenet, 1985). Os modelos funcionais empregam relações simplificadas entre as variáveis, sem pretender explicar o fenômeno estudado, mas tão somente descrevê-lo. Os modelos mecanísticos se baseiam no conhecimento físico do fenômeno, sendo capazes de descrevê-los e, também, de explicá-los. Apesar desses modelos nem sempre conseguirem descrever com precisão a complexidade de determinados processos, eles sempre são úteis para o avanço da compreensão dos princípios físicos que regem os mesmos.

No caso de sistemas de aspersão, os modelos mecanísticos já desenvolvidos se baseiam na teoria física da trajetória balística das gotas emitidas pelos emissores. Como esses modelos simulam a distribuição de água a partir da trajetória individual das gotas lançadas pelo emissor, necessita-se determinar os diâmetros e a distribuição espacial dessas gotas para se utilizar esses modelos.

Apesar de ser considerada como um sistema de irrigação localizada, a microaspersão apresenta características hidráulicas e de operação mais próximas da aspersão do que do gotejamento, podendo-se, assim, empregar modelos desenvolvidos

para sistemas de aspersão para simular a distribuição de água em sistemas de microaspersão.

O presente trabalho teve como objetivo geral, avaliar o desempenho de um modelo balístico, desenvolvido originariamente para sistemas de aspersão convencional, na simulação da distribuição de água aplicada por microaspersores operando sob condição de vento. Os objetivos específicos foram:

- determinar as distribuições dos diâmetros de gotas emitidas por microaspersores de diferentes bocais;
- determinar a distribuição de água para os microaspersores na ausência e na presença de vento e comparar os resultados obtidos nas duas condições;
- simular, através de um modelo balístico, a distribuição dos diâmetros de gotas emitidas pelos microaspersores e comparar os valores simulados com os obtidos experimentalmente;
- simular, através de um modelo balístico, a distribuição de água aplicada pelos microaspersores na ausência de vento e comparar os valores simulados com os obtidos experimentalmente;
- simular, através de um modelo balístico, a distribuição de água aplicada pelos microaspersores na presença de vento e comparar os valores simulados com os obtidos experimentalmente.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Distribuição dos diâmetros de gotas**

A distribuição de água em condições de vento é diretamente afetada pelos diâmetros de gotas aplicadas pelos emissores. Edling (1985), por exemplo, empregando um modelo de simulação, observou que para uma velocidade de vento igual a  $4,5 \text{ m s}^{-1}$ , as gotas de 0,3 mm de diâmetro apresentaram uma distância de deriva superior a duas vezes as apresentadas pelas gotas de 0,6 mm de diâmetro.

A determinação dos diâmetros de gotas pode ser feita empregando-se diferentes métodos.

Hall (1970) apresenta o método da mancha, em que as gotas são coletadas em uma superfície absorvente e o seu diâmetro é obtido comparando-se o tamanho das manchas formadas na superfície com manchas produzidas previamente a partir de gotas de diâmetros conhecidos. O autor não recomendou o uso desse método para gotas com diâmetros inferiores a 1,0 mm.

Eigel & Moore (1983) apresentam o método do óleo, em que as gotas são coletadas em uma placa de Petri com óleo e fotografadas para determinação posterior de

seus diâmetros. Apesar desse método não necessitar de calibração prévia, ele requer equipamentos sofisticados e de maior custo (Vilela, 1995).

O método do 'momentum' emprega sensores para obter a velocidade e a massa das gotas aplicadas, determinando-se indiretamente os seus diâmetros. Além do uso de equipamentos caros, o método não apresenta boa sensibilidade para a determinação de gotas menores, sendo mais aplicado para determinação da energia cinética de precipitações pluviométricas (Eigel & Moore, 1983).

Equipamentos a laser podem ser, também, utilizados para a determinação do diâmetro de gotas. Kohl et al. (1985) alertam, entretanto, para a possibilidade de erro do equipamento quando ele registra duas ou mais gotas pequenas como sendo uma gota de maior diâmetro. Além do alto custo desses equipamentos (Vilela, 1995), a sua precisão para avaliações na irrigação por aspersão assemelha-se às obtidas com o método da farinha (Kincaid et al., 1996; DeBoer et al., 2001).

O método da farinha é um dos mais empregados para se determinar a distribuição dos diâmetros de gotas em sistemas de irrigação por aspersão, devido à sua simplicidade e ao seu baixo custo.

Carter et al. (1974) descreveram esse método. Nele as gotas são coletadas em recipientes contendo farinha de trigo previamente seca em estufa, formando pequenos grânulos. Esses grânulos são, posteriormente, secados e peneirados em malhas de diferentes diâmetros determinando-se, então, a massa média dos grânulos referentes a cada peneira. Os diâmetros médios de gotas são obtidos a partir de uma expressão matemática em função da massa média dos grânulos.

No método da farinha é necessária uma calibração prévia para obter-se a relação entre as massas dos grânulos e os diâmetros de gotas previamente conhecidos. Com essa relação poderão ser determinados os diâmetros médios de gotas a partir dos grânulos coletados nos ensaios experimentais. As relações, contudo, determinadas por diferentes autores resultaram em valores muito próximos de diâmetros de gotas para determinada massa de grânulo, como pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1. Relações entre diâmetros de gotas (mm) e massas de grânulo de farinha de trigo (mg) obtidas por diferentes autores.

AUTOR	MASSA DO GRÂNULO (mg)							
	0,01	0,05	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
1*	0,267	0,457	0,576	0,726	0,914	1,046	1,152	1,241
2*	0,247	0,437	0,558	0,713	0,912	1,052	1,165	1,261
3*	0,268	0,461	0,582	0,734	0,927	1,062	1,170	1,261
4*	0,247	0,437	0,558	0,712	0,910	1,050	1,162	1,257
5*	0,269	0,458	0,576	0,724	0,911	1,042	1,146	1,234
MÉDIA	0,260	0,450	0,570	0,722	0,915	1,050	1,159	1,251
CV (%)	4,439	2,657	1,969	1,286	0,763	0,717	0,845	0,999

\*Autores: 1 - Carter et al. (1974); 2 - Kohl (1974); 3 - Hills & Gu (1989); 4 - Oliveira (1991); 5 - Matsura (1993)

Esses resultados demonstram que qualquer das relações apresentadas permite a obtenção dos diâmetros de gotas com diferenças, em milímetros, apenas na segunda casa decimal.

Vários estudos foram desenvolvidos para se determinar a distribuição dos diâmetros de gotas em sistemas de irrigação por aspersão. Nesses estudos foram empregados diferentes métodos de determinação, sobressaindo-se, contudo, o método da farinha.

Kohl (1974), utilizando o método da farinha, observou que para aspersores de tamanho médio o tamanho da gota diminuiu com o aumento da velocidade relativa da água no ar, com a redução dos bocais e com o aumento da pressão.

Kohl & DeBoer (1984) estudaram em laboratório a distribuição de gotas de um aspersor de baixa pressão do tipo spray de 360° com diâmetros de bocais variando de 4,8 mm a 9,5 mm, pressão de 50 kPa a 200 kPa e placas defletoras com geometria lisa e com ranhuras. Os aspersores ficaram a 2,80 m de altura em relação aos recipientes com farinha de trigo. As gotas menores, por apresentarem maiores coeficientes de arraste, caíram a distâncias mais próximas ao aspersor. A pressão de serviço apresentou uma influência reduzida na distribuição do tamanho de gotas, sendo que os maiores diâmetros foram iguais a 2,4 mm e 2,1 mm para as pressões de 50 kPa e 200 kPa, respectivamente. A distribuição das gotas mostrou-se mais sensível ao diâmetro do bocal sendo que, sob uma pressão de 100 kPa, o diâmetro máximo aumentou de 2,2 mm para 3,5 mm quando o bocal passou de 4,8 mm para 9,5 mm, respectivamente. A geometria da placa defletora foi o elemento que mais influenciou a distribuição do tamanho das gotas, sendo que a placa lisa produziu as gotas de menor diâmetro.

Dadio & Wallender (1985) determinaram a distribuição dos diâmetros de gotas para aspersores de baixa pressão trabalhando com bocais circulares e não circulares. O

método empregado para essa determinação foi o da farinha, adaptado da metodologia apresentada por Kohl (1974). O diâmetro médio de gotas encontrado para o bocal não circular foi superior ao obtido para o bocal circular. Os autores verificaram que, apesar dos diâmetros de gotas apresentarem relações inversamente proporcionais às velocidades dos jatos de água, essas relações não foram idênticas para os dois tipos de bocais estudados, mostrando a necessidade de se conhecer melhor o mecanismo de formação de gotas em bocais não circulares.

Solomon et al. (1985) apresentaram dados de literatura e coletaram valores de diâmetros de gotas para aspersores do tipo spray, que são utilizados, principalmente, em sistemas de pivô central. Nos ensaios desenvolvidos pelos autores as gotas foram obtidas pelo método da mancha. Entre os dados fornecidos pelos fabricantes de equipamentos, apresentaram-se valores de diâmetro de gotas variando de 0,23 mm, para bocal de 0,8 mm e pressão de 414 kPa; a 1,89 mm, para bocal de 6,5 mm e pressão de 34 kPa. Com base nos diversos valores obtidos, os autores desenvolveram um modelo de regressão simples para estimar a distribuição das gotas em função do tipo e tamanho do bocal e da pressão de serviço.

Carvalho (1991) determinou a distribuição do tamanho de gotas para dois aspersores de média pressão utilizando o método da farinha. Um dos aspersores possuía dois bocais com ângulo de inclinação de  $30^\circ$ , sendo testados bocais entre 4,5 mm e 8,5 mm de diâmetro. O outro aspersor foi estudado com e sem retificador de fluxo, e possuía dois bocais com ângulo de  $23^\circ$ , tendo sido testados bocais entre 2,4 mm e 6,2 mm de diâmetro. Os aspersores foram instalados a 1,5 m de altura e trabalharam com pressões

de serviço entre 200 kPa e 500 kPa. O diâmetro médio de gotas aumentou com o raio de alcance do jato, tendo-se registrado um valor máximo de diâmetro igual a 5,77 mm a uma distância radial de 19,0 m, para o aspersor de 30° com bocais de 6,0 mm x 8,5 mm e pressão de serviço de 200 kPa. Os menores diâmetros médios registrados foram iguais a 0,58 mm, tendo sido coletados a uma distância de 1,0 m do mesmo aspersor citado anteriormente. Foram ajustadas equações de regressão linear múltipla para estimar o diâmetro de gota em função da distância, da pressão de serviço e do diâmetro do bocal. O autor concluiu que o retificador de fluxo, o diâmetro do bocal e a pressão de serviço exerceram influência no tamanho das gotas, sendo a pressão o fator que maior efeito apresentou, seguida do diâmetro do bocal.

Oliveira (1991) estudou a distribuição de gotas, usando o método da farinha, para um aspersor fixo com placas defletoras lisas, côncavas e convexas. O aspersor foi instalado a uma altura de 3,7 m, sendo testados 36 diâmetros de bocais, que variaram entre 1,8 mm e 9,6 mm. A pressão de serviço foi mantida em 135 kPa. Para o bocal menor (1,8 mm) as gotas apresentaram diâmetros inferiores a 1,0 mm, enquanto que para o maior bocal (9,6 mm) elas chegaram a alcançar 3,5 mm de diâmetro. Observou-se que o uso de placas estriadas proporcionou gotas de tamanho duas vezes maior do que as obtidas com placas lisas.

Mergulhão (1992) obteve as distribuições dos tamanhos de gotas através do método da farinha para dois modelos de aspersores do tipo canhão hidráulico, com ângulo de inclinação igual a 24°. Foram testados bocais entre 12,7 mm e 20,3 mm, em um dos aspersores; e entre 14,0 x 6,0 mm e 20,0 x 7,0 mm, no outro. O tamanho médio

de gotas ficou, em geral, entre 1,9 mm e 3,0 mm. Foram registradas gotas de diâmetro máximo de, aproximadamente, 6,0 mm. Observou-se que bocais de menor diâmetro sob baixas pressões de serviço podem produzir gotas de diâmetros superiores às produzidas por bocais maiores sob altas pressões.

Matsura (1993) estudou a distribuição dos diâmetros de gotas aplicadas por um canhão hidráulico com diâmetro de bocal igual a 22,61 mm, pressão de serviço de 400 kPa e alcance máximo do jato igual a 44,0 m. Os diâmetros médios de gotas variaram entre 0,61 mm e 4,73 mm. Para todas as distâncias em que foram posicionados os coletores, verificou-se uma preponderância percentual do número de gotas de 0,61 mm de diâmetro sobre as demais. Observou-se, contudo, que os maiores percentuais referentes às massas totais foram de gotas de diâmetros entre 1,30 mm e 2,52 mm, para distâncias até 20 m; e diâmetros entre 1,30 mm e 3,06 mm, para distâncias entre 20 m e 40 m.

Li et al. (1994) empregaram aspersores com bocais circulares e não-circulares para determinar a distribuição do tamanho das gotas, utilizando-se o método da farinha. Os aspersores apresentaram ângulo de inclinação de  $27^\circ$  e trabalharam com pressões entre 196 kPa e 392 kPa. Foram testados bocais circulares de 6,5 mm a 6,9 mm de diâmetro; bocais quadrados com lados entre 15,8 mm e 27,3 mm; e um bocal retangular duplo com dimensões de orifício igual a 3,3 mm x 7,2 mm. Os diâmetros máximos de gotas registrados ficaram ao redor de 4,0 mm. Os bocais circulares apresentaram, normalmente, maiores raios molhados e diâmetros de gotas maiores do que os não-circulares, que proporcionaram maiores percentagens de gotas com diâmetros abaixo de

3,0 mm. Os autores apresentaram um modelo exponencial para descrever a distribuição de gotas para os dois tipos de bocais.

Del Pino et al. (2000) apresentaram a distribuição do diâmetro de gotas aplicadas por um aspersor escamoteável operando sob diferentes pressões de serviço. Os autores verificaram que apesar dos diâmetros médios de gotas aumentarem com a distância ao aspersor, essa variação não foi muito acentuada, sendo que os diâmetros ficaram, em geral, entre 1,0 mm e 1,5 mm.

## **2.2 Distribuição de água na ausência de vento**

A distribuição de água em sistemas de aspersão tem sido estudada há mais tempo, enquanto que para os microaspersores as informações são em menor número e obtidas mais recentemente.

Nascimento et al. (1992) avaliaram as características hidráulicas e de distribuição de água de sete diferentes tipos de microaspersores de fabricação nacional. Os autores observaram que para um emissor do tipo difusor operando isoladamente a uma pressão de 150 kPa e com raio efetivo igual a 1,80 m, a intensidade de precipitação ao longo do raio variou entre 1,0 mm h<sup>-1</sup> e 17,0 mm h<sup>-1</sup>, com os maiores valores se situando ao redor de 0,70 m de distância do difusor. Já outro modelo de microaspersor empregando rotor e com uma pressão de serviço igual a 100 kPa, obteve-se um raio efetivo igual a 3,30 m e intensidades de precipitação entre 90,0 mm h<sup>-1</sup>, junto ao emissor, e valores inferiores a 5,0 mm h<sup>-1</sup>, a partir de 0,50 m de distância.

Sampaio et al. (1996) apresentaram a distribuição de água para microaspersores NAAN 7110 operando com rotores e difusores, sem mecanismo de autoregulação de vazão. As lâminas foram coletadas em recipientes dispostos radialmente com espaçamento de 0,60 m. Os autores observaram que os rotores proporcionaram raios de alcance três vezes maiores do que os obtidos pelos difusores, que apresentaram intensidades de precipitação até vinte vezes maiores do que as registradas com os rotores. Os perfis de distribuição para os dois tipos de emissores apresentaram uma maior taxa de precipitação para as distâncias radiais de até 1,0 m. As distribuições espaciais de água empregando-se os rotores mostraram-se mais uniformes do que as obtidas utilizando-se os difusores, que promoveram maior concentração de água próxima ao emissor.

Nascimento et al. (1999) obtiveram o perfil de distribuição para o microaspersor Rain-Bird QN-14 na ausência de vento. Sob uma pressão de 150 kPa, o perfil apresentou uma distribuição em forma de uma exponencial cúbica, concentrando os maiores valores da intensidade de aplicação entre 1,5 m e 3,0 m a partir do emissor.

Matos et al. (1999) obtiveram o perfil de distribuição do microaspersor rotativo autocompensante Dan 2001, com bocal igual a 0,9 mm e pressão de serviço de 200 kPa. Os coletores foram posicionados em quatro semi-eixos ortogonais, distando 0,30 m entre si. O raio efetivo foi igual a 2,25 m, apresentando uma intensidade pluvial máxima na região mais próxima ao emissor, com redução gradativa a partir daí. A uma distância de 1,05 m a intensidade aumentou ligeiramente, voltando a decrescer até a extremidade correspondente ao raio molhado máximo.

Holanda Filho et al. (2000) avaliaram o microaspersor Rondo com vazão de 50 L h<sup>-1</sup> de fabricação da Plastro. O perfil de distribuição do microaspersor para uma pressão de 200 kPa apresentou baixos valores de precipitação próximo ao emissor, aumentando até um valor máximo de 4,0 mm h<sup>-1</sup> a cerca de 0,45 m e diminuindo, a partir daí, praticamente de forma linear até a uma distância máxima de 3,3 m.

Ledur & Vilas Boas (2001) avaliaram microaspersores Dan Sprinklers do tipo modular com rotor e bocais com diâmetros iguais a 0,82 mm, 0,94 mm e 1,16 mm. A distribuição de água foi estudada com as pressões de 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa e 250 kPa, ficando os microaspersores a uma altura de 0,50 m do solo. Em relação à distribuição de água no perfil, para uma pressão de serviço de 150 kPa, ajustou-se uma função polinomial de sexta ordem com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,989. Verificou-se que para os coletores mais próximos do emissor houve uma redução acentuada da precipitação, seguindo-se de uma alternância de valores baixos e altos.

### **2.3 Distribuição de água na presença de vento**

Vários fatores afetam a distribuição de água aplicada por aspersores, entre eles a pressão de serviço; o diâmetro dos bocais; a geometria e a rugosidade dos orifícios; a inclinação de lançamento do jato; a velocidade do jato; a altura do emissor em relação ao solo; a estabilidade da haste de sustentação do emissor; e fatores climáticos, principalmente a velocidade e a direção do vento (Bilanski & Kidder, 1958; Pair, 1968; Raposo, 1980).

A ocorrência de ventos durante a aplicação de água em sistemas de aspersão, ou microaspersão, faz aumentar as perdas por evaporação e deriva, além de afetar a uniformidade de distribuição espacial de água. Vários estudos foram realizados sobre a distribuição e as perdas de água em sistemas de aspersão sob condições de vento (Christiansen, 1942; Frost & Schwalen, 1955; Sternberg, 1967; Seginer & Kostrinski, 1975; Yazar, 1984; Kohl et al., 1987; Faci & Bercero, 1991; Paz et al., 1991; Abo-Ghobar, 1992; Alves et al.; 1997b; Pereira et al., 1997; Bernuth, 1988; Azevedo et al., 1999; Tarjuelo et al., 1999; McLean et al., 2000; Faci et al., 2001).

Ao contrário da irrigação por aspersão, contudo, poucos trabalhos foram desenvolvidos para se estudar o efeito do vento sobre a distribuição de água aplicada por microaspersores.

Alves et al. (1997a) determinaram a distribuição de água de um microaspersor de longo alcance com espaçamento de 6,0 m x 12,0 m, diâmetro de bocal igual a 2,0 mm, em três alturas de instalação (0,30 m; 1,00 m e 2,00 m do solo) e três velocidades médias de vento ( $0,53 \text{ m s}^{-1}$ ;  $1,62 \text{ m s}^{-1}$  e  $2,58 \text{ m s}^{-1}$ ). Para a altura de 0,30 m as perdas por evaporação e deriva variaram entre 12,1% e 21,2%; para a altura de 1,00 m elas ficaram entre 20,1% e 27,9%; e a 2,00 m de altura as perdas se situaram entre 28,6% e 33,4%, sendo que os valores das perdas foram proporcionais à velocidade do vento em todos os casos.

Dantas Neto et al. (1997) estudaram o comportamento do microaspersor NAAN 7110, na presença e na ausência de vento. Os ensaios com vento foram realizados com a pressão de serviço igual 200 kPa, representando uma vazão de, aproximadamente,  $40 \text{ L h}^{-1}$ . Os autores observaram que a velocidade do vento não influenciou o diâmetro médio

molhado do microaspersor. As precipitações médias coletadas, entretanto, diminuíram com o aumento da velocidade do vento, que foi medida a uma altura de 0,50 m do solo. Para velocidades na faixa de até  $0,56 \text{ m s}^{-1}$ , a precipitação média foi de  $2,45 \text{ mm h}^{-1}$ . Essa precipitação chegou a  $1,53 \text{ mm h}^{-1}$ , quando a velocidade do vento ficou entre  $1,67 \text{ m s}^{-1}$  e  $2,22 \text{ m s}^{-1}$ .

Medeiros et al. (1998) avaliaram a influência do vento na eficiência potencial de aplicação referente ao microaspersor Naan 7110, operando em condições de campo. Para a realização dos ensaios foram instaladas duas linhas de pluviômetros perpendiculares entre si, ficando o microaspersor na intersecção das mesmas. O cálculo da eficiência foi obtido dividindo-se os volume coletado e aplicado pelo emissor. Os autores observaram que a eficiência diminuiu com o aumento da velocidade do vento, registrando-se perdas por evaporação iguais a 20,6% e 24,38% para velocidades de  $1,9 \text{ m s}^{-1}$  e  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente.

Souza et al. (2001) estudaram a influência da inclinação da haste e da ação do vento sobre microaspersores DAN 2001 autocompensantes com rotor. Os bocais estudados foram os de cores violeta, verde e amarelo, com diâmetros iguais a 0,84 mm, 1,33 mm e 1,75 mm. As inclinações estudadas foram as de  $90,0^\circ$ ,  $78,7^\circ$ ,  $67,5^\circ$  e  $45,0^\circ$  em relação à horizontal. Observou-se que, em geral, a razão entre os volumes coletados com vento e sem vento aumentaram com a redução da inclinação da haste, devido à maior concentração do jato nas regiões mais próximas ao microaspersor. As maiores razões corresponderam ao bocal amarelo variando entre 86% e 96%, e as menores foram observadas para o bocal violeta com valores entre 42% e 75%.

## 2.4 Modelos para simulação da distribuição de água

Os modelos matemáticos para simulação da distribuição de água aplicada por aspersores foram desenvolvidos no intuito de facilitar o estudo dessa distribuição sob diferentes condições operacionais e ambientais.

Alguns autores apresentaram nomogramas ou modelos de regressão para se estimar as perdas por evaporação e deriva a partir de variáveis ambientais e, ou, operacionais (Frost & Schwalen, 1955; Dylla & Shull, 1983; Yazar, 1984; Faci & Bercero, 1991; Paz et al., 1991; Azevedo et al., 1999; Tarjuelo et al., 1999; Tarjuelo et al., 2000; Faci et al., 2001).

Por outro lado, diversos autores desenvolveram modelos mecânicos baseados na teoria da trajetória balística de gotas, para estudo da distribuição de água aplicada por aspersores.

Seginer (1971) apresentou um desenvolvimento teórico para estudo das perdas de água por deriva e evaporação na irrigação por aspersão, juntamente com um ensaio em que as perdas foram determinadas para várias condições meteorológicas e operacionais. A análise teórica permitiu concluir que para as condições estudadas a evaporação das gotas foi desprezível quando comparada à deriva pelo vento.

Fukui et al. (1980) apresentaram um modelo para avaliar a taxa de aplicação de água e o coeficiente de uniformidade para sistemas de irrigação operando em condições de vento com sobreposições de áreas de influência dos emissores. As variáveis de entrada do modelo incluíram o espaçamento dos aspersores e o perfil de precipitação

dos aspersores operando individualmente na ausência de vento. O modelo permitiu otimizar a distribuição espacial dos aspersores para minimizar os efeitos de deriva pelo vento e reduzir a influência da pressão de serviço sobre a uniformidade de distribuição.

Edling (1985) desenvolveu um modelo para estimar a energia cinética, a evaporação e a deriva pelo vento de gotas aplicadas por aspersores de baixa pressão. As estimativas de evaporação para diferentes velocidades do vento e altura dos bocais indicaram uma alta dependência desses parâmetros. A energia cinética das gotas para bocais a pequenas elevações apresentou valores relativamente baixos. A deriva de gotas pequenas pelo vento foi grande para bocais elevados e altas velocidades do vento.

Vories et al. (1987) apresentaram um modelo para simular a operação de um sistema de irrigação em condições de vento. O modelo emprega a distribuição dos diâmetros de gotas para prever a distribuição de um único aspersor. Posteriormente, por meio de superposições, simula-se a distribuição para um sistema de aspersão no campo, estimando-se os coeficientes de uniformidade. O modelo foi validado comparando-se os valores simulados com resultados experimentais.

Seginer et al. (1991) apresentaram um método para simular a distribuição de água de um aspersor sob efeito de ventos. Os autores introduziram um fator (K) para corrigir o coeficiente de resistência aerodinâmica empregado nos modelos balísticos. A concordância entre valores simulados e medidos aumentou com o emprego desse fator. Os resultados demonstraram que o modelo pode ser empregado, com pequenos percentuais de erros, para velocidades de vento de até  $8,0 \text{ m s}^{-1}$ .

Soares et al. (1991) desenvolveram um programa computacional baseado na teoria balística para simular dados de precipitação de aspersores trabalhando em

diferentes declividades do terreno e com diversas alturas de haste. Os autores constataram que a haste do aspersor deve permanecer perpendicular à superfície do solo para maximizar a uniformidade de aplicação e minimizar o risco de erosão.

Matsura (1993) desenvolveu um modelo com base na teoria balística para descrever a trajetória de um jato aplicado por um canhão hidráulico. O autor observou que nos modelos balísticos tradicionais o diâmetro de gotas está diretamente relacionado à distância ao emissor, não explicando a obtenção de gotas de menor diâmetro a maiores distâncias em relação ao emissor. O autor apresentou uma modificação na teoria original para considerar o fracionamento contínuo das gotas ao longo do percurso.

Tarjuelo et al. (1994) desenvolveram um modelo de simulação para distribuição de água por aspersão em condições de ocorrência de vento. O modelo se baseia no método apresentado por Seginer et al. (1991), modificando-o no cálculo de alguns parâmetros, principalmente na correção do coeficiente de arraste. Ao invés do fator  $K$  apresentado por Seginer et al. (1991), os autores empregaram dois novos fatores de ajuste ( $K_1$  e  $K_2$ ) corrigir o coeficiente de arraste. Observou-se um bom ajuste entre os dados experimentais e os simulados, sendo que as diferenças entre os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) medidos e estimados foram menores que 1% em 40% dos casos estudados.

D'Ávila et al. (2000) desenvolveram um programa computacional para simular a uniformidade de distribuição de aspersores sob os efeitos de diferentes condições de vento e de inclinações da superfície do solo. De um modo geral, os autores consideraram que as simulações apresentaram desempenhos satisfatórios quando comparadas aos valores experimentais.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Descrição dos emissores

Todas as avaliações experimentais foram realizadas no laboratório de irrigação do Departamento de Engenharia Rural (DER) da ESALQ/USP em Piracicaba, SP. Foram utilizados microaspersores autocompensantes com rotores, da marca DAN 2001 (Figura 1), operando a uma pressão de serviço igual a 250 kPa, ângulo de lançamento do jato igual a  $17^\circ$  e vazões nominais iguais a  $20 \text{ L h}^{-1}$  (bocal violeta),  $28 \text{ L h}^{-1}$  (bocal cinza),  $35 \text{ L h}^{-1}$  (bocal marrom),  $47 \text{ L h}^{-1}$  (bocal azul),  $55 \text{ L h}^{-1}$  (bocal verde),  $70 \text{ L h}^{-1}$  (bocal laranja) e  $95 \text{ L h}^{-1}$  (bocal amarelo).



Figura 1 - Microaspersor Dan 2001 com rotor.

Os respectivos diâmetros dos bocais são 0,84 mm (violeta), 1,00 mm (cinza), 1,10 mm (marrom), 1,25 mm (azul), 1,33 mm (verde), 1,48 mm (laranja) e 1,75 mm (amarelo). Os bocais violeta, cinza e marrom trabalharam com rotor preto, que proporcionou um menor raio de alcance. Os demais bocais trabalharam com rotor azul, de maior raio de alcance. As relações pressão-vazão referentes aos bocais estudados, estão apresentadas no Anexo A.

### **3.2 Determinação da distribuição dos diâmetros de gotas**

A determinação da distribuição do diâmetro de gotas foi efetuada empregando-se o método da farinha, semelhante ao descrito por Oliveira (1991). A farinha de trigo foi previamente peneirada em malha de 0,297 mm (# 50) e seca em estufa a 105 °C, sendo, posteriormente, acondicionada em bandejas plásticas de 14 cm de diâmetro. As bandejas foram distribuídas ao longo do raio de alcance dos microaspersores em três direções perpendiculares entre si, às distâncias de 0,40 m, 0,80 m, 1,20 m, 1,60 m, 2,00 m, 2,40 m, 2,80 m e 3,20 m do microaspersor (Figura 2).

O tempo de coleta das gotas foi de, aproximadamente, cinco segundos para cada bocal, evitando-se a sobreposição de gotas nas bandejas. O microaspersor ficou coberto com um tubo de PVC que foi retirado durante o período de coleta e recolocado imediatamente após a mesma.

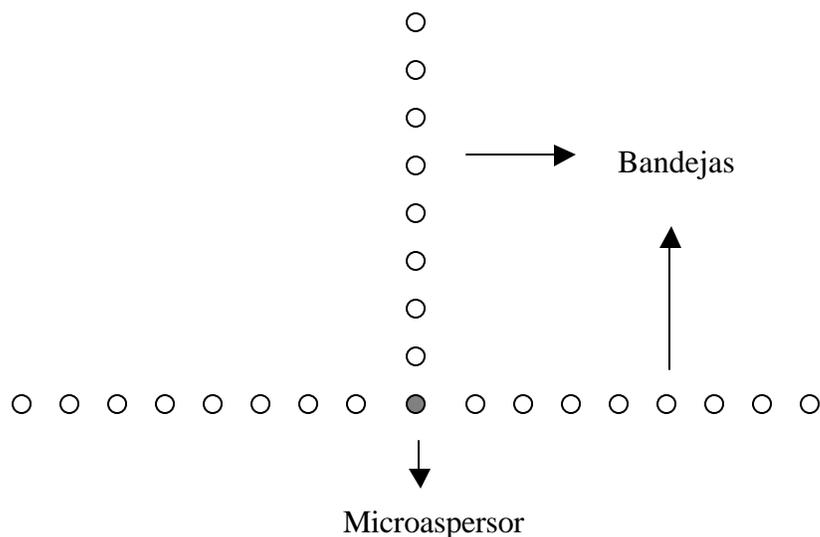


Figura 2 - Esquema ilustrando a distribuição das bandejas com farinha de trigo para coleta de gotas.

As três bandejas correspondentes a cada distância em relação ao microaspersor foram reunidas em sacos plásticos, sendo posteriormente peneiradas em malha # 50, obtendo-se os grânulos correspondentes às gotas coletadas. Os grânulos foram armazenados em latas de alumínio e deixados para secar ao ar durante 24 h, sendo posteriormente secados em estufa a 105 °C, também durante 24 h.

Os grânulos secos foram peneirados em malhas de 2,00 mm (# 10), 1,68 mm (# 12), 1,19 mm (# 16), 1,00 mm (# 18), 0,84 mm (# 20), 0,59 mm (# 30), 0,50 mm (# 35), 0,42 mm (# 40) e 0,297 mm (# 50), determinando-se, então, a massa do conjunto e o total de grânulos retidos em cada peneira. Dividindo-se a massa pelo total de grânulos determinou-se a massa média correspondente a cada peneira.

O número percentual de gotas relativo a cada distância radial foi determinado considerando-se o perfil coletado e a área do anel circular correspondente a cada bandeja coletora. Cada anel circular, referente às distâncias radiais dos coletores ao emissor, representa uma área que é diretamente proporcional ao raio. Dessa maneira, a quantidade de gotas coletadas considerando-se a área circular de cada coletor, apresentou uma distribuição diferente daquela considerando-se apenas o total de gotas coletados ao longo do perfil.

Os diâmetro médios das gotas retidas foram determinados segundo a seguinte expressão (Oliveira, 1991):

$$d = 1,257 m^{0,353} \quad (1)$$

em que:

d - diâmetro de gota, mm;

m - massa do grânulo, mg.

De posse dos diâmetros médios das gotas e do percentual de cada diâmetro, considerando-se a área circular correspondente, calculou-se o volume percentual de água aplicado, referente aos diversos diâmetros de gotas, para cada bocal analisado. Para se calcular esse volume considerou-se as gotas como tendo formato esférico.

Considerando-se os valores acumulados do volume de água aplicado em função dos diâmetros de gotas obteve-se, para cada bocal, o diâmetro médio de gotas (dm) que correspondeu a um percentual acumulado igual a 50%.

### 3.3 Distribuição de água na ausência de vento

Para se determinar os perfis de distribuição dos microaspersores na ausência de vento foram empregados coletores de 0,085 m de diâmetro e 0,13 m de altura, dispostos radialmente a partir do microaspersor, com distâncias de 0,20 m entre eles.

Foram utilizadas três séries radiais de coletores, com disposição semelhante à das bandejas utilizadas para determinação dos diâmetros de gotas (Figura 2). O perfil correspondente a cada emissor foi obtido a partir das médias calculadas com base nas três séries de pluviômetros. O volume coletado em cada pluviômetro foi determinado empregando-se provetas com precisão de 0,1 mL. As intensidades de precipitação ( $I_p$ ) foram obtidas dividindo-se o volume coletado pela respectiva área do pluviômetro e pelo tempo de duração do ensaio.

Os volumes referentes às áreas de abrangência de cada coletor foram determinados multiplicando-se os valores de  $I_p$  pelas áreas dos anéis circulares correspondentes. Os limites de cada anel foram representados pelos raios correspondentes às metades das distâncias entre o coletor analisado e os coletores anterior e posterior. Assim, por exemplo, o anel circular referente ao coletor colocado a 1,20 m do microaspersor tinha como raio interno e externo, respectivamente, 1,10 m (metade entre 1,20 m e 1,00 m) e a 1,30 m (metade entre 1,20 m e 1,40 m). O primeiro coletor foi considerado como correspondente a uma área circular com raio igual a 0,30 m (metade entre 0,20 m e 0,40 m).

Os ensaios tiveram duração de uma hora cada um e foram realizados no período inicial da manhã, em condições de temperatura amena e alta umidade relativa do ar, ficando os bocais dos microaspersores a uma altura de 0,38 m do solo.

Antes de cada ensaio foram determinadas as vazões dos emissores pelo método volumétrico, empregando-se uma balança digital para se obter a massa de água coletada que, multiplicada pela massa específica da água, resultou no volume correspondente. A massa específica foi considerada como sendo igual a  $1 \text{ kg dm}^{-3}$ .

### **3.4 Distribuição de água na presença de vento**

O efeito do vento foi provocado artificialmente empregando-se um conjunto de quatorze ventiladores de 200 W de potência e 0,50 m de diâmetro interno. Os ventiladores foram colocados em duas fileiras sobrepostas com sete ventiladores em cada uma (Figura 3). Considerando-se o centro de cada ventilador, a fileira inferior ficou a uma distância de 0,50 m e a superior ficou a 1,20 m do piso do laboratório. Essa disposição em duas fileiras visou fazer com que o fluxo de ar da fileira inferior incidisse sobre o microaspersor em uma direção paralela ao solo.

A velocidade do vento foi determinada utilizando-se um anemômetro digital portátil, fazendo-se dez leituras a uma altura igual a 0,38 m (altura do bocal do microaspersor), em cada ponto referente à localização dos pluviômetros, que ficaram espaçados em uma malha de 0,50 m x 0,50 m de distância. Como velocidade de referência foi utilizada a velocidade média registrada sobre o perfil onde encontrava-se o microaspersor.

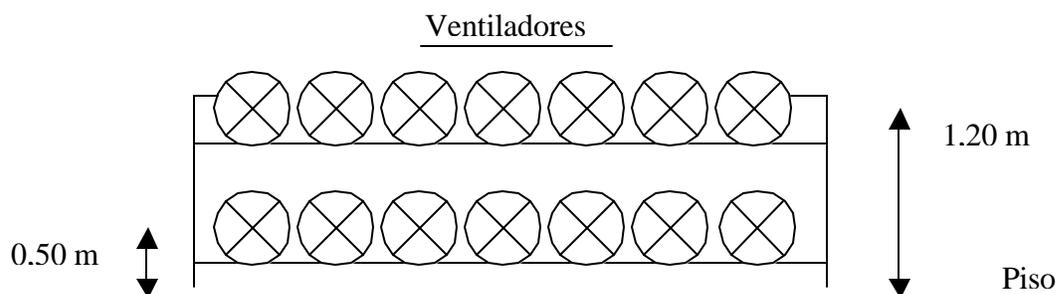


Figura 3 - Esquema representativo da bateria de ventiladores empregada nos ensaios.

A distribuição de água foi determinada empregando-se coletores plásticos de 0,085 m de diâmetro e 0,13 m de altura, espaçados em 0,50 m x 0,50 m, ocupando a metade da área de abrangência do microaspersor paralela à direção do vento (Figura 4). A primeira fileira de ventiladores ficou a uma distância de 1,35 m da bateria de ventiladores. O número de coletores na direção contrária ao vento foi menor do que na direção a favor do vento, uma vez que em ensaios preliminares verificou-se que a distribuição de água com vento tornava-se assimétrica.

A avaliação do efeito do vento sobre a distribuição de água foi efetuada considerando-se as intensidades de precipitação nos pluviômetros referentes às áreas de abrangência dos microaspersores na presença e na ausência de vento. Os critérios comparativos empregados foram as relações entre as áreas e os volumes registrados com e sem vento.

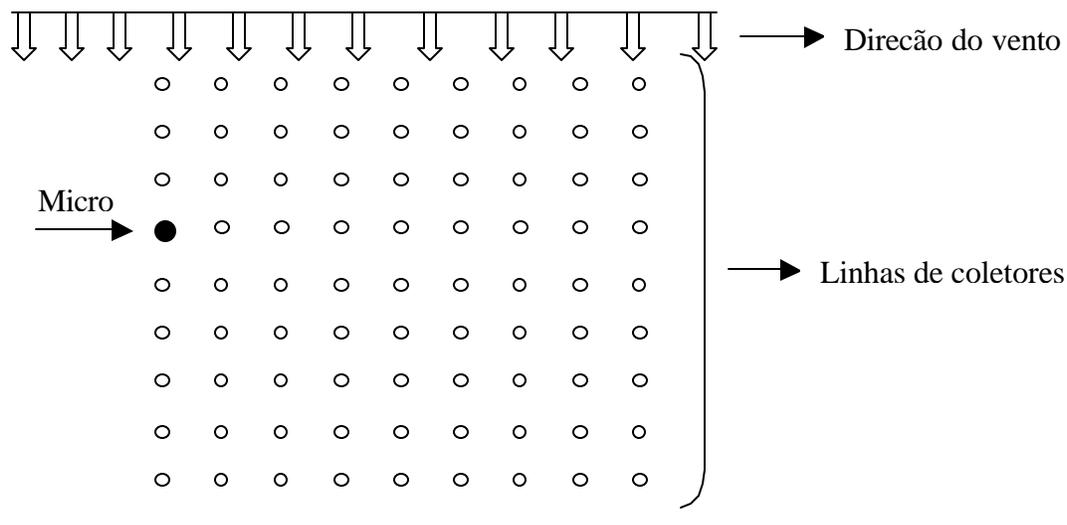


Figura 4- Esquema ilustrando a disposição do microaspersor e dos coletores em relação aos ventiladores.

### 3.5 Simulações da distribuição de gotas e de água

As simulações foram realizadas utilizando-se o programa SIRIAS (SIMulación de RIego por ASpersión), desenvolvido por Carrión, Tarjuelo e Montero para irrigação por aspersão (Figura 5). O programa foi desenvolvido em linguagem Delphi para Windows 95, tendo por base o modelo balístico apresentado por Tarjuelo et al. (1994).

Além da simulação da distribuição de água na ausência e na presença de vento, o programa permitiu, também, avaliar a distribuição do tamanho de gotas a partir da curva radial de distribuição pluviométrica do aspersor, previamente obtida em ensaios sem vento e com alta umidade relativa do ar. A fundamentação teórica para simular essa distribuição está apresentada no Anexo B .



Figura 5- Página inicial do programa SIRIAS.

De acordo com Tarjuelo et al. (1994), as equações diferenciais que definem o movimento de uma gota em condições de vento, podem ser escritas da seguinte forma:

$$A_x = \frac{d^2x}{dt^2} = - C_2 V (U_x - W_x) \quad (2)$$

$$A_y = \frac{d^2y}{dt^2} = - C_2 V (U_y - W_y) \quad (3)$$

$$A_z = \frac{d^2z}{dt^2} = - C_2 V U_z - g \quad (4)$$

em que:

A - aceleração da gota nas direções x, y e z,  $m s^{-2}$ ;

$C_2$  - coeficiente empírico de arraste,  $m^{-1}$ ;

V - velocidade inicial da gota,  $m s^{-1}$ ;

U - velocidade da gota em relação ao solo,  $m s^{-1}$ ;

W - velocidade do vento nas duas direções horizontais,  $m s^{-1}$ .

Pelas equações 2, 3 e 4 considera-se que o vento atua somente em direções paralelas ao solo. O valor do coeficiente  $C_2$  foi obtido empregando-se a metodologia desenvolvida por Fukui et al. (1980), conforme descrita no Anexo B.

Utilizando-se esse valor de  $C_2$  obteve-se o deslocamento espacial da distribuição de água devido ao vento, mantendo-se a sua conformação circular. Para ajustar a distribuição de água às deformações provocadas pelo vento, corrigiu-se o coeficiente  $C_2$  de acordo com a expressão proposta por Tarjuelo et al. (1994):

$$C' = C_2 (1 + K_1 \sin \beta - K_2 \cos \alpha) \quad .(5)$$

sendo que:

$C'$  - coeficiente de arraste corrigido,  $m^{-1}$ ;

$K_1$  e  $K_2$  - são coeficientes empíricos de ajuste, adimensional;

$\alpha$  - é o ângulo que formam os vetores  $V$  (velocidade da gota no ar) e  $W$  (velocidade do vento);

$\beta$  - é o ângulo que formam os vetores  $V$  e  $U$  (velocidade da gota em relação ao solo).

A partir das variáveis de entrada, o programa computacional resolve as equações 2 a 4 empregando-se o método de Runge-Kutta de quarta ordem. Como dados de entrada do programa foram necessários as características operacionais do aspersor e as condições ambientais em que foram realizadas as simulações (Figura 6).

Figura 6 - Dados do aspersor e das condições ambientais para o programa SIRIAS

Também foram necessários dados referentes ao vôo das gotas, como diâmetro inicial da gota, incremento entre diâmetros, distância sem ruptura do jato, porcentagem que impacta o braço do aspersor, porcentagem de redução da velocidade da gota depois do choque e altura de cultivo (Figura 7).

Figura 7 - Dados para determinação das trajetórias das gotas

O diâmetro inicial da gota empregado foi igual a 0,20 mm, que é o menor valor permitido pelo programa. A distância sem ruptura do jato, a porcentagem que impacta o braço do aspersor e a porcentagem de redução da velocidade foram consideradas iguais a zero. A altura de cultivo mínima indicada pelos autores do programa deve ser igual a 0,10 m, tendo sido usada uma altura igual a 0,13 m, correspondendo à altura dos coletores instalados no local de ensaio.

Dentre as variáveis empregadas nas condições especiais destacam-se os coeficientes de correção  $K_1$  e  $K_2$  (Figura 8). Os valores de  $K_1$  e  $K_2$  foram ajustados empiricamente com base nos dados experimentais obtidos em laboratório.

The image shows a screenshot of the SIRIAS software interface, titled "SIRIAS. Condiciones Especiales" with a date of "13/09/01". The interface is set against a blue background and contains several input fields and a radio button group. The fields are as follows:

Parameter	Value
FACTOR DE CORRECCION DE C (K1)	1,75
FACTOR DE CORRECCION DE C (K2)	0,15
<b>Pérdidas por evaporación y arrastre</b>	
PERDIDAS POR EVAPORACION (E) [%]	2,26
PERDIDAS POR ARRASTRE (A) [%]	2,26
<b>REPARTO DE PERDIDAS POR EVAPORACION Y ARRASTRE</b>	
<b>OPCIONES</b>	
<input checked="" type="radio"/> EVAPORACION Y ARRASTRE PROPORCIONAL	
<input type="radio"/> EVAPORACION AJUSTADA Y ARRASTRE PROPORCIONAL	
<input type="radio"/> EVAPORACION Y ARRASTRE AJUSTADAS	
NÚM DIRECCIONES DE LANZAMIENTO (Par)	120
NÚMERO DE ITERACIONES POR SEGUNDO	50
PLUVIOMETROS PARA EL MODELO [m2]	0,50 × 0,50
DIMENSIONES DE LOS PLUVIOMETROS [mm2]	4964

Figura 8 - Dados especiais para utilização do programa SIRIAS

As perdas por deriva e evaporação (PDE) foram calculadas pelo programa com base nas condições ambientais, utilizando um modelo empírico ajustado a partir de ensaios experimentais com aspersores de média pressão (Tarjuelo et al., 1999).

O número de direções de lançamento representa o número de direções em que se realiza o lançamento do jato, tendo os autores recomendado valores entre 120 e 180, o que representa um lançamento a cada 2° ou 3°, respectivamente. Nas simulações foi utilizado um valor igual a 120.

O número de iterações por segundo se refere ao número de intervalos de incremento de tempo em que se divide um segundo para se resolver a equação do vóo das gotas pelo método de Runge-Kutta. Foi utilizado um valor igual a 50, conforme recomendação dos autores. Finalmente, entre as condições especiais, incluem-se o espaçamento e a área de coleta média dos pluviômetros. Os pluviômetros foram espaçados em 0,50 m x 0,50 m com uma área correspondente de 4964 mm<sup>2</sup> (Figura 8).

No caso de microaspersores autocompensantes, as membranas reguladoras alteram a pressão de serviço, impossibilitando a sua utilização como variável de entrada do programa. Sendo assim, as pressões empregadas nas simulações foram aquelas obtidas através da curva pressão-volume para os diferentes bocais operando sem a membrana autocompensante, e que corresponderam às vazões nominais dos mesmos.

As curvas pressão-volume foram obtidas no Laboratório de Irrigação do DER/ESALQ para cada bocal, utilizando-se cinco repetições para cada pressão testada. As pressões utilizadas foram iguais a 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 250 kPa, 300 kPa e 350 kPa, medidas com manômetro digital.

Na linha de microaspersores foi instalado um regulador de pressão para manter a pressão constante na linha, independente de possíveis oscilações no sistema. Foram testados cinco microaspersores simultaneamente utilizando os mesmos bocais, posicionados dentro de recipientes com saída de água somente na parte inferior, por onde foram coletados os volumes durante 30 segundos para cada repetição. As amostras coletadas foram pesadas em balança eletrônica, obtendo-se os volumes correspondente a partir da divisão pela massa específica da água, considerada igual a  $1,0 \text{ kg dm}^{-3}$ .

As condições ambientais necessárias para o modelo foram: a temperatura do ar e da água, que são empregadas no cálculo do coeficiente de resistência aerodinâmico; a umidade relativa do ar, que é utilizada para se estimar as perdas por evaporação e deriva; a velocidade, a direção do vento e a altura em que ele foi medido.

A variação da velocidade do vento em relação à vertical foi obtida pelo programa utilizando-se a expressão desenvolvida por Vories et al. (1987):

$$W(z) = W_a \frac{\ln \left[ \frac{(z-d)}{z_0} \right]}{\ln \left[ \frac{(a-d)}{z_0} \right]} \quad (6)$$

em que:

$W(z)$  - velocidade do vento a uma altura  $z$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ;

$W_a$  - velocidade do vento medida a uma altura "a",  $\text{m s}^{-1}$ ;

$d$  - altura da rugosidade, cm, sendo  $\ln d = 0,9793 \ln h - 0,1536$ ;

$z_0$  - parâmetro da rugosidade, cm, sendo  $\ln z_0 = 0,997 \ln h - 0,883$ ;

$h$  - altura do cultivo, cm.

As diferenças entre os valores medidos e os simulados foram quantificadas a partir dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e dos coeficientes angulares dos modelos de regressão linear obtidos, considerando-se que as curvas passam pela origem dos sistemas de eixos.

Foi empregado, também, um coeficiente de confiança (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997), que corresponde à multiplicação do coeficiente de correlação (r) pelo coeficiente de exatidão (d) (Willmott et al., 1985, citados por Camargo & Sentelhas, 1997). O valor de (d) foi calculado através da seguinte expressão:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (7)$$

em que:

$P_i$  - são os valores estimados;

$O_i$  - são os valores medidos;

$O$  - é a média dos valores medidos.

Para avaliar o desempenho dos dados em relação ao coeficiente de confiança (c), foi utilizada a escala apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação de desempenho em relação a (c).

<b>Desempenho</b>	Ótimo	Muito Bom	Bom	Regular	Ruim	Péssimo
<b>Valor de (c)</b>	> 0,85	0,76 a 0,85	0,66 a 0,75	0,51 a 0,65	0,41 a 0,50	< 0,40

As classificações apresentadas na Tabela 2 foram obtidas a partir de Camargo & Sentelhas (1997), com algumas modificações.

Para poder comparar os resultados das simulações com os obtidos por Tarjuelo et al. (1994) com aspersores convencionais, foram determinadas as diferenças entre as pluviometrias coletadas e simuladas empregando-se a seguinte expressão utilizada pelos autores:

$$D = \frac{\left[ \frac{S^2}{N_0} \right]^{0.5}}{\left[ \frac{Q}{A_0} \right]} \quad (8)$$

em que,

D - diferenças entre valores medidos e coletados, adimensional;

S - soma das diferenças entre pluviometrias calculadas e medidas,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$N_0$  - número de pontos molhados quando não há vento;

$A_0$  - área molhada pelo aspersor quando não há vento,  $\text{m}^2$ ;

Q - vazão aplicada pelo aspersor,  $\text{L h}^{-1}$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Distribuição dos diâmetros de gotas

As distribuições percentuais do número de gotas nos perfis radiais não apresentaram grandes discrepâncias entre os diferentes bocais estudados (Figura 9). As gotas menores que 0,5 mm de diâmetro representaram, em todos os bocais, entre 78% e 91% do total, seguidas das gotas com diâmetro de 0,5 mm a 1,0 mm, que apresentaram percentuais entre 8% e 21%. A porcentagem de gotas maiores que 1,0 mm não superou 2% do total em nenhum dos bocais.

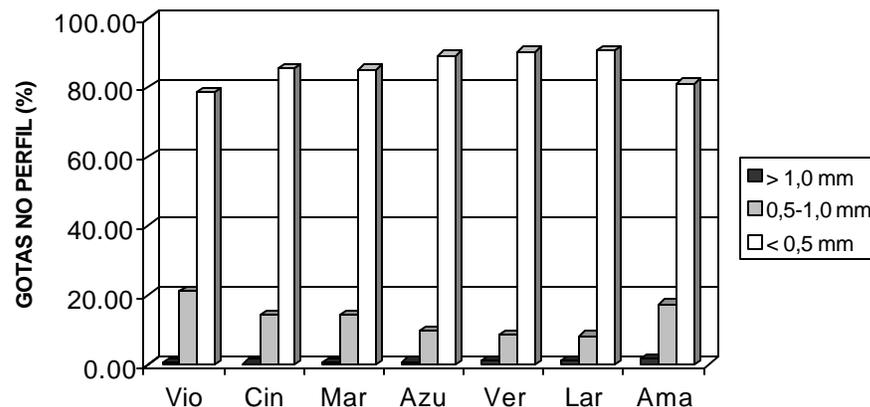


Figura 9 - Distribuição percentual do número de gotas no perfil para cada bocal.

Como nos perfis radiais, as distribuições percentuais de gotas considerando-se as áreas dos anéis circulares, apresentaram comportamentos semelhantes entre os bocais (Figura 10). Houve, em geral, uma redução percentual de gotas menores que 0,5 mm e um aumento das gotas entre 0,5 mm e 1,0 mm, em relação aos percentuais observados nos perfis. O número proporcional de gotas superiores a 1,0 mm também aumentou, não ultrapassando, entretanto, 5% do total.

Esses aumentos percentuais das gotas de maior diâmetro devem-se à proporcionalidade encontrada entre o diâmetros de gota e a distância radial e ao fato de que as maiores distâncias correspondem às maiores áreas circulares.

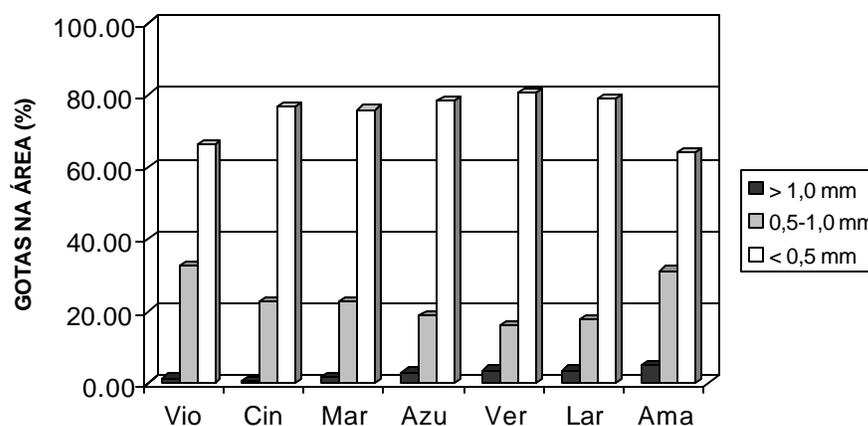


Figura 10 - Distribuição percentual do número de gotas na área molhada de cada bocal.

Os percentuais relativos aos volumes de cada intervalo de diâmetro de gotas foram obtidos a partir dos valores relativos às áreas dos anéis circulares e assumindo-se que as gotas possuíam formatos esféricos (Figura 11).

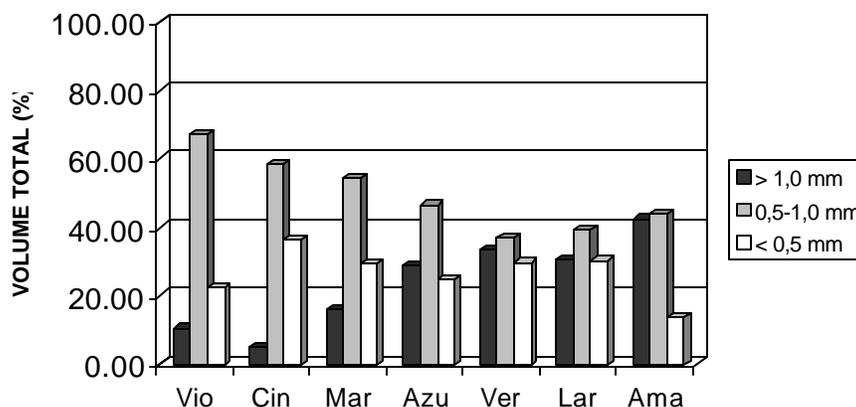


Figura 11 - Distribuição percentual do volume total aplicado na área molhada de cada bocal em função do diâmetro de gotas.

Enquanto os percentuais relativos ao número de gotas menores que 0,5 mm preponderaram em todos os bocais (Figuras 9 e 10), os maiores percentuais relativos aos volumes de gotas foram encontrados entre 0,5 mm e 1,0 mm de diâmetro (Figura 11). Também se verificou que, apesar do número de gotas maiores que 1,0 mm ser relativamente pequeno (Figuras 9 e 10), o volume por elas representado foi significativo (Figura 11). Isso ocorreu porque os volumes das gotas são proporcionais ao cubo dos seus diâmetros, fazendo com que as gotas maiores apresentassem percentuais superiores aos das gotas menores.

Analisando-se as distribuições dos volumes percentuais, observou-se um aumento dos valores superiores a 1,0 mm e uma redução das gotas entre 0,5 mm e 1,0 mm, com o aumento dos diâmetros dos bocais (Figura 11). O mesmo não ocorreu para

as gotas inferiores a 0,5 mm, que apresentaram valores superiores a 20% para todos os bocais, com exceção do amarelo.

Nas Figuras 9, 10 e 11 as gotas inferiores a 0,50 mm representaram diâmetros médios correspondentes a 0,32 mm, 0,40 mm e 0,46 mm de diâmetro. O intervalo entre 0,50 mm e 1,00 mm correspondeu a diâmetros médios iguais a 0,58 mm, 0,77 mm e 0,97 mm. As gotas superiores a 1,00 mm referiram-se aos diâmetros médios de 1,14 mm, 1,50 mm e 2,12 mm.

Somente os bocais verde, laranja e amarelo apresentaram gotas cujo diâmetro correspondeu a 1,50 mm, sendo que o bocal amarelo foi o único a apresentar gotas com diâmetro de 2,12 mm. Esses valores maiores foram coletados, geralmente, nas bandejas mais distantes em relação ao microaspersor.

De uma maneira geral, os diâmetros médios de gotas (dm) obtidos com base nos volumes acumulados variaram entre, aproximadamente, 0,50 mm e 0,70 mm, com exceção do bocal amarelo, com dm igual a 0,86 mm (Figura 12). Essa semelhança de valores de gotas entre os bocais deveu-se, principalmente, à utilização de rotores, que fracionaram os jatos de água assim que eles deixaram os bocais, reduzindo a heterogeneidade entre as gotas.

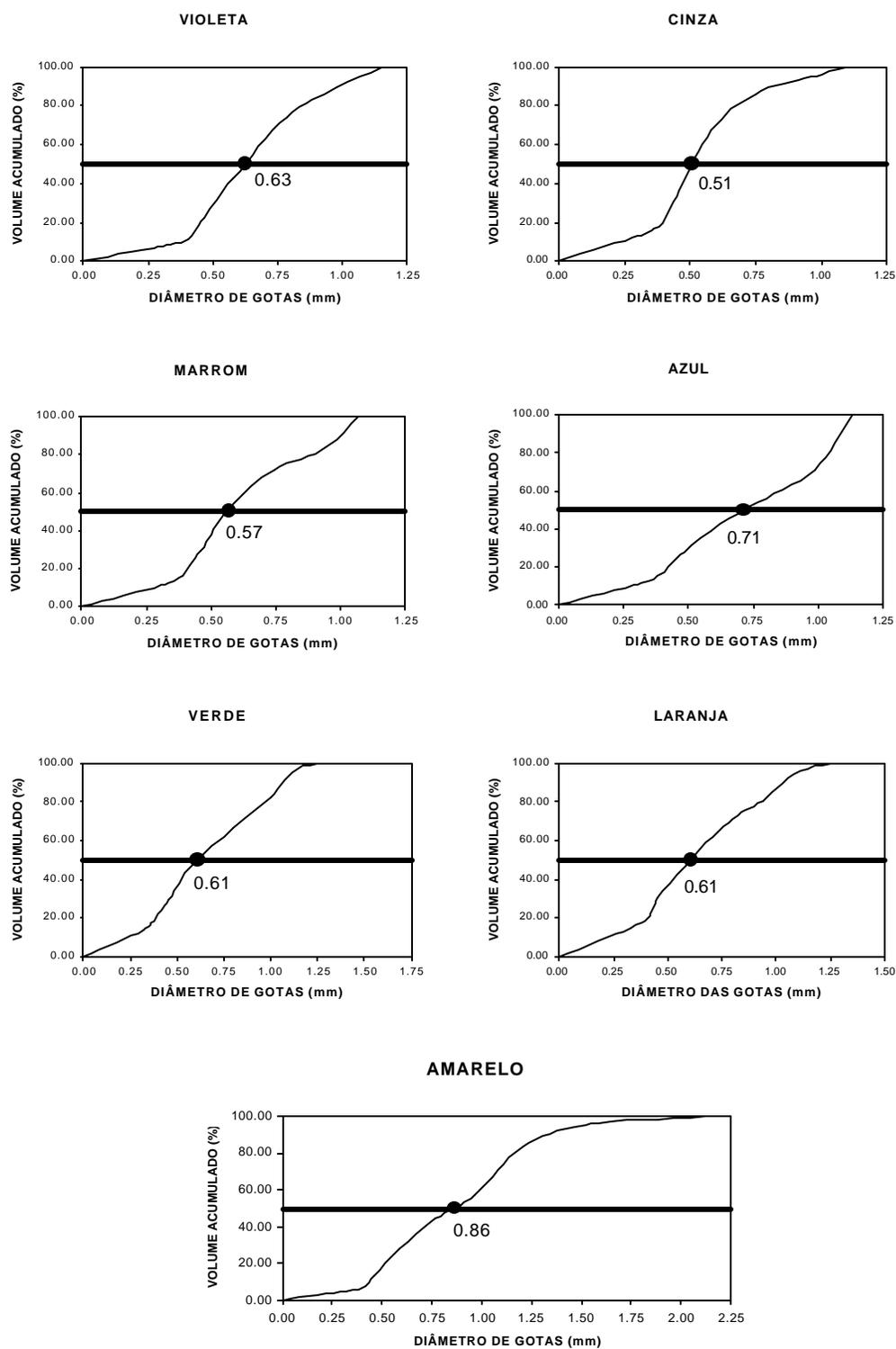


Figura 12 - Diâmetros médios de gotas para os diferentes bocais empregados.

O maior valor de  $dm$  para os bocais que empregaram rotor preto foi o correspondente ao bocal violeta que, apresentou uma velocidade de rotação do rotor menor do que os demais. O mesmo ocorreu para o bocal azul em comparação com os bocais verde e laranja, sendo que os três (além do amarelo) empregaram rotor azul. Já o bocal amarelo se diferenciou dos demais devido ao seus maiores diâmetro relativo e raio de alcance, tendo sido o único bocal onde foram registradas gotas superiores a 2,00 mm.

Para aspersores convencionais, os diâmetros de gotas apresentaram intervalos com amplitudes superiores às encontradas para os microaspersores. Kohl & Deboer (1984) obtiveram para aspersores de baixa pressão, diâmetros de gotas entre 0,33 mm e valores superiores a 5,00 mm. Carvalho (1991), trabalhando com aspersores de média pressão, encontrou diâmetros de gotas variando entre 0,58 mm e 5,22 mm. Oliveira (1991), obteve para diferentes bocais de aspersores fixos, com placas lisas e estriadas, diâmetros médios de gotas entre, aproximadamente, 0,5 mm e 2,5 mm.

Mergulhão (1992), empregando aspersores do tipo canhão hidráulico, observou que os diâmetros médios de gotas ficaram entre 0,77 mm e 4,07 mm, conforme a pressão de serviço e o modelo de aspersor.

Solomon et al. (1985) apresentaram diâmetros de gotas entre 0,2 mm e 1,9 mm para aspersores do tipo spray empregados em pivôs centrais, valores esses próximos aos encontrados para no presente trabalho para os microaspersores. Deve-se salientar que a metodologia utilizada para a determinação dos diâmetros de gotas dos microaspersores não permitiu constatar a presença de valores inferiores a 0,30 mm, sendo essa a menor malha de peneira utilizada.

Matsura (1993) também estudou a distribuição dos diâmetros de gotas para um aspersor do tipo canhão hidráulico, verificando que os valores encontrados ficaram entre 0,6 mm e 4,7 mm. O autor observou que, apesar dos diâmetros apresentarem, em geral, uma relação proporcional à distância ao emissor, foram observadas gotas pequenas, também, nas maiores distâncias, devendo-se esse fenômeno à quebra sucessiva das gotas ao longo do trajeto percorrido. Esse comportamento foi igualmente observado nos ensaios com microaspersores, como pode ser ilustrado na Tabela 3, cujos valores correspondem ao bocal amarelo.

Tabela 3. Total de gotas (em %) coletadas nas diferentes malhas (em mm) para cada distância radial (m) no ensaio correspondente ao bocal amarelo.

<b>Raio (m)</b>	<b>Diâmetro de gota (mm)</b>								
	<b>2.00</b>	<b>1.68</b>	<b>1.19</b>	<b>1.00</b>	<b>0.84</b>	<b>0.59</b>	<b>0.50</b>	<b>0.42</b>	<b>0.30</b>
<b>0.4</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.2	6.6	13.9	75.3
<b>0.8</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.5	5.1	90.5
<b>1.2</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	7.7	37.0	28.1	26.1
<b>1.6</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	54.3	40.2	0.0	0.0
<b>2.0</b>	0.0	0.0	0.6	4.1	38.2	57.1	0.0	0.0	0.0
<b>2.4</b>	0.0	0.6	11.0	29.9	54.5	3.9	0.0	0.0	0.0
<b>2.8</b>	0.0	3.4	40.9	29.5	9.1	17.0	0.0	0.0	0.0
<b>3.2</b>	0.0	10.9	43.6	7.3	12.7	25.5	0.0	0.0	0.0
<b>3.6</b>	6.5	22.6	19.4	9.7	19.4	22.6	0.0	0.0	0.0

A uma distância de 0,40 m do emissor caíram gotas nas malhas com aberturas entre 0,30 mm e 0,84mm, havendo uma preponderância das gotas retidas na malha de

0,30 mm (75,3%). Por outro lado, a 3,60 m de distância caíram gotas entre as malhas de 0,59 mm e 2,00 mm, com uma distribuição mais homogênea dos percentuais obtidos.

Com base nos percentuais referentes às diferentes malhas em cada distância radial é que se determinou os diâmetros médios de gotas relativos a cada distância. Ocorreu, em geral, um aumento do diâmetro médio com a distância ao emissor (Figura 13).

Para os bocais violeta e cinza, os melhores ajustes foram obtidos com funções quadráticas, que apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) iguais 0,9912 e 0,9980, respectivamente (Figura 13). Para os bocais marrom, azul, verde e laranja os melhores ajustes também foram obtidos com funções quadráticas cujos valores de  $R^2$  apresentaram-se sempre superiores a 0,99 (Figura 13). Observa-se que para os seis bocais citados as curvas de regressão encontraram o eixo das ordenadas em valores próximos a 0,30 mm, representando esses valores os diâmetros das gotas junto ao microaspersor.

Para o bocal amarelo o modelo quadrático apresentou um  $R^2$  igual a 0,96 (Figura 13). Com base na equação quadrática, obteve-se um diâmetro de gotas junto ao emissor igual a 0,17 mm. Esse valor, apesar de confirmar a tendência de redução dos diâmetros com a distância, foi inferior aos dos demais bocais. Um melhor ajuste pôde ser obtido através de um função de terceiro grau, com um valor de  $R^2$  igual a 0,9993 (Figura 13). Ao contrário, contudo, dos outros modelos de regressão, a curva referente à equação cúbica cruza o eixo das ordenadas em um diâmetro de gotas correspondente a 0,48 mm, contrariando a tendência de redução do diâmetro com a proximidade ao microaspersor.

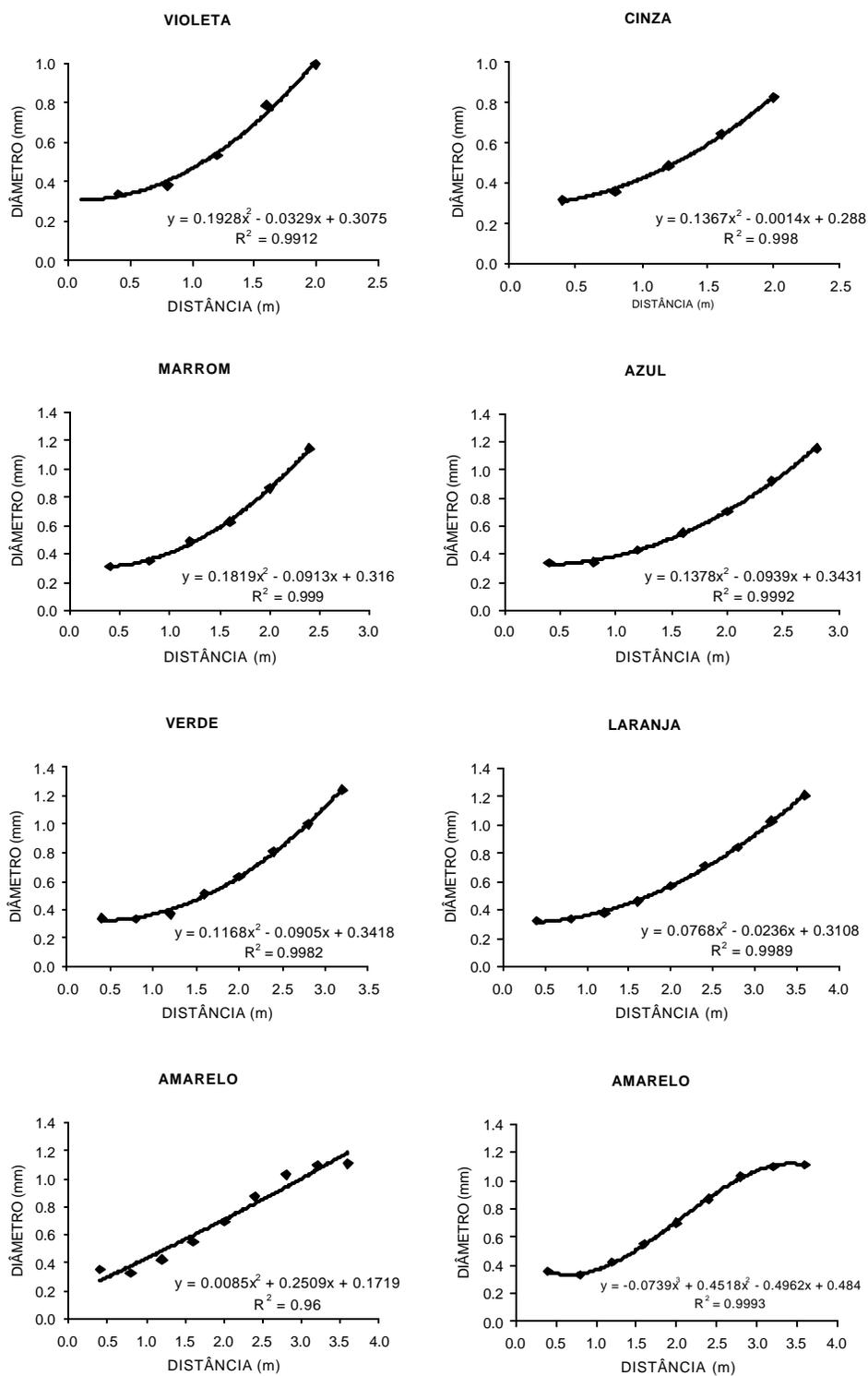


Figura 13 - Diâmetro médio de gotas em função da distância radial.

## 4.2 Distribuição de água dos microaspersores na ausência de vento

No perfil referente ao bocal violeta, verifica-se que a maior precipitação ocorreu à distância radial de 1,60 m, com um valor igual a 2,28 mm h<sup>-1</sup>. O raio de alcance do emissor foi de 2,20 m (Figura 14). Para o bocal cinza, a maior intensidade de precipitação foi igual a 2,42 mm h<sup>-1</sup>, sendo registrada a uma distância de 1,20 m, enquanto o raio de alcance foi, também, igual a 2,20 m. O raio de alcance para o bocal marrom foi de 2,40 m e a maior taxa de aplicação foi de 2,89 mm h<sup>-1</sup> que, semelhante ao bocal cinza, foi registrada a uma distância de 1,20 m do emissor.

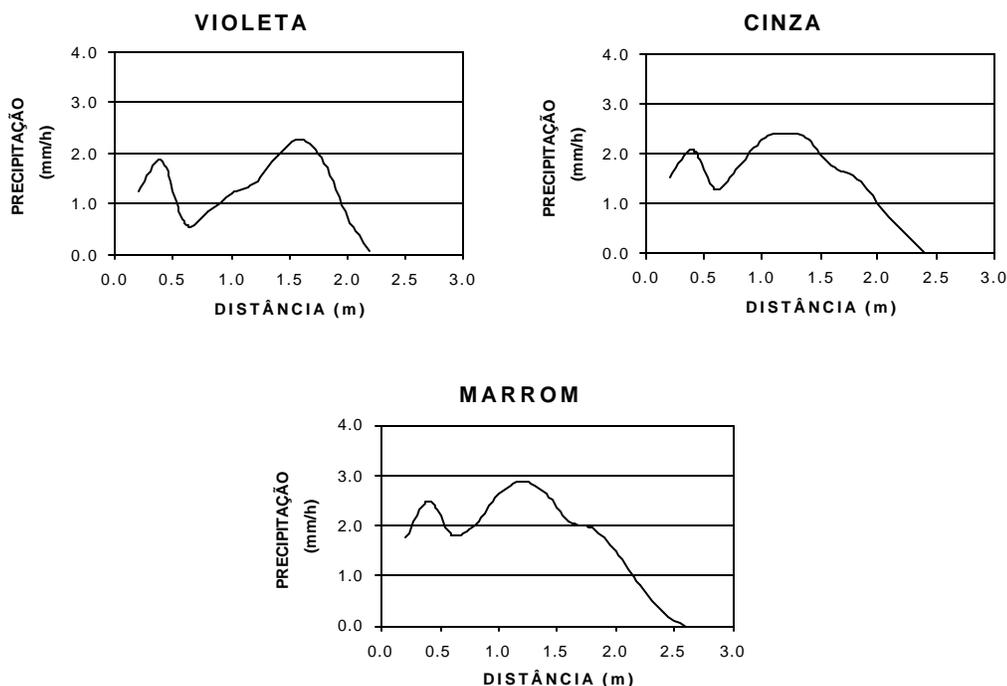


Figura 14 - Distribuição de água para os perfis referentes aos bocais violeta, cinza e marrom operando com rotor preto.

Observa-se que os perfis obtidos com rotor azul apresentaram grande semelhança entre si, com uma alta taxa de precipitação nas proximidades do microaspersor e redução gradual dessa taxa, seguida de uma pequena elevação da mesma e um decréscimo acentuado até final (Figura 15).

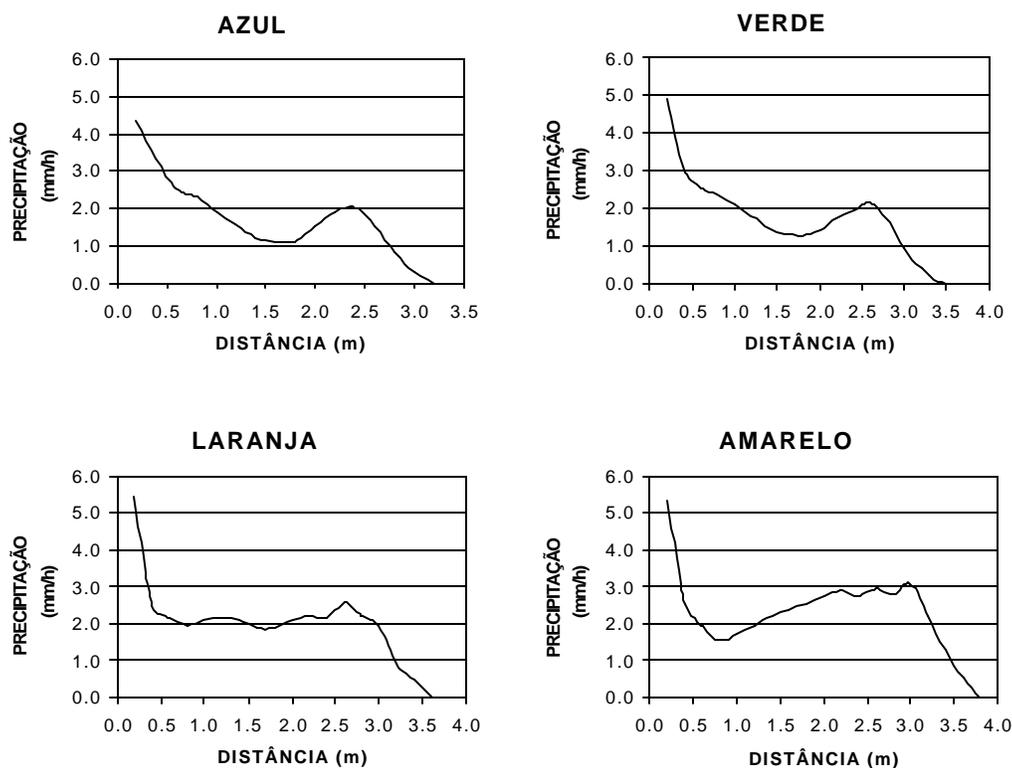


Figura 15 - Distribuição de água para os perfis referentes aos bocais azul, verde, laranja e amarelo operando com rotor azul.

Os maiores valores sempre foram registrados nos coletores mais próximos ao microaspersor, sendo iguais a  $4,33 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $4,90 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $5,44 \text{ mm h}^{-1}$  e  $5,30 \text{ mm h}^{-1}$  para os bocais azul, verde, laranja e amarelo, respectivamente. Os raios de alcance apresentaram valores iguais a 3,00 m para o bocal azul; 3,40 m para os bocais verde e laranja; e 3,60 m para o bocal amarelo.

Os perfis da Figura 15 foram semelhantes ao perfil apresentado por Matos et al. (1999) para um microaspersor Dan 2001 com bocal de 0,90 mm. Esse bocal não se encontra nas especificações do fabricante devendo se referir, portanto, ao bocal violeta, que possui diâmetro nominal igual a 0,84 mm. Apesar de não citar o tipo de rotor empregado, conclui-se pelo formato do perfil que se trata do rotor azul. Os autores encontraram uma intensidade de precipitação máxima junto ao microaspersor igual a 2,8 mm h<sup>-1</sup> e um raio efetivo de 2,25 m. Foi considerado como raio efetivo aquele correspondente à distância do emissor ao último coletor que continha, no mínimo, 10% da precipitação média. Esse valor do raio efetivo foi semelhante ao determinado no presente trabalho para o bocal violeta empregando-se rotor preto (Figura 14). Verifica-se, assim, que para esse bocal os diferentes rotores alteram o formato do perfil de distribuição de precipitações sem alterar significativamente o alcance do jato.

Conforme os resultados anteriores, verifica-se que a taxa de aplicação não ultrapassou 3,0 mm h<sup>-1</sup> e 5,5 mm h<sup>-1</sup> para os bocais com rotores preto e azul, respectivamente (Figuras 14 e 15). Esses valores de intensidade de precipitação máxima apresentam-se semelhantes aos observados por diversos autores.

Sampaio et al. (1996) encontraram valores máximos variando de 2,0 mm h<sup>-1</sup> a 7,0 mm h<sup>-1</sup>, para emissores giratórios Naan 710 sob diferentes pressões de serviço. Nascimento et al. (1999) encontraram um valor máximo de 4,0 mm h<sup>-1</sup> para o microaspersor Rain Bird QN-14. Holanda Filho et al. (2000), estudando o microaspersor Rondo, obtiveram uma taxa máxima de, aproximadamente, 4,5 mm h<sup>-1</sup>.

Por outro lado, Nascimento et al. (1992) encontraram valores máximos que chegaram a 40 mm h<sup>-1</sup>, para microaspersores Dantas; 21 mm h<sup>-1</sup>, para difusores da marca

Jatíssimo; e  $90 \text{ mm h}^{-1}$ , para microaspersores Asbrasil. Sampaio et al. (1996) encontraram valores que variaram de, aproximadamente,  $60 \text{ mm h}^{-1}$  a  $140 \text{ mm h}^{-1}$ , para difusores NAAN 7110 operando sob diferentes pressões de serviço.

Os raios de alcance encontrados para os bocais que empregaram rotor preto, variaram entre 2,20 m e 2,40 m, enquanto que para os bocais com rotor azul ficaram entre 3,00 m e 3,60 m (Figuras 13 e 14). Nascimento et al. (1992) encontraram raios efetivos iguais a 2,70 m e 3,30 m para o microaspersor Asbrasil com rotor, operando sob pressões de 50 kPa e 100 kPa, respectivamente. Sampaio et al. (1996) encontraram raios de alcance de, até, 4,50 m para microaspersores giratórios NAAN 7110. Nascimento et al. (1999) verificaram que o raio efetivo para o microaspersor Rain Bird QN-14 ficou entre 1,00 m e 3,00 m, conforme a pressão empregada. Holanda Filho et al. (2000) encontraram um raio de alcance igual a 3,30 m para o microaspersor Rondo.

Multiplicando-se as intensidades de precipitação pelas áreas dos anéis circulares correspondentes aos pluviômetros, obteve-se os volumes relativos a cada distância radial. Essas informações são úteis devido ao fato dos microaspersores trabalharem, muitas vezes, isolados, sem que haja sobreposições, como na irrigação de fruteiras com grande espaçamento entre plantas.

A distribuição do volume de água aplicado ao longo do raio de alcance do microaspersor vai afetar, não somente a uniformidade de distribuição de água mas, também, a distribuição de fertilizantes quando for realizada a fertirrigação e o desenvolvimento radicular da cultura.

Para os bocais que empregaram rotor preto, o maior percentual do volume de água aplicado se situou entre 1,2 m e 1,8 m, representando cerca de 60% do total para o

bocal violeta e 40% do total para os bocais cinza e marrom (Figura 16). O bocal violeta, concentrou, assim, a maior parte do volume aplicado nesse intervalo, enquanto os outros dois distribuíram melhor o volume entre as distâncias radiais de 0,6 m a 2,4 m.

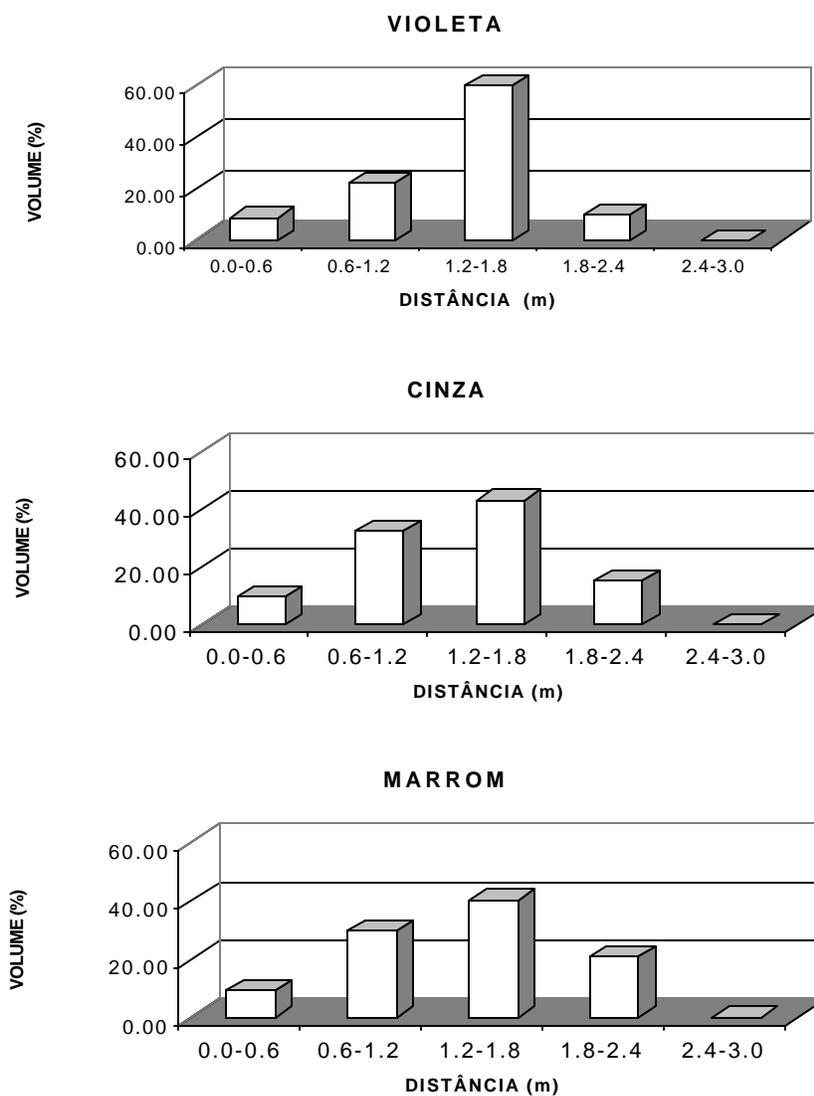


Figura 16 - Distribuição percentual dos volumes aplicados para os bocais violeta, cinza e marrom operando com rotor preto.

Para os bocais com rotor azul, o maior volume percentual foi registrado entre 1,8 m e 2,4 m de distância para o bocal azul e entre 2,4 m e 3,0 m para os bocais verde, laranja e amarelo (Figura 17).

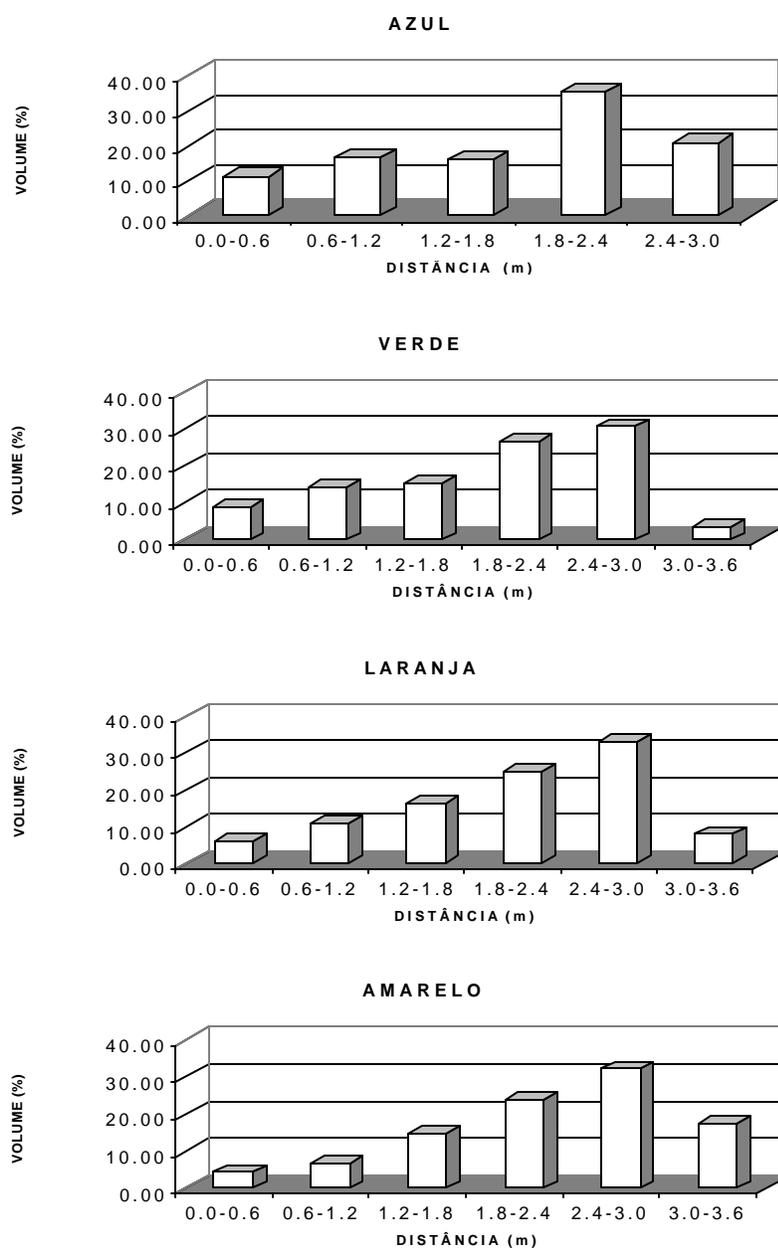


Figura 17 - Distribuição percentual dos volumes para os bocais azul, verde, laranja e amarelo operando com rotor azul.

Para o bocal azul, houve uma certa uniformidade entre 0,0 m e 1,8 m de distância, não diferindo muito do percentual registrado entre 2,4 m a 3,0 m (Figura 17). Para os bocais verde e laranja ocorreu um incremento do volume percentual com a distância, atingindo a concentração máxima entre 2,4 m e 3,0 m e reduzindo-se abruptamente em seguida na faixa entre 3,0 m e 3,6 m (Figura 17).

Verifica-se que a distribuição percentual dos volumes para o bocal amarelo apresentou comportamento semelhante às observadas para os bocais verde e laranja, com a diferença que entre 3,0 m e 3,6 m foi registrado um percentual mais significativo do total, chegando a cerca de 17% (Figura 17).

As distribuições percentuais dos volumes têm uma implicação direta na eficiência de aplicação do sistema, considerando-se essa eficiência como a relação entre o volume de água armazenado na região radicular da cultura e o volume total aplicado (Frizzone, 1992). Se a cultura apresentar um sistema radicular lateralmente pouco desenvolvido, a maior parte do volume aplicado pelo microaspersor não ficará disponível para a cultura e a eficiência de aplicação será baixa.

Considerando-se, por exemplo, um pomar no primeiro ano de implantação, com um raio de abrangência do sistema radicular igual a 1,00 m, aproximadamente, e com os microaspersores próximos aos troncos, pode-se estimar que, empregando-se o bocal violeta, somente cerca de 30% do volume aplicado pelo emissor ficará disponível para a planta. Esse valor reduz-se para, aproximadamente, 11% caso utilize-se o bocal amarelo.

Por essa razão, em pomares novos deve-se utilizar, sempre que possível, rotores com anteparos (Figura 18) para concentrar o jato numa região próxima ao microaspersor. Nesses casos, deve-se tomar precaução, todavia, com o tempo de

aplicação a fim de evitar-se perdas por percolação, uma vez que as intensidades de precipitação tornam-se muito elevadas com o uso de anteparos (Boman & Parsons, 1999). Conforme o crescimento da cultura, o anteparo poderá ser removido (quebrado), aumentando a área de abrangência do emissor.

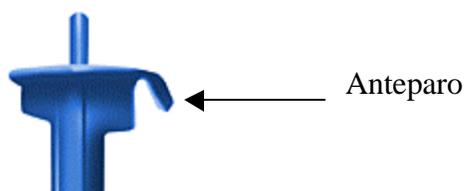


Figura 18 - Rotor com anteparo para concentrar o jato junto ao microaspersor.

### 4.3 Distribuição da água na presença de vento

Os ventiladores não proporcionaram uma velocidade de vento uniforme na área de abrangência dos microaspersores (Figura 19), obtendo-se um coeficiente de variação (CV) igual a 85,4% e velocidade média do vento igual a  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ . Essa área de abrangência apresentou uma largura máxima igual a 7,0 m na direção perpendicular ao vento. Somente o bocal amarelo alcançou a largura máxima da área. A menor faixa molhada foi obtida com o bocal violeta, apresentando uma largura igual a 3,0 m. Considerando-se apenas essa faixa, a velocidade média do vento foi de  $3,3 \text{ m s}^{-1}$ , com um valor de CV igual a 22,1%.

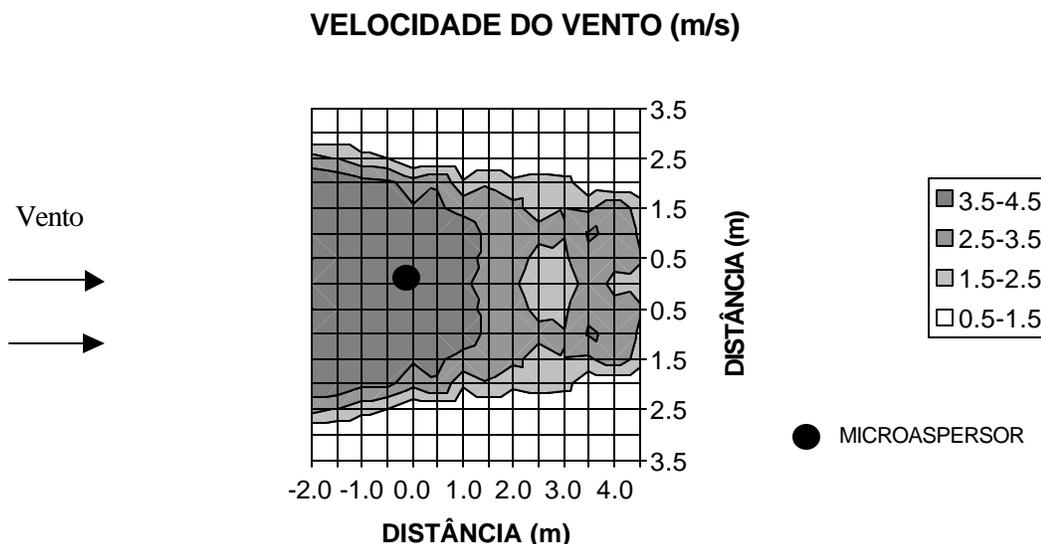


Figura 19 - Distribuição espacial da velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

A redução do CV seria possível com a construção de um túnel de vento utilizando um único ventilador de grandes proporções, como os empregados nas indústrias automobilística e aeroespacial. O alto custo desse equipamento, porém, limita a sua utilização em pesquisas com irrigação. Pode-se futuramente, entretanto, melhorar a distribuição espacial da velocidade do vento por meio do emprego de um número maior de ventiladores e, ou, do condicionamento do microaspersor e dos coletores em um espaço fechado, cujos limites não sejam superiores às áreas de influência dos emissores.

Analisando-se somente o perfil central na linha onde estava posicionado o microaspersor, verificou-se que a velocidade do vento apresentou uma tendência de redução com a distância aos ventiladores (Figura 20), apresentando um valor médio igual a  $3,2 \text{ m s}^{-1}$ , próximo ao encontrado para a área representada pelo bocal violeta. O valor do CV para os dados obtidos no perfil central foi igual a 30,6%.

Obtendo-se, por regressão linear, uma linha tendência das velocidades do vento no perfil central, verificou-se que os maiores desvios em relação à linha ocorreram para as distâncias superiores a 2,0 m do microaspersor (Figura 20). De -2,0 m até 2,0 m as velocidades foram mais uniformes, apresentando um CV igual a 7,3%.

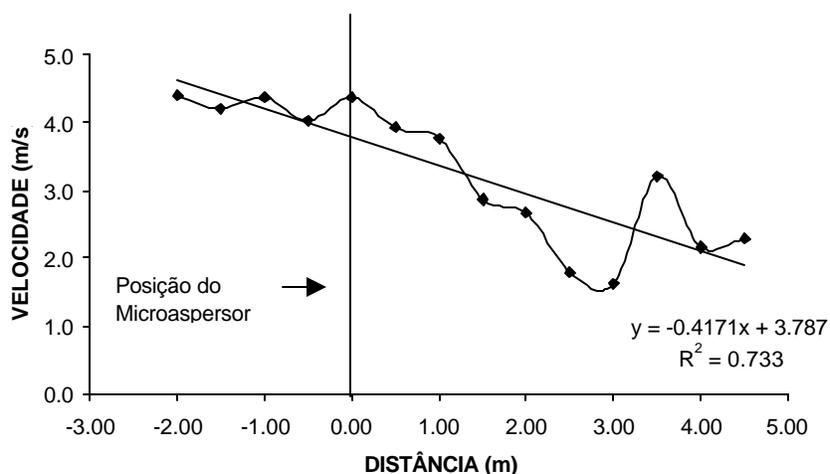


Figura 20 - Perfil da velocidade do vento em relação à distância ao microaspersor.

Em nenhum dos bocais testados foram coletadas lâminas de água a distâncias superiores a 1,50 m do microaspersor no sentido contrário ao vento. O principal efeito do vento sobre os perfis de distribuição de água foi o de eliminar a simetria em relação ao microaspersor, observada nas condições sem vento (Figuras 21 e 22).

Os aumentos relativos dos raios de alcance no sentido do vento foram iguais a 36%, em média, para os bocais que trabalharam com rotor preto, e de 21% para os bocais com rotor azul, quando comparados com as condições sem vento. O menor valor apresentado pelos bocais com rotor azul foi devido ao maior raio de alcance deles em condições sem vento, fazendo com que os percentuais relativos fossem menores.

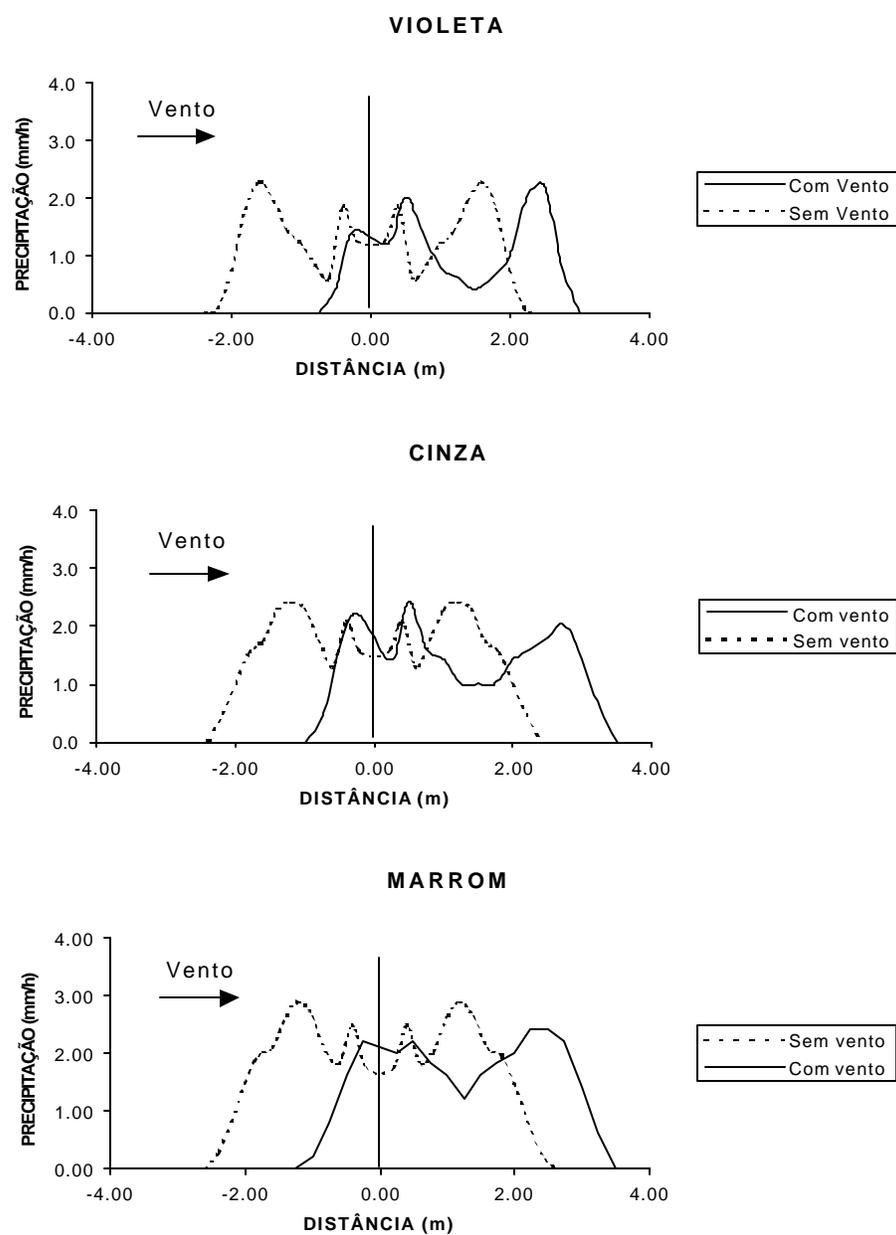


Figura 21- Perfis de distribuição de água com e sem vento para os bocais violeta, cinza e marrom.

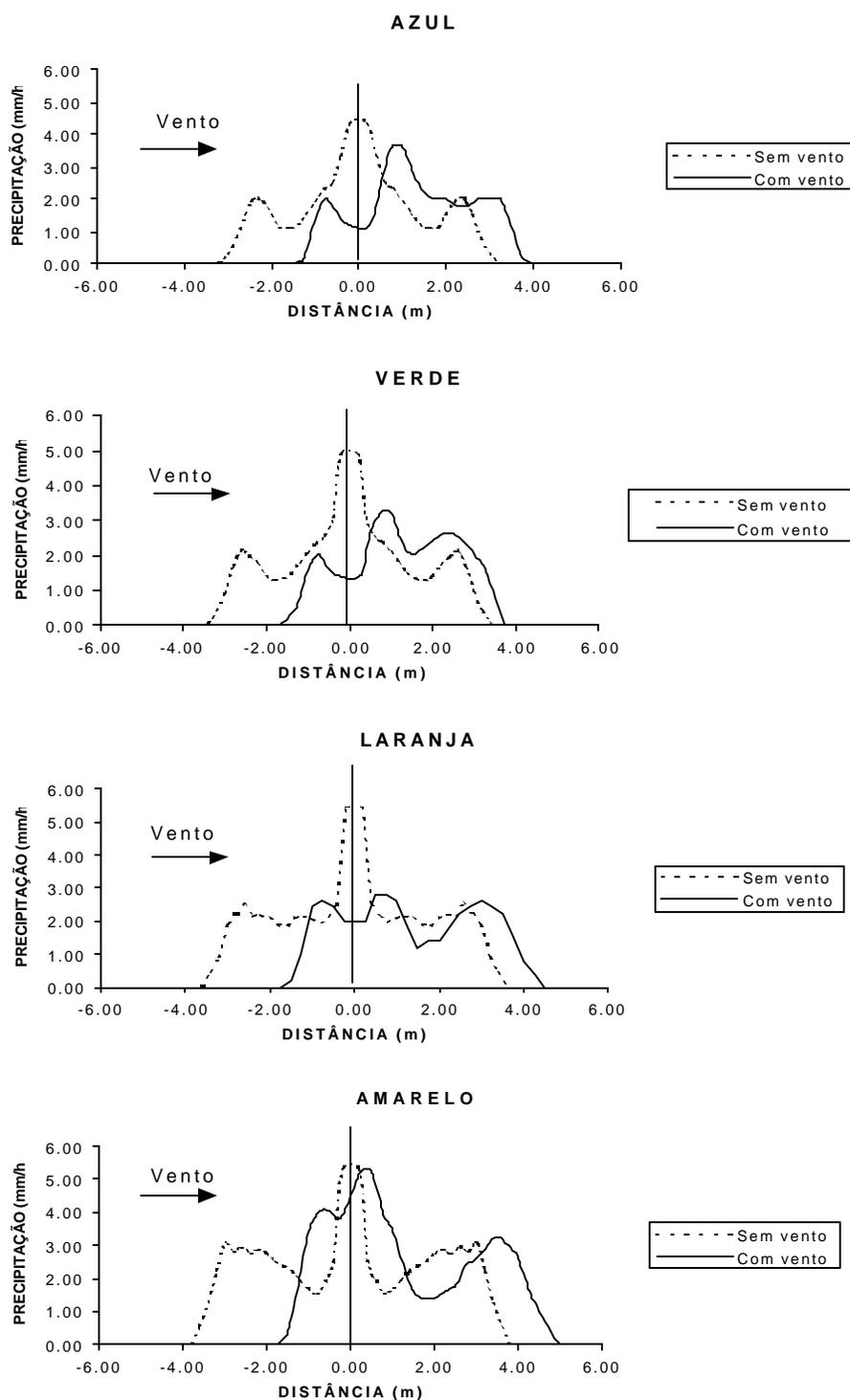


Figura 22 - Perfis de distribuição de água com e sem vento para os bocais azul, verde, laranja e amarelo.

Para todos os bocais empregados houve um deslocamento da maior parte da área molhada a montante para a jusante do vento, sendo que para o bocal violeta esse deslocamento foi praticamente completo (Figuras 23 e 24). Essa perda de simetria na distribuição de água dos microaspersores em condições de vento pode comprometer a eficiência de aplicação de água e nutrientes, considerando-se que em várias regiões da área coberta pelo sistema radicular da cultura haverá um déficit de irrigação, enquanto em outras ocorrerão lâminas excessivas que poderão provocar perdas por percolação.

As áreas molhadas superficiais em condições de vento foram menores do que as observadas na ausência de vento (ACV/ASV), fazendo com que as intensidades médias de aplicação apresentassem valores maiores na presença de vento em relação às obtidas sem vento (ICV/ISV), conforme se observa na Tabela 5. A maior redução de área ocorreu com o bocal laranja e a menor foi obtida com o bocal marrom, com áreas molhadas em condições de vento iguais a 43,5% e 70,6% das registradas na ausência de vento, respectivamente.

As áreas molhadas em condições de vento que não faziam parte das áreas iniciais sem vento (ACV-ASV) variaram entre 2,25% e 10,89% em relação às áreas sem vento (Tabela 5), demonstrando que a maior parte dos deslocamentos ocorre dentro das áreas iniciais. As razões entre os volumes coletados com e sem vento (VCV/VSV) variaram entre 69,8% e 82,9%, com um valor médio igual a 76,6%, fazendo com que as perdas por deriva e evaporação da água (PDE) fossem de 23,4%, em média. Esse valor de PDE pode ser considerado alto, uma vez que os ensaios foram realizados em ambiente fechado e em períodos de temperatura amena e alta umidade relativa do ar.

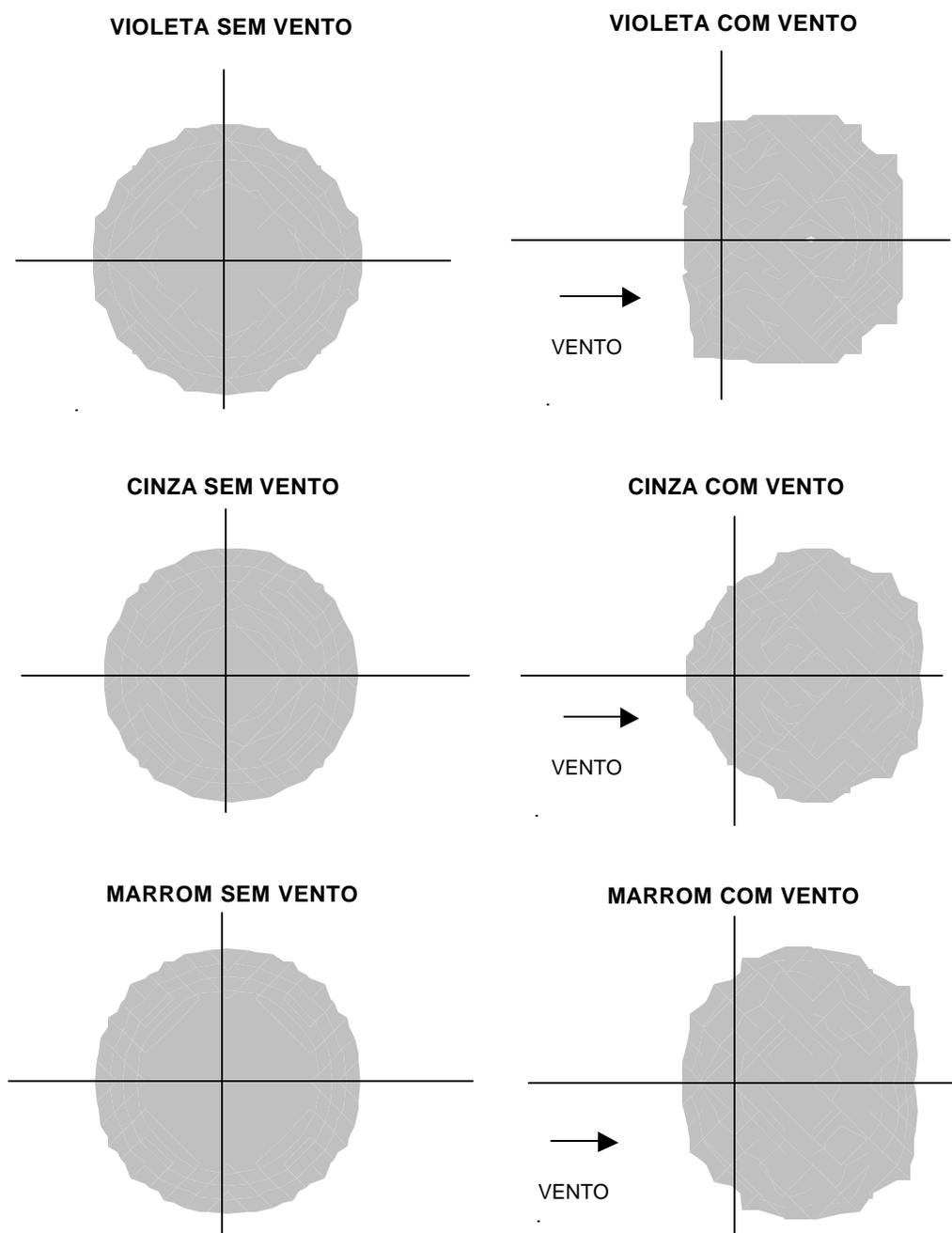


Figura 23 - Distribuição espacial das intensidades de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ) com e sem vento para os bocais violeta, cinza e marrom.

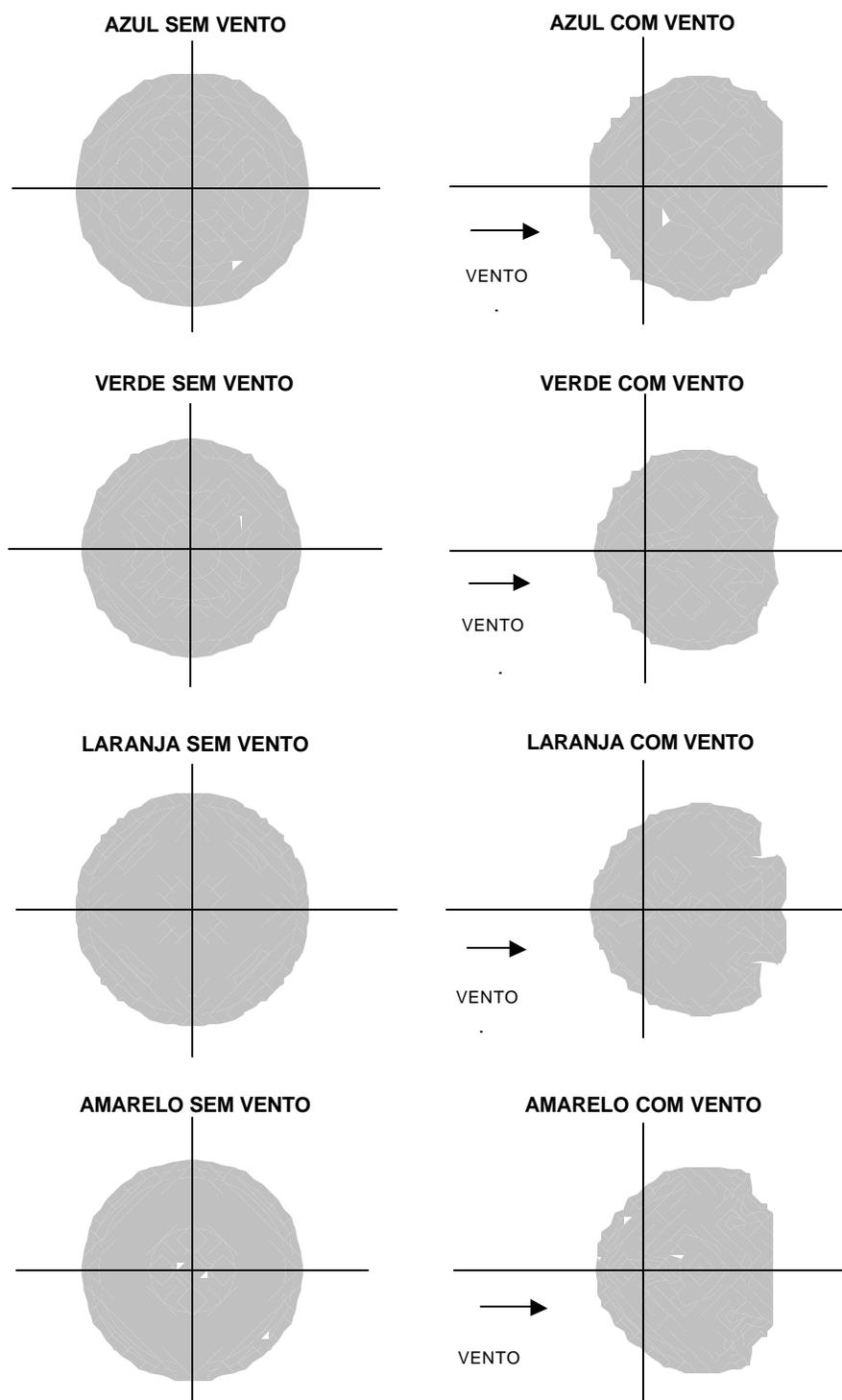


Figura 24 - Distribuição espacial das intensidades de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ) com e sem vento para os bocais azul, verde, laranja e amarelo.

Tabela 5. Relação da área molhada com vento em relação à sem vento (ACV/ASV); volume coletado com vento sobre o volume coletado sem vento (VCV/VSV); razão entre as intensidades médias de aplicação com e sem vento (ICV/ISV); área molhada com vento que não fazia parte da área inicial sem vento (ACV-ASV); volume aplicado que caiu fora da área inicial sem vento (VCV-VSV); perdas por deriva e evaporação (PDE); perdas totais, equivalentes às somas entre PDE e VCV-VSV (P. TOTAL)

<b>BOCAL</b>	<b>Violeta</b>	<b>Cinza</b>	<b>Marrom</b>	<b>Azul</b>	<b>Verde</b>	<b>Laranja</b>	<b>Amarelo</b>
<b>ACV/ASV (%)</b>	48,3	63,4	70,6	61,7	56,5	43,5	67,6
<b>VCV/VSV (%)</b>	74,9	78,6	82,9	81,6	72,7	69,8	75,8
<b>ICV/ISV (%)</b>	155,1	124,0	117,4	132,3	128,7	160,5	112,1
<b>ACV-ASV (%)</b>	2,25	10,89	10,09	6,04	3,11	7,77	9,39
<b>VCV-VSV (%)</b>	3,0	10,8	8,5	6,3	1,7	3,6	2,9
<b>PDE (%)</b>	25,1	21,4	17,1	18,4	27,3	30,2	24,2
<b>P. TOTAL(%)</b>	28,1	32,2	25,6	24,7	29,0	33,8	27,1

Os valores das perdas totais (P. Total) variaram entre 24,7 %, para o bocal azul, e 33,8%, para o bocal laranja, apresentando um valor médio igual a 28,6%. As condições ambientais em que foram realizados os ensaios fizeram com que o vento fosse o principal fator para a ocorrência dessas perdas.

Vários trabalhos mostraram que as perdas por evaporação e deriva em sistemas de aspersão podem apresentar valores elevados, sendo o vento um dos principais fatores contribuintes dessas perdas (Christiansen, 1942; Frost & Schwalen, 1955; Yazar, 1984; Faci & Bercero, 1991; Paz et al., 1991; Abo-Ghobar, 1992; Alves et al., 1997b; Faci et al., 2001).

Aspersores convencionais também podem apresentar perdas significativas por em condições de baixa demanda evaporativa, como é o caso da aplicação de água durante o período noturno (Sternberg, 1967).

Alves et al. (1997a) encontraram perdas durante a aplicação variando entre 12,1% e 21,2% para microaspersores instalados a 0,30 m de altura do solo e velocidades do vento entre  $0,53 \text{ m s}^{-1}$  e  $2,58 \text{ m s}^{-1}$ . Deve-se observar que, além de empregar microaspersores de outra marca, no presente trabalho a altura de instalação e a velocidade média do vento foram maiores.

Utilizando microaspersores do mesmo modelo (Dan 2001) operando em condições de laboratório, Souza et al. (2001) encontraram diferenças entre os volumes coletados com e sem vento variando de 14% e 58%, para o emissor posicionado perpendicularmente em relação ao piso do laboratório. Esses valores diferiram dos apresentados na Tabela 5, devido ao fato dos autores terem estimado o volume total em condição de vento a partir de dados obtidos com coletores dispostos ao longo de cinco linhas radiais, sendo os valores restantes obtidos por interpolação. Outro fator que explica essas diferenças foi o uso de rotor preto para o bocal amarelo, que foi o que apresentou as menores perdas segundo os autores. Observa-se na Tabela 5 que as perdas por deriva e evaporação (PDE) para os bocais que empregaram rotor preto (violeta, cinza e marrom) tendem a reduzir-se com o aumento do diâmetro do bocal.

Esses dados demonstram a ocorrência de perdas consideráveis em sistemas de microaspersão devido ao efeito do vento. Essas perdas estão relacionadas aos diâmetros das gotas aplicadas pelos emissores, conforme demonstrou Edling (1985).

#### 4.4 Simulação dos diâmetros de gotas

O uso de modelos para simulação da distribuição de água com base na teoria da trajetória balística das gotas requer que, para cada bocal, haja uma relação entre o diâmetro médio de gotas e a distância ao microaspersor, o que foi observado em todos os bocais (Figura 13).

Para se utilizar o modelo balístico do programa SIRIAS foram necessárias, entre outras características, a determinação da pressão correspondente à vazão nominal de cada bocal e a velocidade de rotação dos rotores dos microaspersores. Para as curvas pressão-vazão dos emissores sem a membrana (Figura 25) foram ajustadas equações exponenciais e, a partir delas, determinadas as pressões operacionais que fossem equivalentes às vazões nominais dos diferentes bocais (Tabela 6).

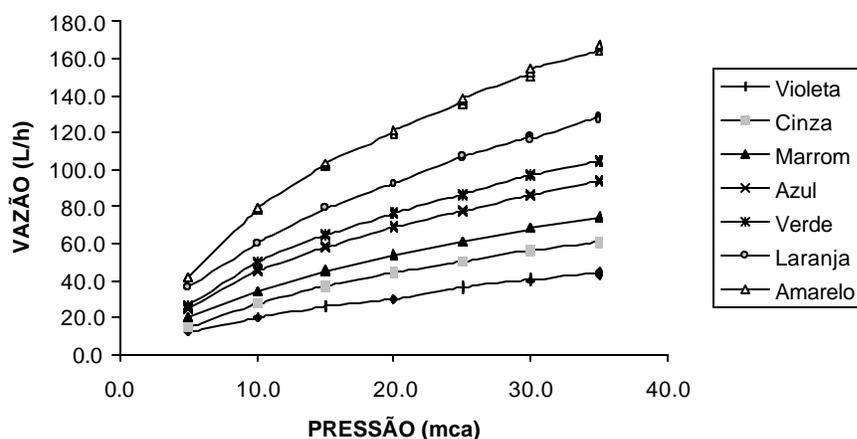


Figura 25 - Curvas de pressão-vazão para os diferentes bocais na ausência da membrana reguladora de pressão.

Tabela 6. Vazão nominal, coeficiente angular (k), expoente da equação (x), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), pressão equivalente à vazão nominal e velocidade de rotação dos rotores para os diferentes bocais

<b>Bocal</b>	<b>Vazão (L/h)</b>	<b>k</b>	<b>x</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>Pressão (mca)</b>	<b>Rotação (rpm)</b>
<b>Violeta</b>	20	4.250	0.661	0.9965	10.42	2000
<b>Cinza</b>	28	4.868	0.726	0.9885	11.12	2500
<b>Marrom</b>	35	7.133	0.668	0.9959	10.81	2500
<b>Azul</b>	47	9.207	0.664	0.9895	11.64	3000
<b>Verde</b>	55	9.386	0.693	0.9857	12.84	3000
<b>Laranja</b>	70	13.299	0.644	0.9958	13.19	3500
<b>Amarelo</b>	95	14.562	0.698	0.9853	14.67	4000

As velocidades de rotação foram fornecidas pelo fabricante do equipamento. Os dados completos dos ensaios pressão-vazão, para os microaspersores operando sem a membrana reguladora de pressão, estão apresentados na Tabela 10 do Anexo C.

Para se obter as curvas simuladas dos diâmetros de gotas em função da distância ao emissor, os valores utilizados foram a pressão de serviço, a distância que o jato alcança antes da sua ruptura e o seu ângulo de lançamento. Para a obtenção dessas curvas, os valores de pluviometria coletados no perfil de distribuição não foram relevantes, nem tampouco os diâmetros dos bocais. Isso porque na teoria balística considera-se que a partir de um determinado ângulo de lançamento e de uma pressão considerada, uma gota com volume e massa proporcional a um certo diâmetro vai alcançar uma determinada distância calculada com base apenas nas forças que atuam na gota durante a sua trajetória.

Utilizando-se, assim, a teoria balística obteve-se, por intermédio do programa SIRIAS, as relações simuladas entre diâmetros de gotas e distâncias radiais (Figura 26).

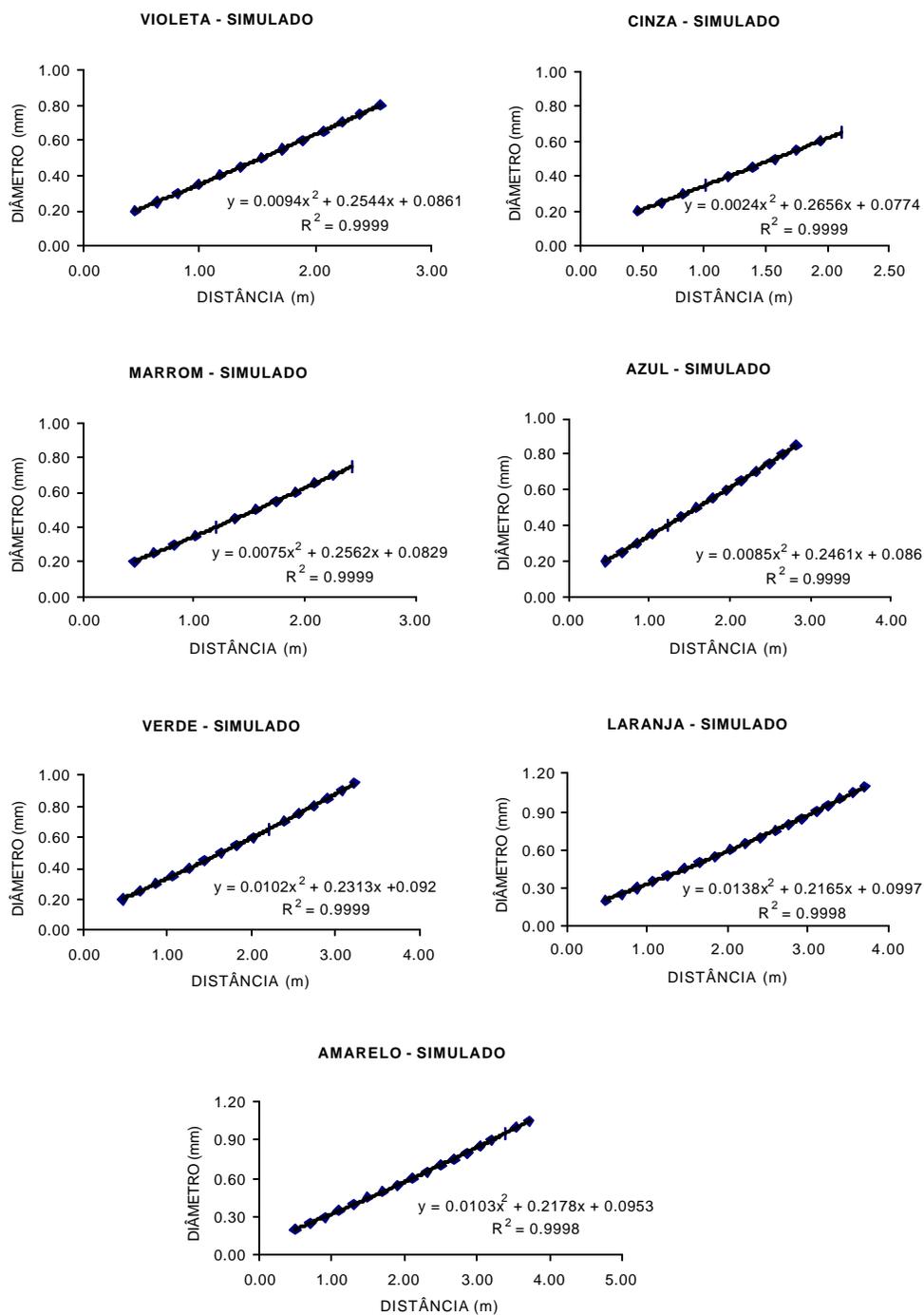


Figura 26 - Relações entre diâmetros de gotas simulados e distâncias radiais para os diferentes bocais.

As equações de regressão quadráticas ajustadas apresentaram coeficientes de determinação próximos a 1,0 (Figura 26). Essas equações foram empregadas para se determinar os diâmetros de gotas simulados em função das distâncias radiais. Os valores estimados foram, posteriormente, comparados com os valores medidos utilizando-se modelos de regressão linear simples (Figuras 27 e 28).

Para os bocais que trabalharam com rotor marrom, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram iguais a 0,9472, 0,9600 e 0,9235 e os coeficientes angulares foram de 0,6631, 0,7641 e 0,7114, para os bocais violeta, cinza e marrom, respectivamente (Figura 27).

Os bocais que empregaram rotor azul apresentaram, em geral, melhor ajuste entre os dados medidos e os simulados (Figura 27). Para o bocal azul os valores de  $R^2$  e do coeficiente angular foram, respectivamente, iguais a 0,9334 e 0,7774 e para o bocal verde o valor de  $R^2$  foi igual a 0,9302 e o coeficiente angular igual a 0,8236 (Figura 27). Os valores intermediários foram bastante próximos da reta 1:1 no bocal verde, sendo que os valores extremos se distanciaram mais, principalmente os relativos aos menores diâmetros (Figura 27).

O bocal laranja foi o que obteve os melhores valores entre os dados medidos e simulados, observando-se vários pontos coincidentes com a reta 1:1 (Figura 27). Nesse bocal registrou-se um coeficiente angular igual a 0,92 e um  $R^2$  igual a 0,9614. O bocal amarelo apresentou valores de  $R^2$  e do coeficiente angular iguais a 0,9562 e 0,8223, respectivamente, que foram inferiores aos do bocal laranja (Figura 27).

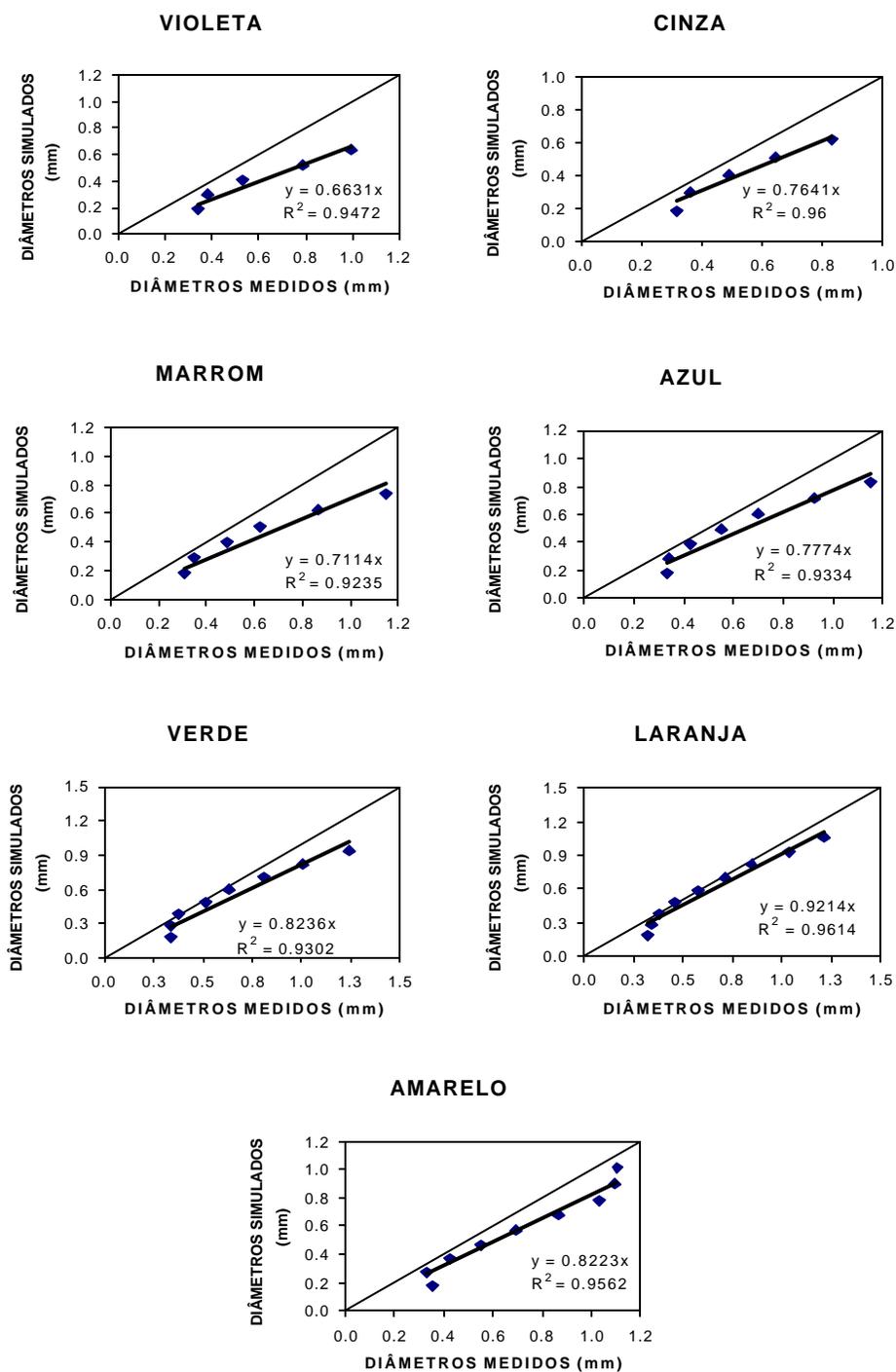


Figura 27 - Relação entre os diâmetros de gotas medidos e simulados para os diferentes bocais analisados.

De um modo geral, os diâmetros médios de gotas simulados utilizando-se o programa SIRIAS apresentaram valores inferiores aos obtidos experimentalmente (Figura 27). Observou-se, também, que as simulações referentes aos bocais com rotor azul apresentaram melhores desempenhos em relação às correspondentes aos bocais com rotor preto (Tabela 7). Para esses últimos, os desempenhos foram classificados como bom (bocal violeta) e muito bom (bocais cinza e marrom), enquanto que para os demais bocais os desempenhos das simulações foram classificados como ótimos.

Tabela 7. Valores dos coeficientes de exatidão (d), correlação (r) e confiança (c) e desempenho das simulações de diâmetros de gotas para diferentes bocais

<b>Bocal</b>	<b>d</b>	<b>r</b>	<b>c</b>	<b>Desempenho</b>
<b>Violeta</b>	0,768	0,973	0,747	Bom
<b>Cinza</b>	0,863	0,980	0,845	Muito Bom
<b>Marrom</b>	0,835	0,961	0,803	Muito Bom
<b>Azul</b>	0,899	0,966	0,869	Ótimo
<b>Verde</b>	0,936	0,965	0,902	Ótimo
<b>Laranja</b>	0,982	0,981	0,963	Ótimo
<b>Amarelo</b>	0,935	0,978	0,914	Ótimo

#### 4.5 Simulação da distribuição de água na ausência de vento

Os perfis medidos e simulados na ausência de vento para os bocais que utilizaram rotor preto apresentaram grande semelhanças, com vários pontos coincidentes (Figura 28).

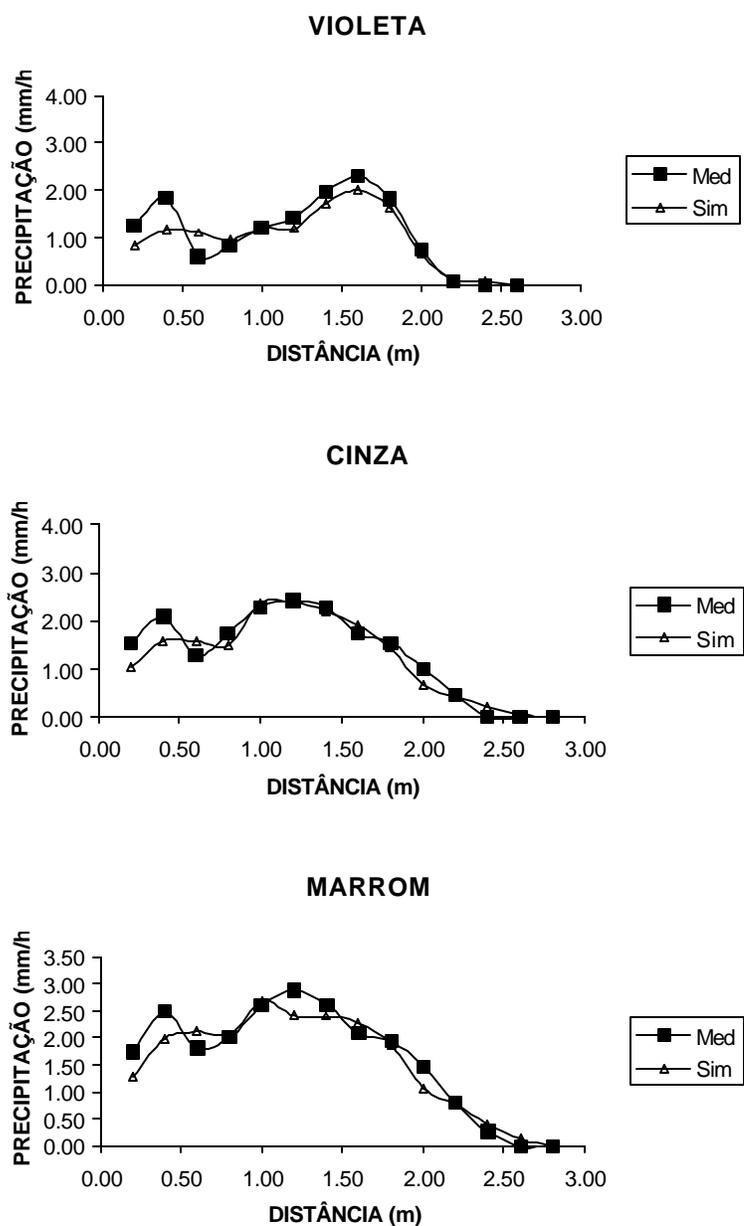


Figura 28 - Perfis de distribuição pluviométrica medidos e simulados sem vento para os bocais violeta, cinza e marrom.

Verificou-se que para os bocais que empregaram rotor azul, as precipitações registradas mais próximas ao microaspersor apresentaram diferenças mais acentuadas (Figura 29) do que as registradas com os bocais que utilizaram rotor preto (Figura 28). Essa diferença de comportamento entre os dois tipos de rotor foi devida, principalmente, à geometria interna dos mesmos.

Tanto para os bocais que operaram com rotor preto como para os que empregaram o modelo azul, as maiores diferenças foram observadas nos pontos mais próximos ao microaspersor, que corresponderam às regiões com gotas de menores diâmetros (Figuras 28 e 29). Não foi possível trabalhar no programa SIRIAS com gotas inferiores a 0,20 mm de diâmetro, sendo que o modelo balístico assume que essas gotas só caem nas regiões circunvizinhas ao emissor. Por outro lado, a metodologia empregada para a determinação dos diâmetros de gotas permitiu a mensuração somente de gotas superiores a 0,30 mm de diâmetro. É possível, contudo, que gotas de menor diâmetro tenham se formado durante a aplicação e que, na ausência de vento, elas tenham se precipitado, principalmente, sobre os coletores mais próximos ao microaspersor.

Além dos dados operacionais do emissor que são utilizados no modelo balístico, as simulações basearam-se diretamente nos perfis experimentais das distribuições de água fornecidos previamente. Essa foi, na verdade, a principal razão para o bom ajuste observado, de uma maneira geral, entre os valores medidos e simulados na ausência de vento.

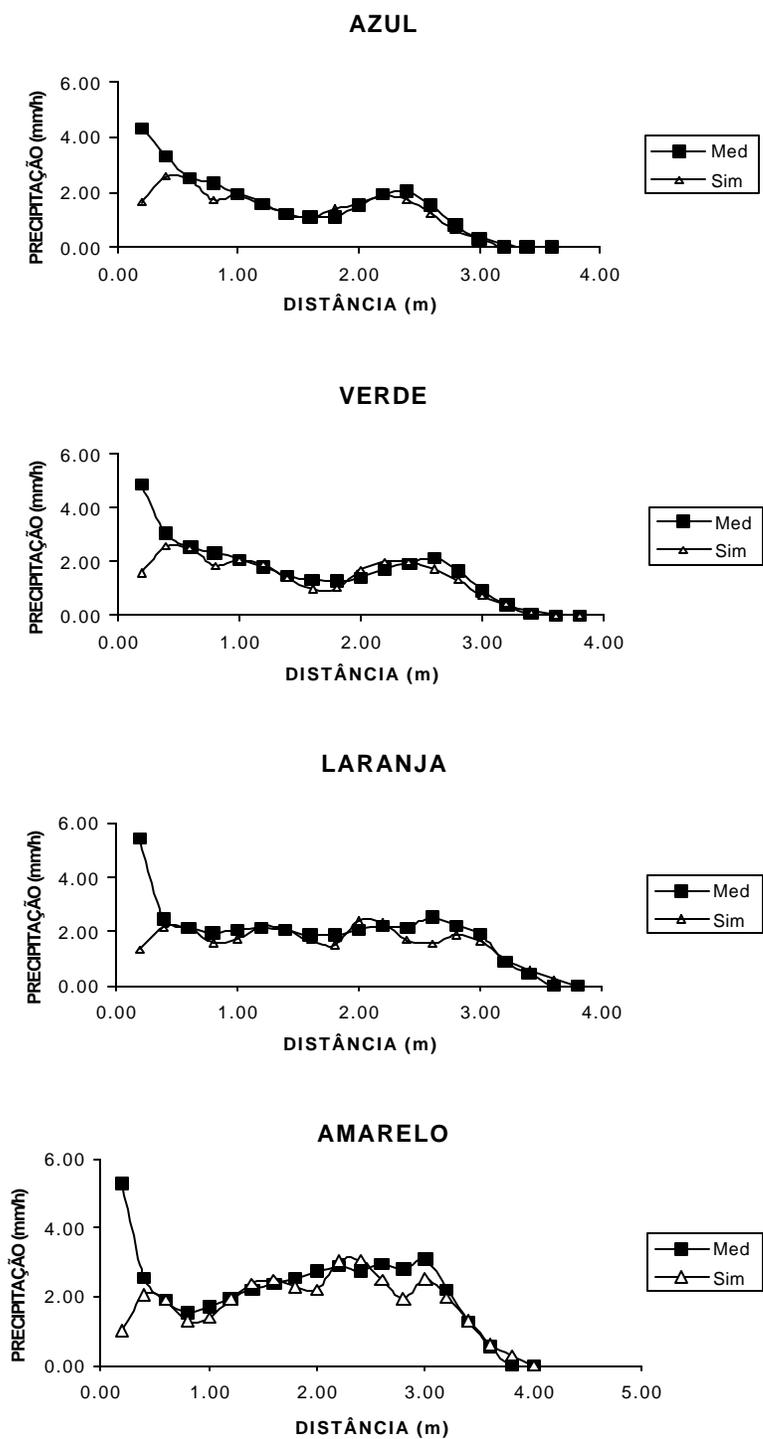


Figura 29 - Perfis de distribuição pluviométrica medidos e simulados sem vento para os bocais azul, verde, laranja e amarelo.

Deve-se considerar, entretanto, que o fato das simulações dependerem do perfil experimental de distribuição de água do emissor limita a utilização do programa para fins práticos na ausência de vento. Dessa forma, simulações com diferentes pressões de serviço, ângulos de lançamento do jato ou alturas dos bocais em relação ao solo implicarão em mudanças limitadas no perfil do emissor, uma vez que a nova configuração ainda se baseará no perfil de distribuição inicial.

Foram realizadas regressões lineares entre os valores medidos e os simulados, tanto para o perfil de distribuição como para os valores referentes às distribuições espaciais, considerando-se nas regressões somente os pares em que pelo menos um dos valores foi diferente de zero. Em todas as regressões apresentadas a linha de tendência foi forçada a passar pela origem, fazendo com isso que os coeficientes angulares das equações representassem o grau de ajuste entre os dados simulados e os medidos, enquanto que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) representassem o grau de ajuste ao modelo de regressão encontrado.

Nas regressões obtidas para as distribuições de água nos perfis radiais referentes aos bocais que empregaram rotor preto, houve um aumento proporcional dos valores de  $R^2$  com o diâmetro do bocal. Esses valores foram iguais a 0,8594, no bocal violeta; 0,9107, no bocal cinza; e 0,9214 no bocal marrom (Figura 30). Os valores dos coeficientes angulares das equações de regressão apresentaram valores próximos a 1,0, mostrando que os valores simulados se aproximaram dos valores medidos, em geral.

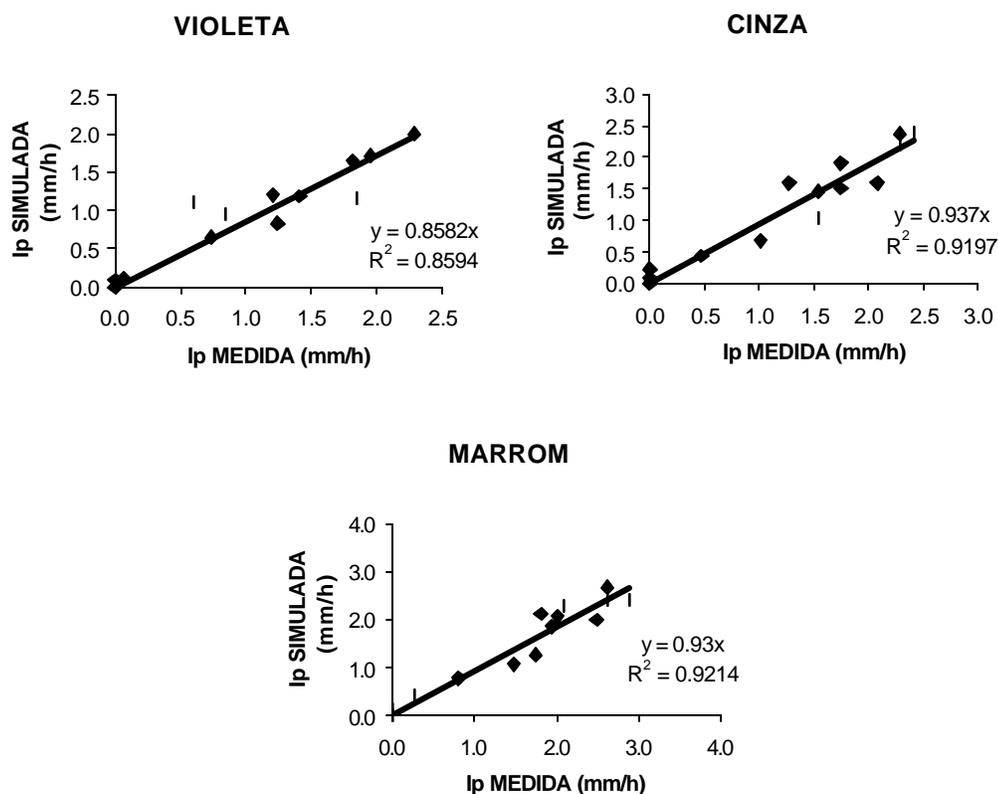


Figura 30 - Relação entre intensidades de precipitação ( $I_p$ ) medidas e simuladas nos perfis sem vento para os bocais violeta, cinza e marrom.

Para os bocais que empregaram rotor azul, considerou-se duas situações distintas: na primeira, as regressões foram obtidas utilizando-se todos os pontos registrados no perfil e na segunda, foi excluído o par referente ao valor mais próximo ao microaspersor, devido ao desvio desproporcional observado por esse valor em relação aos demais (Figura 31). Quando foram utilizados todos os valores, os coeficientes de determinação apresentaram-se muito baixos ou mesmo inconsistentes (negativos), ao passo que eliminando o primeiro conjunto de dados os valores de  $R^2$  variaram entre 0,8383 para o bocal laranja e 0,9324 para o bocal azul (Figura 31).

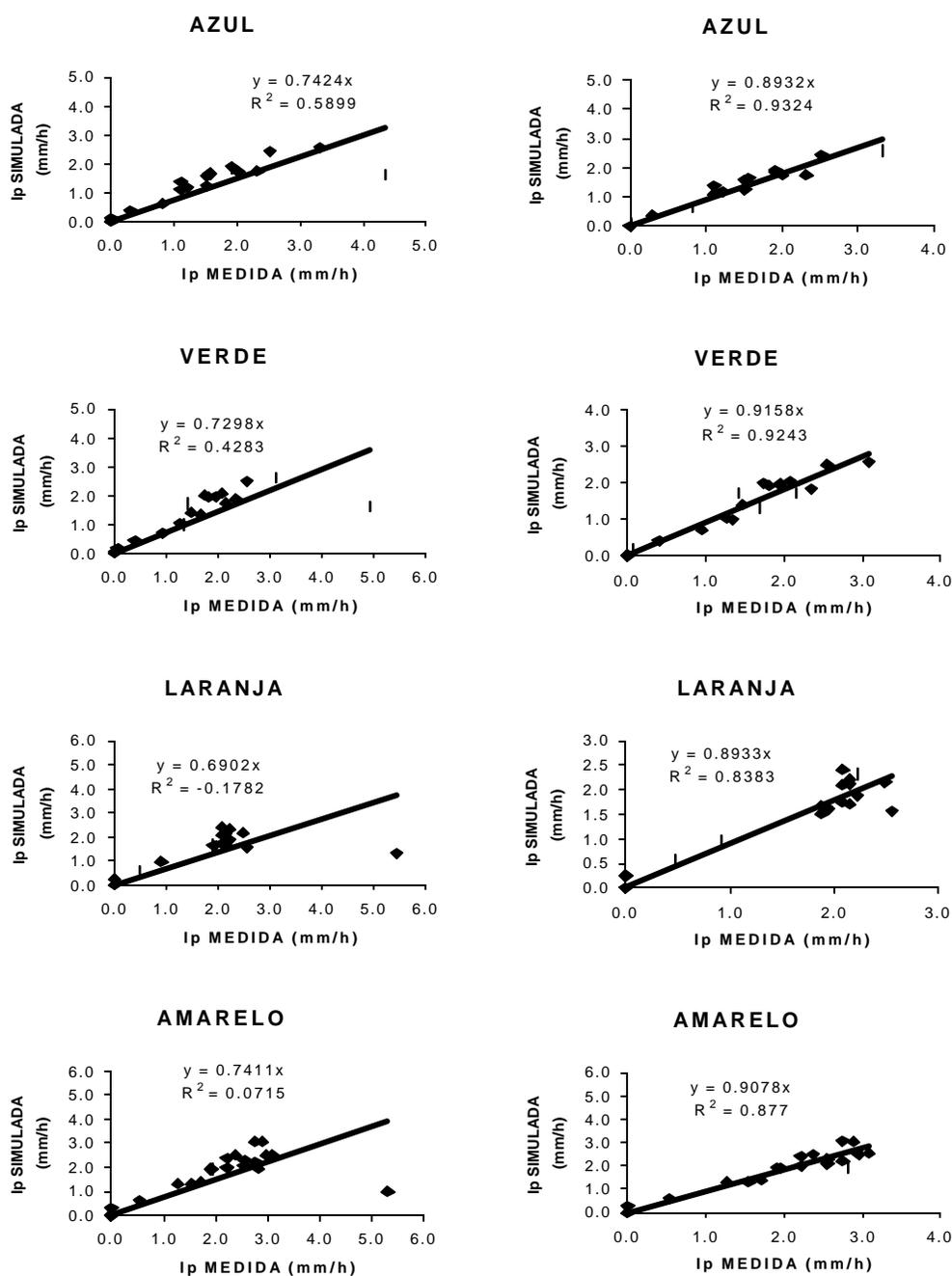


Figura 31 - Relação entre intensidades de precipitação ( $I_p$ ) medidas e simuladas nos perfis sem vento para os bocais azul, verde, laranja e amarelo, incluindo (esquerda) e excluindo (direita) os valores mais próximos ao microaspirador.

Houve uma tendência de queda dos valores de  $R^2$  do bocal azul até o laranja, observando-se uma elevação posterior para o bocal amarelo. Os coeficientes angulares variaram entre 0,8932 a 0,9158, demonstrando a proximidade entre os dados medidos e simulados.

As simulações das distribuições espaciais de água foram realizadas considerando-se apenas um quadrante da área de abrangência do microaspersor, devido à simetria existente entre os quadrantes. Os coeficientes de determinação apresentaram valores superiores a 0,99 e os coeficientes angulares foram superiores a 0,92 em todos os bocais (Figura 32). Os coeficientes de desempenho (c) ficaram próximos a 0,99 para todos os bocais, sendo classificados como ótimos, de acordo com os padrões adotados (Tabela 8). Deve-se ressaltar que tanto para os bocais com rotor preto como para os com rotor azul, foram utilizados todos os pares em que pelo menos um dos valores fosse superior a zero.

Tabela 8. Valores dos coeficientes de exatidão (d), correlação (r) e confiança (c) e desempenho das simulações de distribuição de água sem vento.

<b>Bocal</b>	<b>d</b>	<b>r</b>	<b>c</b>	<b>Desempenho</b>
<b>Violeta</b>	0,996	0,997	0,993	Ótimo
<b>Cinza</b>	0,998	0,999	0,998	Ótimo
<b>Marrom</b>	0,997	0,997	0,994	Ótimo
<b>Azul</b>	0,993	0,995	0,989	Ótimo
<b>Verde</b>	0,993	0,995	0,988	Ótimo
<b>Laranja</b>	0,993	0,996	0,989	Ótimo
<b>Amarelo</b>	0,993	0,995	0,988	Ótimo

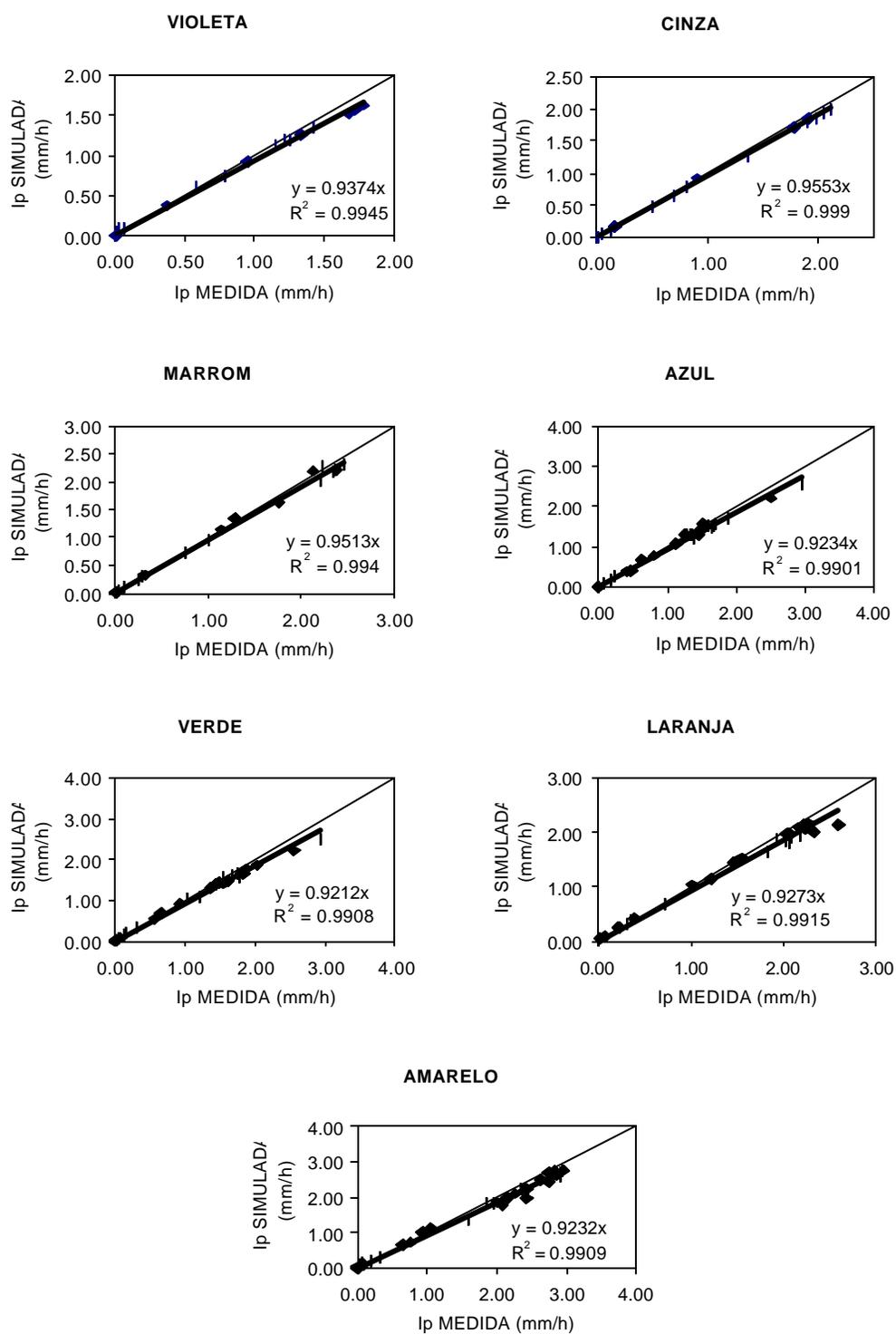


Figura 32 - Relação entre intensidades de precipitação medidas e simuladas na distribuição espacial sem vento para os diferentes bocais.

Esses coeficientes mais elevados obtidos na distribuição espacial, quando comparados aos registrados nos perfis, devem-se, principalmente, às diferenças nas distâncias entre coletores, que foi de 0,50 m na distribuição espacial e de 0,25 m no perfil. Dessa forma, tornou-se menos evidente as discrepâncias encontradas nos perfis de distribuição, principalmente nas regiões mais próximas ao emissor.

#### **4.6 Simulação da distribuição de água na presença de vento**

Os perfis obtidos em condições de vento (Figuras 33 e 34) não apresentaram os mesmos ajustes entre os valores medidos e simulados, quanto aqueles observados na ausência de vento (Figuras 28 e 29). Algumas razões podem ser apresentadas para esse comportamento diferenciado.

Em primeiro lugar a velocidade do vento não foi a mesma na área analisada, diminuindo o seu valor conforme o distanciamento aos ventiladores. Por esse motivo, a distribuição de água apresentou uma ruptura abrupta no lado oposto ao dos ventiladores, enquanto que as precipitações simuladas atingiram maiores distâncias em relação ao microaspersor (Figuras 35 e 36).

Deve-se salientar que os ventiladores trabalharam na potência máxima com apenas uma velocidade de vento por causa da variabilidade espacial encontrada, uma vez que se a velocidade fosse reduzida, aumentaria ainda mais essa variabilidade.

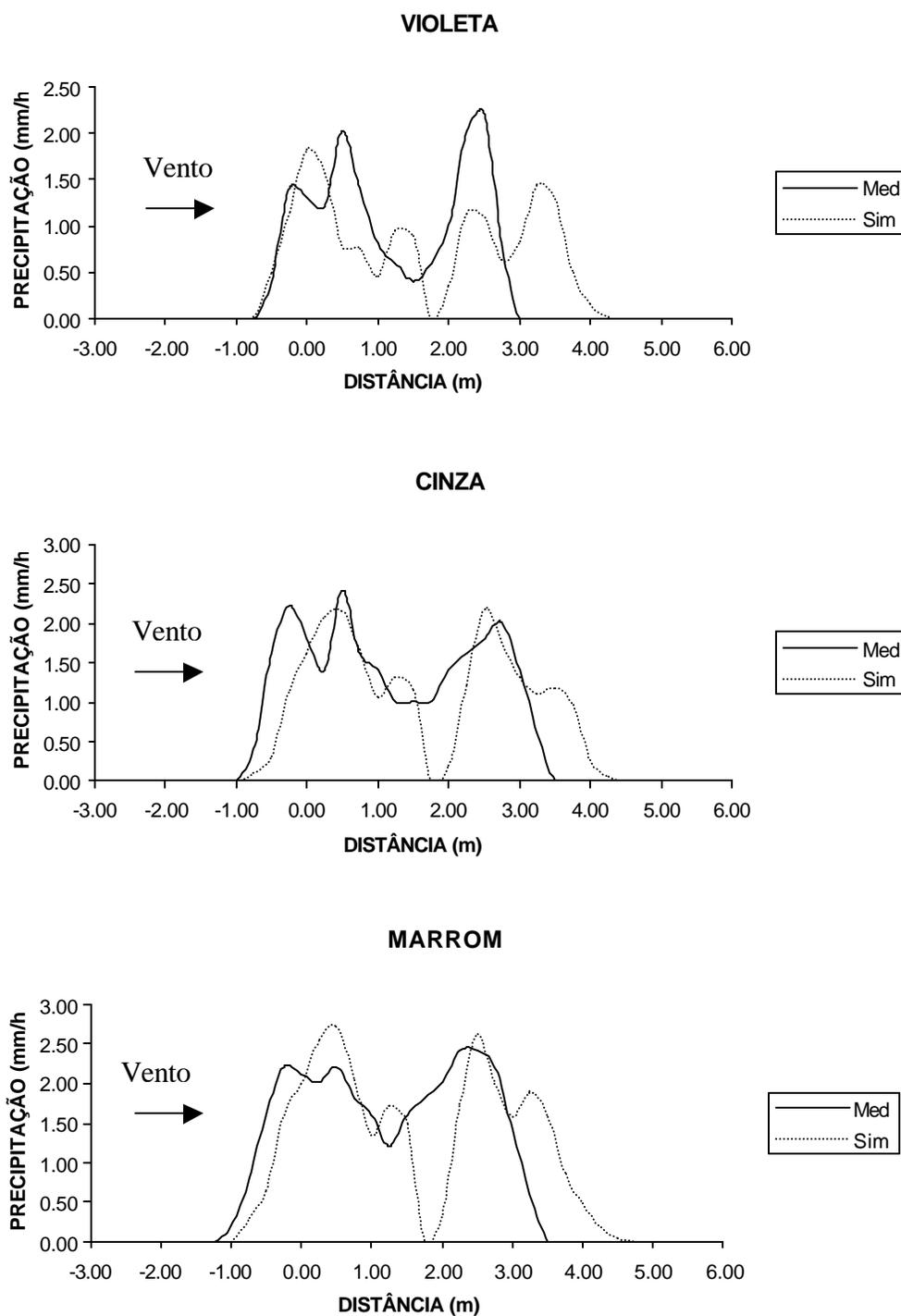


Figura 33 - Perfis de distribuição pluviométrica com vento medidos e simulados para os bocais violeta, cinza e marrom.

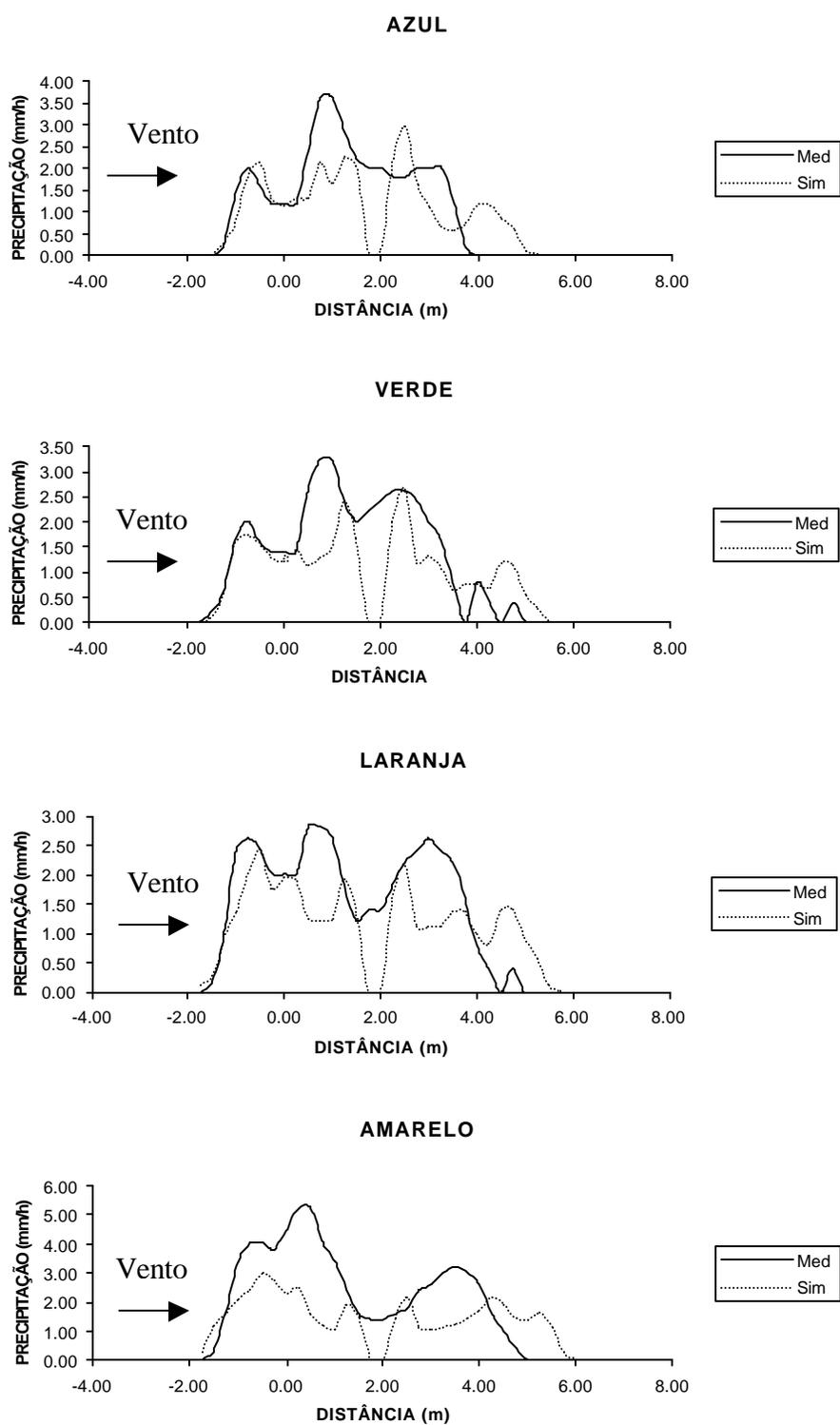


Figura 34 - Perfis de distribuição pluviométrica com vento medidos e simulados para os bocais azul, verde, laranja e amarelo.

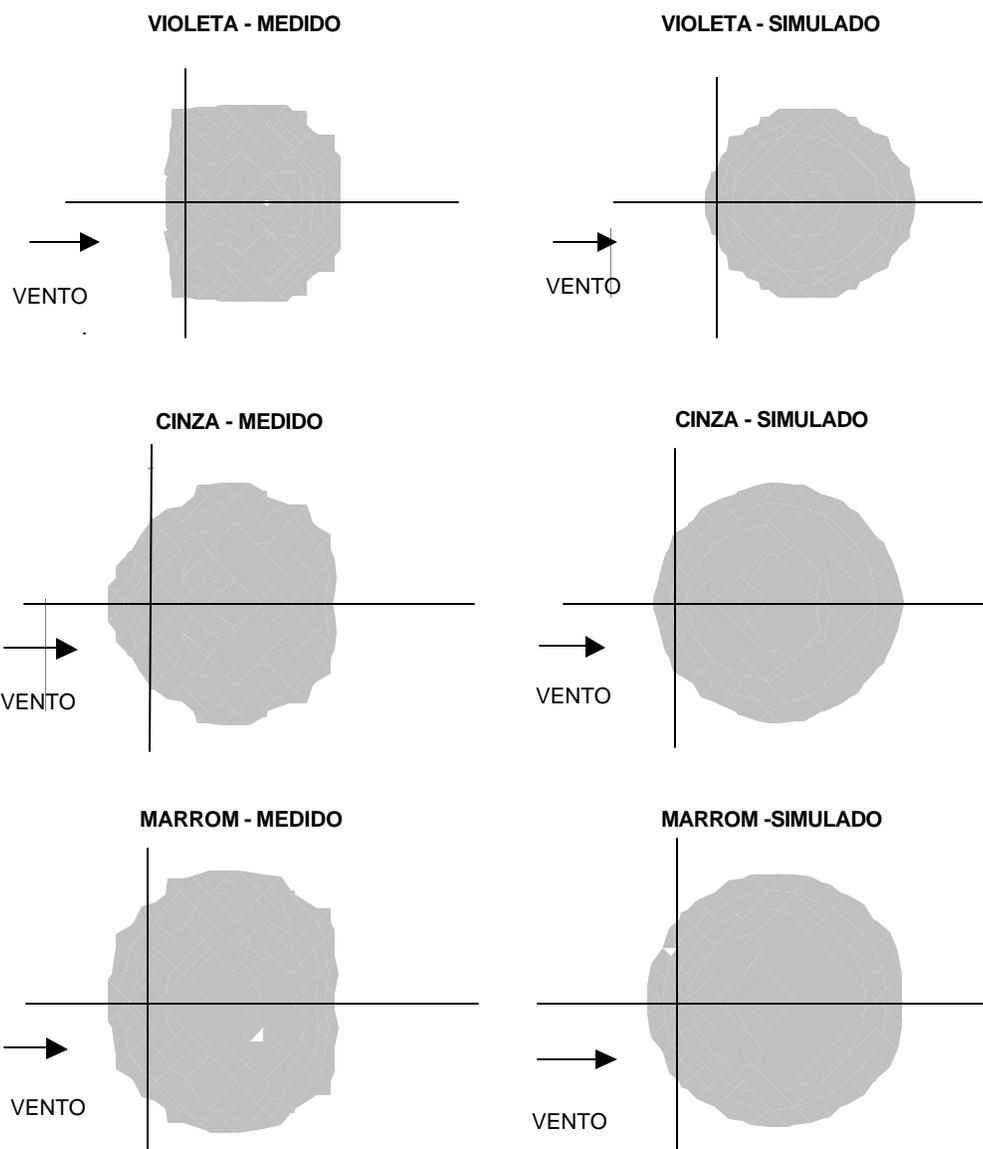


Figura 35 - Distribuições espaciais das intensidades de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ) com vento medidas e simuladas para os bocais violeta, cinza e marrom

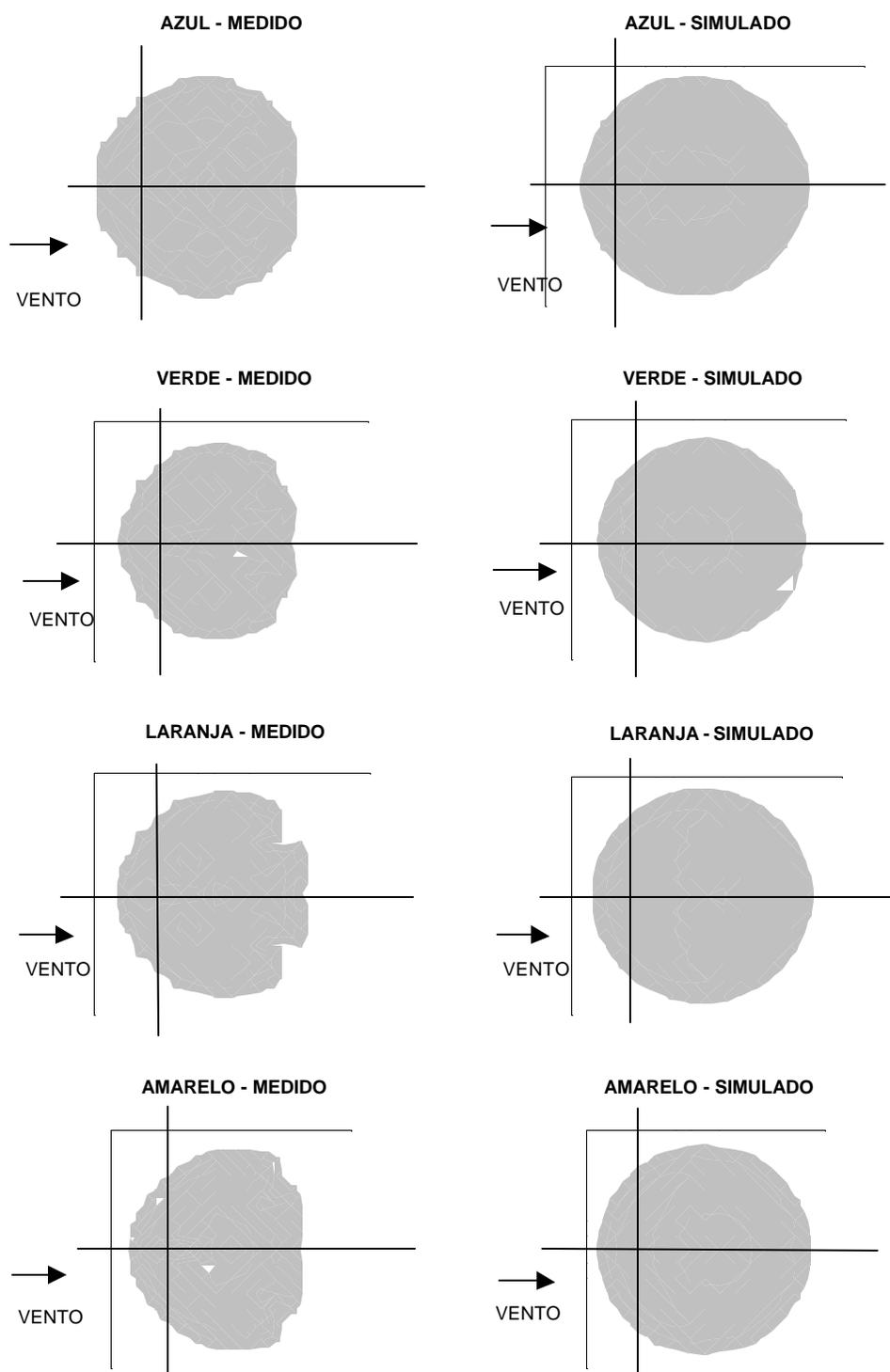


Figura 36 - Distribuições espaciais das intensidades de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ) com vento medidas e simuladas para os bocais azul, verde, laranja e amarelo.

O fluxo turbulento do vento também foi um fator de diferenciação entre os dados simulados e os medidos. O modelo matemático prevê que o vento ocorre paralelamente ao solo, o que não acontece em condições experimentais, onde houve fluxos ascendentes e descendentes atuando concomitantemente aos fluxos laterais.

Os formatos circulares das precipitações simuladas (Figuras 35 e 36) foram devidos à utilização de coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  iguais a zero. Como se explicitou na metodologia, esses coeficientes representaram fatores para corrigir a configuração da distribuição de água em condições de vento e foram ajustados por tentativas.

Os autores do programa SIRIAS empregaram valores de  $K_1$  e  $K_2$  iguais a 1,75 e 0,15, respectivamente. Esses valores também foram testados mas os ajustes foram insatisfatórios. Utilizando-se diversas combinações de  $K_1$  e  $K_2$  verificou-se que os melhores resultados foram obtidos com valores iguais a zero para os dois coeficientes. Os valores empíricos de  $K_1$  e  $K_2$  foram obtidos escolhendo-se os valores que apresentaram maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre dados medidos e simulados referentes à distribuição espacial das intensidades de precipitação ( $I_p$ ).

Com a utilização de valores de  $K_1$  e  $K_2$  iguais a zero, assumiu-se que não houve distorção na distribuição de água devido à incidência do vento, ocorrendo tão somente o deslocamento do centro de gravidade da área umedecida pelo microaspersor. Isso justifica-se, principalmente, devido à pequena distância em relação ao solo apresentada pelo microaspersor quando comparada à distância ao solo dos aspersores convencionais e, também, ao maior ângulo de lançamento do jato destes em relação àqueles.

Os maiores valores de  $R^2$  foram de 0,7747 e 0,7752 obtidos para os bocais cinza e marrom, respectivamente e o menor foi igual a 0,1542, referente ao bocal violeta (Figura 37). Deve-se notar que os três bocais citados empregaram rotor preto havendo aqui uma tendência de aumento dos  $R^2$  com o aumento da vazão dos bocais (Figura 37). Para os bocais com rotor azul os valores de  $R^2$  não ultrapassaram 0,50, havendo uma tendência de redução de  $R^2$  com o aumento dos bocais (Figura 37).

Os coeficientes angulares para os bocais com rotor preto apresentaram valores crescentes com o aumento do bocal, sendo iguais a 0,7529, 0,8710 e 0,9138 para os bocais violeta, cinza e marrom, respectivamente. Os coeficientes angulares para os bocais que trabalharam com rotor azul ficaram ao redor de 0,70.

Os baixos valores de  $R^2$  encontrados devem-se, principalmente, aos pares em que os valores medidos foram iguais a zero e os valores simulados foram maiores que zero, conforme se observa na Figura 37. Esses pares corresponderam aos valores mais distantes ao microaspersor e situados no sentido oposto ao dos ventiladores. Verifica-se que os valores de  $R^2$  seriam maiores se fossem excluídos esses pares de dados e se a curva de regressão não fosse forçada a passar pela origem. A única exceção se refere ao bocal violeta onde os valores apresentam um alto grau de dispersão em relação ao modelo, quando comparados com os demais (Figura 37).

As simulações para os bocais com rotor preto, com exceção do bocal violeta, apresentaram índices de confiança (c) mais elevados do que os observados para os bocais com rotor azul (Tabela 9), ressaltando a importância da geometria interna do rotor nos resultados obtidos.

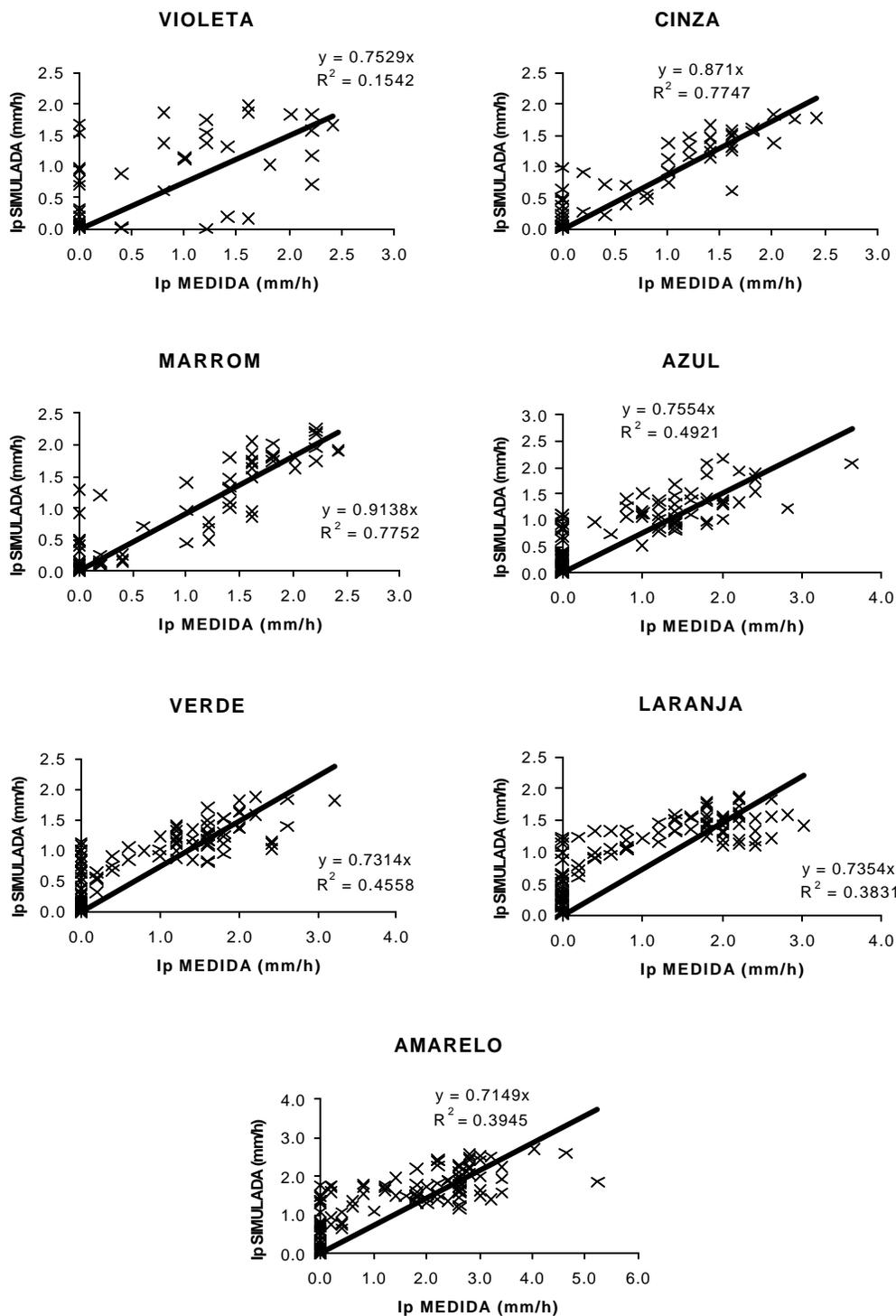


Figura 37 - Relação entre intensidades de precipitação medidas e simuladas na distribuição espacial com vento para os diferentes bocais.

Tabela 9. Valores dos coeficientes de exatidão (d), correlação (r) e confiança (c) e desempenho das simulações de distribuição de água com vento.

<b>Bocal</b>	<b>d</b>	<b>r</b>	<b>c</b>	<b>Desempenho</b>
<b>Violeta</b>	0,771	0,393	0,303	Péssimo
<b>Cinza</b>	0,943	0,880	0,830	Muito Bom
<b>Marrom</b>	0,944	0,880	0,831	Muito Bom
<b>Azul</b>	0,869	0,701	0,610	Regular
<b>Verde</b>	0,860	0,675	0,581	Regular
<b>Laranja</b>	0,849	0,619	0,525	Regular
<b>Amarelo</b>	0,842	0,628	0,529	Regular

Entre os bocais com rotor preto, somente o bocal violeta apresentou um coeficiente de confiança péssimo, sendo que os bocais cinza e marrom apresentaram desempenhos classificados como muito bom. Todos os bocais que operaram com rotor azul apresentaram desempenho regular (Tabela 9).

De acordo com Camargo & Sentelhas (1997), o coeficiente de correlação (r) reflete a precisão do modelo, indicando o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, enquanto que a exatidão (d) se refere ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Com base nesses conceitos, pode-se afirmar que, em todos os bocais, as diferenças entre valores medidos e simulados foram menores do que as dispersões em relação às médias, uma vez que os índices de exatidão foram, em geral, relativamente altos comparados aos níveis de precisão do modelo (Tabela 9).

Verificou-se que a geometria interna do rotor afetou diretamente o desempenho do modelo, havendo a necessidade de considerá-la como variável de entrada em modelos matemáticos para emissores que utilizem esse dispositivo.

Tarjuelo et al. (1994) utilizaram o mesmo modelo balístico empregado no programa SIRIAS para simularem a distribuição de água de aspersores sob condições de vento. Os autores compararam valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) obtidos no campo e simulados pelo modelo, para diferentes espaçamentos retangulares entre aspersores, verificando que as diferenças entre os CUC's medidos e simulados foram sempre inferiores a 10%.

Esses valores de CUC, todavia, não refletem as diferenças absolutas entre as lâminas coletadas e simuladas, quando considera-se apenas um emissor. Para a análise dessas diferenças os autores utilizaram o índice D (eq. 7). Para velocidades de vento entre  $3,20 \text{ m s}^{-1}$  e  $5,75 \text{ m s}^{-1}$  os autores encontraram valores de D entre 0,32 e 0,63, sendo que os maiores foram obtidos para as velocidades de vento mais altas.

No presente trabalho, os valores de D ficaram entre 0,30 e 0,71 (Tabela 10), apresentando a mesma ordem de grandeza dos obtidos por Tarjuelo et al. (1994) para aspersores convencionais. Pode-se inferir, dessa maneira, que se fossem utilizadas sobreposições para os microaspersores, as diferenças entre os valores de CUC medidos e simulados também seriam pequenas, como as observadas por Tarjuelo et al. (1994).

Tabela 10. Valores das diferenças normalizadas (D) entre lâminas medidas e simuladas.

<b>BOCAIS</b>	<b>Violeta</b>	<b>Cinza</b>	<b>Marrrom</b>	<b>Azul</b>	<b>Verde</b>	<b>Laranja</b>	<b>Amarelo</b>
<b>D</b>	0,71	0,30	0,31	0,46	0,45	0,41	0,44

O modelo balístico apresentado por Tarjuelo et al. (1994) foi desenvolvido, principalmente, para simular os valores de CUC, a fim de utilizá-los em estudos de distribuição de água para aspersores convencionais operando sob condições de vento. Uma vez ajustado o modelo, ele poderia ser empregado, por exemplo, para a determinação do melhor espaçamento entre emissores, a fim de manter elevado o valor da uniformidade de distribuição do sistema. Por essa razão, o seu desempenho diminui quando ele é utilizado para avaliar a aplicação de água de emissores isolados.

Uma limitação adicional do programa SIRIAS refere-se ao cálculo das perdas por deriva e evaporação (PDE), que influem diretamente na obtenção das lâminas simuladas. O programa calculou as PDE por meio de um modelo de regressão desenvolvido pelos autores, com base em variáveis como umidade relativa, temperatura e vento. Esse modelo, contudo, subestimou acentuadamente as perdas em comparação com as verificadas durante os ensaios, uma vez que esses foram realizados com equipamentos e condições diferentes das utilizados pelos autores. Uma vez que não foi possível modificar a função para cálculo das PDE, utilizou-se nas simulações os valores que foram obtidos experimentalmente em laboratório (Tabela 5).

A impossibilidade de uso dos valores de PDE calculados pelo programa, limita a sua utilização prática. Essa limitação impede a sua utilização para condições em que os

valores de PDE sejam diferentes dos observados experimentalmente. Esse é o caso, por exemplo, de se trabalhar com diferentes velocidades de vento ( $V_v$ ) ou diferentes alturas de instalação ( $h$ ), uma vez que os valores de PDE irão variar em função de  $V_v$  e  $h$ .

Deve-se ressaltar, contudo, que essa limitação não inviabilizou o uso de modelo balístico para se estudar a distribuição de água em condições de vento, uma vez que o programa utilizou um modelo de regressão para cálculo de PDE e não o modelo balístico. Na verdade, essa limitação ressalta a importância dos modelos mecânicos para esse tipo de estudo, já que eles podem ser extrapolados para diferentes condições de operação, enquanto que os modelos baseados em regressões ficam, muitas vezes, limitados à sua utilização sob as mesmas condições de operação em que foram desenvolvidos.

#### **4.7 Considerações finais**

Estudos sobre o efeito do vento na distribuição de água em microaspersores podem ser realizados em laboratório, permitindo um maior controle das condições ambientais e operacionais do emissor. Para isso, contudo, deve-se desenvolver sistemas de ventilação e condução do fluxo de ar que permitam reduzir as variabilidades espaciais observadas no presente trabalho.

Os altos valores das perdas por evaporação e deriva (PDE) indicaram que ocorrem reduções acentuadas da eficiência de aplicação dos sistemas sob condições de vento, além das alterações encontradas na sua distribuição de água. Deve-se buscar,

assim, em futuros trabalhos, correlacionar essas perdas com as condições operacionais e ambientais em que são empregados os microaspersores.

Os valores de PDE obtidos refletem, também, a formação de um volume considerável de gotas menores que 0,30 mm durante a aplicação de água. Novos estudos devem, assim, ser realizados utilizando-se outros métodos de determinação que permitam o registro de gotas com diâmetros inferiores a 0,30 mm.

Estimativas envolvendo a evaporação de água (sem considerar a deriva) durante a aplicação poderão ser obtidas a partir dos valores referentes à superfície específica do volume aplicado pelos diferentes bocais, conforme definição apresentada no Anexo D.

Ressaltou-se, durante a discussão apresentada, o efeito da geometria interna do rotor sobre a distribuição de água dos microaspersores e sobre o desempenho do modelo de simulação. Outras avaliações experimentais devem ser realizadas com o intuito de estudar esse efeito em outros modelos de emissores.

Recomenda-se, por fim, o desenvolvimento de modelos matemáticos que possam incluir o efeito da geometria interna e da rotação do rotor na distribuição de água em sistemas de microaspersão.

## 5 CONCLUSÕES

Considerando-se as condições em que foi desenvolvido o experimento e com base nos resultados obtidos, concluiu-se que:

- Os diâmetros médios de gotas emitidas pelos diferentes bocais variaram entre 0,51 mm e 0,86 mm;

- Os diâmetros médios de gotas apresentaram-se diretamente proporcionais à distância ao microaspersor;

- As intensidades de precipitação máximas para os diferentes bocais, na ausência de vento, ficaram entre 2,28 mm h<sup>-1</sup> e 5,44 mm h<sup>-1</sup>;

- Os maiores percentuais relativos aos volumes de água aplicados, na ausência de vento, ficaram entre as distâncias de 1,2 m e 1,8 m, para os bocais violeta, cinza e marrom; entre 1,8 m e 2,4 m para o bocal azul; e entre 2,4 m e 3,0 m, para os bocais verde, laranja e amarelo;

- As áreas molhadas e os volumes coletados em condições de vento foram inferiores aos obtidos na ausência de vento, enquanto que as intensidades médias de precipitação com vento foram superiores às sem vento;

- As perdas de água por deriva e evaporação na presença de vento representaram entre 17,1% e 30,2% do volume total aplicado sem vento;

- As simulações utilizando o modelo balístico subestimaram, em geral, os diâmetros médios de gotas obtidos experimentalmente;
- O desempenho do modelo balístico na estimativa dos diâmetros de gotas foi classificado como bom, para o bocal violeta; muito bom, para os bocais cinza e marrom; e ótimo, para os bocais azul, verde, laranja e amarelo;
- O desempenho do modelo balístico na simulação da distribuição de água na ausência de vento, foi classificado como ótimo para todos os bocais analisados;
- O modelo balístico apresentou um desempenho péssimo, para o bocal violeta; regular, para os bocais azul, verde, laranja e amarelo; e muito bom para os bocais cinza e marrom, nas simulações da distribuição de água em condição de vento;
- A geometria interna dos rotores dos microaspersores foi o fator que mais influenciou o desempenho do modelo balístico em relação aos diferentes bocais analisados.

# **ANEXOS**

**ANEXO A - Relação vazão-pressão para os diferentes bocais operando com a membrana autocompensante.**

Tabela 11. Valores das vazões ( $L h^{-1}$ ) em função da pressão de serviço para diferentes bocais, com as correspondentes vazões nominais, do microaspersor DAN 2001 com a membrana autocompensante.

Bocal	Vazão (l/h)	Pressão (mca)											
		12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30	32.5	35	37.5	40
Violeta	20	20.7	20.0	19.7	19.3	19.7	20.1	20.3	20.5	20.7	20.9	21.1	21.2
Cinza	28	25.9	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.4	28.8	29.0	29.1	29.2	29.2
Marrom	35	34.5	33.6	34.2	34.8	35.5	36.2	36.6	36.9	37.0	37.0	37.0	36.9
Azul	47	46.5	48.0	47.5	46.9	47.1	47.3	47.8	48.2	48.7	49.1	49.1	49.1
Verde	55	54.4	54.4	53.8	53.1	53.8	54.5	54.7	54.8	54.7	54.6	54.3	54.0
Laranja	70	70.5	72.1	70.3	68.5	69.3	70.0	71.2	72.4	72.8	73.2	73.0	72.8
Amarelo	95	90.5	93.1	92.2	91.3	92.5	93.6	94.6	95.5	95.4	95.3	95.0	94.7

Fonte: DAN SPRINKLERS.

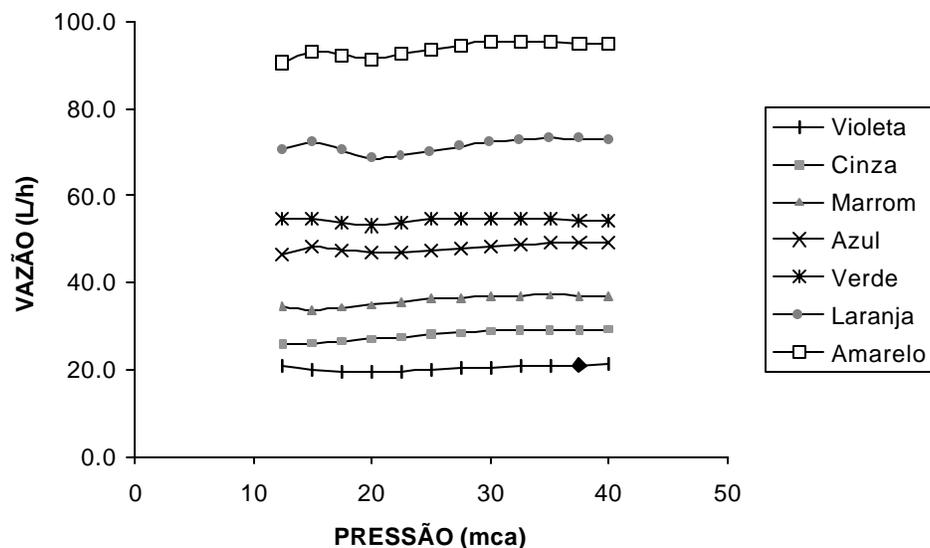


Figura 38 - Curvas de pressão-vazão para os diferentes bocais empregando-se membrana reguladora de pressão (dados do fabricante).

## ANEXO B - Teoria balística para a distribuição dos diâmetros de gotas

A determinação da distribuição de gotas aplicadas por um aspersor se baseia na teoria balística e está resumida a seguir, conforme o desenvolvimento apresentado por Seginer (1965), Fukui (1980), Bernuth & Gilley (1984) e, principalmente, Tarjuelo et al. (1994).

Na trajetória de uma gota no ar, estarão atuando, conjuntamente, a força de resistência aerodinâmica ( $F_r$ ), atuando na direção de sua velocidade ( $V$ ) mas em sentido contrário; e a força da gravidade ( $F_g$ ), atuando verticalmente para baixo (Figura 39).

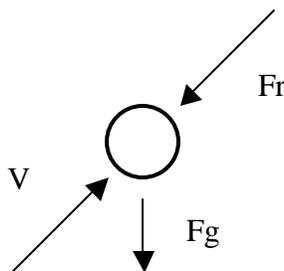


Figura 39 - Esquema das forças que atuam em uma gota em movimento no ar.

A força de gravidade ( $F_g$ ) é igual a:

$$F_g = m \cdot g \quad (9)$$

em que  $m$  é a massa da gota e  $g$  é a aceleração da gravidade. O valor de  $F_r$  pode ser obtido da seguinte maneira:

$$F_r = m \cdot C_2 \cdot V^2 \quad (10)$$

onde  $C_2$  é o coeficiente de resistência aerodinâmica e  $V$  é a velocidade da gota no ar.

O valor de  $C_2$  será função do diâmetro da gota ( $D$ ). Para gotas entre 0,2 mm e 1,3 mm ele pode ser calculado pela seguinte expressão, apresentada por Bernuth & Gilley (1984):

$$C_2 = 0,5463 D^{-2,113} \quad (11)$$

O valor de  $C_2$  pode, também, ser obtido em função do número de Reynolds (Fukui et al., 1980), conforme metodologia adotada pelos autores do modelo SIRIAS:

$$C_2 = \frac{3}{4} \left[ \frac{\rho_e}{\rho_w} \right] \left[ \frac{C}{D} \right] \quad (12)$$

em que  $\rho_e$  é a densidade do ar,  $\rho_w$  é a densidade da água e  $C$  é um coeficiente que depende do número de Reynolds ( $Re$ ), de acordo com os seguintes intervalos:

$$Re < 128 \quad \Rightarrow \quad C = 1,2 - 0,0033 Re + \left[ \frac{33,3}{Re} \right]$$

$$128 < Re < 1440 \quad \Rightarrow \quad C = 0,48 - 0,000556 Re + \left[ \frac{72,2}{Re} \right]$$

$$Re > 1440 \quad \Rightarrow \quad C = 0,45$$

Para efeito de cálculo,  $Fr$  pode ser decomposta em  $Fr_x$  e  $Fr_y$ , que representam, respectivamente, a componente horizontal e vertical de  $Fr$ . Sendo assim, tem-se:

$$Fr_x = m C_2 V^2 \cos \theta = m C_2 V V \cos \theta \quad (13)$$

$$Fr_y = m C_2 V^2 \sin \theta = m C_2 V V \sin \theta \quad (14)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de inclinação da trajetória da gota com a horizontal. Entretanto:

$$V \cos \theta = V_x \quad (15)$$

$$V \sin \theta = V_y \quad (16)$$

sendo que  $V_x$  e  $V_y$  são os componentes horizontal e vertical do vetor velocidade, respectivamente. Logo:

$$F_{rx} = m C_2 V V_x \quad (17)$$

$$F_{ry} = m C_2 V V_y \quad (18)$$

As equações que descrevem o movimento de uma gota podem, assim, ser obtidas a partir de seu equilíbrio dinâmico:

$$m A = m \frac{dV}{dt} = \Sigma F \quad (19)$$

em que  $A$  é a aceleração da gota e  $t$  é o tempo de percurso da gota. Dessa maneira, as forças que atuam na direção horizontal ( $X$ ) e na direção vertical ( $Y$ ) poderão ser descritas pelas seguintes equações diferenciais:

$$m \frac{dV_x}{dt} = -m C_2 V V_x \quad (20)$$

$$m \frac{dV_y}{dt} = -m C_2 V V_y - m g \quad (21)$$

Eliminando-se a massa ( $m$ ) nas equações 20 e 21, tem-se:

$$\frac{dV_x}{dt} = -C_2 V V_x \quad (22)$$

$$\frac{dV_y}{dt} = -C_2 V V_y - g \quad (23)$$

Deve-se considerar que:

$$V = (V_x^2 + V_y^2)^{0,5} \quad (24)$$

Logo:

$$\frac{dV_x}{dt} = -C_2 (V_x^2 + V_y^2)^{0,5} V_x \quad (25)$$

$$\frac{dV_y}{dt} = -C_2 (V_x^2 + V_y^2)^{0,5} V_y - g \quad (26)$$

As equações 25 e 26 podem ser resolvidas pelo método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem (Ruggiero & Lopes, 1997), sendo possível calcular o tempo de voo, a velocidade resultante e a distância percorrida pela gota, dado o seu vetor velocidade inicial. Pode-se, assim, desenvolver as equações 25 e 26 da seguinte forma:

$$V_x(i) = V_x(i-1) + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (27)$$

onde:

$$k_1 = \Delta t \{-C_2 [(V_x(i-1))^2 + (V_y(i-1))^2]^{0,5} V_x(i-1)\}$$

$$k_2 = \Delta t \left\{ -C_2 \left[ \left[ V_x(i-1) + \frac{k_1}{2} \right]^2 + \left[ V_y(i-1) + \frac{k_1}{2} \right]^2 \right]^{0,5} \left[ V_x(i-1) + \frac{k_1}{2} \right] \right\}$$

$$k_3 = \Delta t \left\{ -C_2 \left[ \left[ V_x(i-1) + \frac{k_2}{2} \right]^2 + \left[ V_y(i-1) + \frac{k_2}{2} \right]^2 \right]^{0,5} \left[ V_x(i-1) + \frac{k_2}{2} \right] \right\}$$

$$k_4 = \Delta t \cdot \{-C_2 \cdot [(V_x(i-1) + k_3)^2 + (V_y(i-1) + k_3)^2]^{0,5} \cdot [V_x(i-1) + k_3] \}$$

Para  $V_y$  tem-se:

$$V_y(i) = V_y(i-1) + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (28)$$

sendo que:

$$k_1 = \Delta t \cdot \{-C_2 \cdot [(V_x(i-1))^2 + (V_y(i-1))^2]^{0,5} V_y(i-1) - g\}$$

$$k_2 = \Delta t \left\{ \left\{ -C_2 \left[ \left[ V_x(i-1) + \frac{k_1}{2} \right]^2 + \left[ V_y(i-1) + \frac{k_1}{2} \right]^2 \right]^{0,5} \left[ V_y(i-1) + \frac{k_1}{2} \right] \right\} - g \right\}$$

$$k_3 = \Delta t \left\{ \left\{ -C_2 \left[ \left[ V_x(i-1) + \frac{k_2}{2} \right]^2 + \left[ V_y(i-1) + \frac{k_2}{2} \right]^2 \right]^{0,5} \left[ V_y(i-1) + \frac{k_2}{2} \right] \right\} - g \right\}$$

$$k_4 = \Delta t \cdot \{ \{-C_2 \cdot [(V_x(i-1) + k_3)^2 + (V_y(i-1) + k_3)^2]^{0,5} \cdot [V_y(i-1) + k_3] \} - g \}$$

Nas equações acima  $\Delta t$  representa o tamanho do intervalo de tempo empregado nas iterações. Quanto menor o valor de  $\Delta t$  mais precisa será a resposta mas, em compensação, maior deverá ser o número de iterações. Tarjuelo et al. (1994) sugerem valores de  $\Delta t$  iguais a 0,01 s ou 0,02 s.

O vetor velocidade inicial ( $V(o)$ ) consiste na velocidade absoluta e no ângulo do jato ( $\theta$ ). A velocidade do jato pode ser obtida assumindo-se que uma determinada fração da pressão de operação é convertida em velocidade, multiplicando a pressão por um coeficiente de descarga. A velocidade assim obtida representa a velocidade inicial média. A partir do valor de  $V(o)$  obtém-se:

$$V_x(o) = V(o) \cos \theta \quad (29)$$

$$V_y(o) = V(o) \sin \theta \quad (30)$$

A partir dos valores de velocidade obtidos empregando-se as equações 27 e 28, obtém-se o valor da posição ( $X, Y$ ) da gota em relação ao bocal (0,0):

$$X(i) = X(i-1) + \frac{1}{6} (k_1 + 2 k_2 + 2 k_3 + k_4) \quad (31)$$

onde:

$$k_1 = \Delta t [ V_x(i-1) ]$$

$$k_2 = \Delta t \left[ V_x(i-1) + \frac{k_1}{2} \right]$$

$$k_3 = \Delta t \left[ V_x(i-1) + \frac{k_2}{2} \right]$$

$$k_4 = \Delta t [ Vx(i-1) + k_3 ]$$

e, por conseguinte:

$$Y(i) = Y(i-1) + \frac{1}{6} (k_1 + 2 k_2 + 2 k_3 + k_4) \quad (32)$$

em que:

$$k_1 = \Delta t [ Vy(i-1) ]$$

$$k_2 = \Delta t \left[ Vy(i-1) + \frac{k_1}{2} \right]$$

$$k_3 = \Delta t \left[ Vy(i-1) + \frac{k_2}{2} \right]$$

$$k_4 = \Delta t [ Vy(i-1) + k_3 ]$$

Pode-se obter, assim, pelas equações 31 e 32, o local onde gotas de determinado diâmetro atingem o pluviômetro correspondente, permitindo relacionar os diâmetros de gotas às respectivas distâncias radiais. O número de gotas correspondentes àquela distância pode, então, ser calculado dividindo-se o volume de água coletado pelo volume unitário de cada gota. Esse procedimento pode ser repetido para todo o perfil de distribuição do emissor.

Deve-se observar que a teoria balística prevê que gotas de determinado diâmetro só caem a uma distância fixa do emissor, o que, na verdade, não ocorre na prática. De qualquer maneira, é com base nessa consideração que pode-se calcular a distribuição do diâmetro de gotas a partir dos volumes coletados no perfil.

Assumindo-se que em um anel circular de espessura  $(r_n - r_{n-1})$ , onde  $r_n$  e  $r_{n-1}$  são, respectivamente, os raios externo e interno do anel, só caem gotas esféricas de diâmetro

D, o número de gotas (Nd) correspondente ao anel pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$Nd = \frac{6 L (r_n^2 - r_{n-1}^2)}{D^3} \quad (33)$$

em que L é a lâmina coletada no pluviômetro correspondente ao anel circular ( $r_n - r_{n-1}$ ).

A partir do valor de Nd pode-se calcular a frequência de gotas, em relação ao total aplicado, correspondente a cada anel circular.

**ANEXO C - Relação vazão-pressão para os diferentes bocais operando sem a membrana autocompensante.**

Tabela 12. Valores das vazões (L h<sup>1</sup>) em função da pressão de serviço para diferentes bocais do microaspersor DAN 2001 sem a membrana autocompensante.

Pressão (mca)	BOCAL						
	Violeta	Cinza	Marron	Azul	Verde	Laranja	Amarelo
5.0	12.2	14.7	20.1	25.2	26.6	36.4	41.6
5.0	12.0	14.5	20.1	25.6	26.9	36.3	41.6
5.0	12.4	14.6	20.3	25.1	26.2	35.9	40.9
5.0	12.0	14.7	20.2	24.9	26.4	36.2	41.3
5.0	12.0	14.5	20.1	25.0	26.2	36.1	41.5
10.0	19.8	27.7	33.9	45.5	50.5	60.2	78.7
10.0	19.5	27.2	34.0	45.8	49.4	60.3	78.9
10.0	20.3	27.5	34.3	45.2	50.2	60.0	77.9
10.0	19.7	27.7	34.2	45.1	50.5	60.0	78.8
10.0	19.7	27.3	34.0	45.1	50.2	60.0	79.3
15.0	26.1	37.2	45.0	58.1	65.0	79.4	102.5
15.0	25.8	36.6	45.2	58.7	64.4	79.3	103.0
15.0	26.8	37.1	45.5	57.9	64.5	78.9	101.4
15.0	26.0	37.3	45.6	57.7	65.1	79.2	102.9
15.0	26.1	37.0	45.2	57.5	64.7	79.1	103.4
20.0	29.8	44.4	53.3	69.4	76.4	92.3	120.1
20.0	29.4	43.9	53.8	70.1	75.8	92.4	120.8
20.0	30.5	44.5	54.0	69.1	76.0	91.7	118.8
20.0	29.6	44.6	53.7	68.9	76.8	92.6	120.5
20.0	29.6	44.3	53.4	68.9	76.5	92.0	121.4
25.0	36.2	50.5	60.9	77.7	86.6	107.1	136.4
25.0	35.6	49.9	61.4	78.5	86.0	106.7	138.0
25.0	37.2	50.6	61.5	77.5	86.2	105.9	135.1
25.0	35.9	50.6	61.4	77.1	87.1	107.0	136.9
25.0	36.1	50.3	61.1	77.3	86.8	107.3	138.5
30.0	40.7	56.3	68.1	86.1	97.2	117.6	152.0
30.0	39.8	55.6	68.6	87.0	96.6	117.1	154.4
30.0	41.6	56.4	68.9	85.8	96.5	116.0	150.6
30.0	40.1	56.5	68.7	85.4	97.5	117.2	152.9
30.0	40.4	56.1	68.3	85.8	97.1	116.3	154.2
35.0	44.1	61.1	73.6	94.0	104.8	128.5	164.4
35.0	42.9	60.4	74.3	94.9	104.4	127.8	168.0
35.0	45.0	61.2	74.8	93.7	104.3	126.3	163.7
35.0	43.3	61.3	74.5	94.2	105.3	128.3	166.1
35.0	43.8	60.9	74.0	93.6	104.9	126.7	168.0

**ANEXO D - Superfície específica e índice de expansão correspondentes aos volumes aplicados pelos diferentes bocais dos microaspersores**

A superfície específica do volume de água aplicado representa a área que fica exposta à evaporação durante a aplicação de água. Uma gota esférica hipotética cujo volume for correspondente a 1,0 L terá um diâmetro igual a, aproximadamente, 124 mm (que é a unidade empregada para diâmetros de gotas). Essa mesma gota apresentará uma superfície igual a 0,048 m<sup>2</sup>. Ao se fracionar essa mesma gota hipotética de 1,0 L em gotas menores, as novas superfícies específicas (SE) determinadas serão maiores que 0,048 m<sup>2</sup>.

As razões entre as novas SE e a superfície inicial (0,048 m<sup>2</sup>) representam os índices de expansão do volume aplicado (IE). Cada bocal analisado apresentará valores específicos de SE e IE, conforme o diâmetro médio de gota correspondente (Tabela 13).

Tabela 13. Diâmetro médio de gota (dm), em mm; superfície específica (SE), em m<sup>2</sup>; e índice de expansão (IE) para os diferentes bocais estudados.

<b>Bocal</b>	<b>Violeta</b>	<b>Cinza</b>	<b>Marrom</b>	<b>Azul</b>	<b>Verde</b>	<b>Laranja</b>	<b>Amarelo</b>
<b>dm</b>	0,63	0,51	0,57	0,71	0,61	0,61	0,86
<b>SE</b>	9,5	11,8	10,5	8,5	9,8	9,8	7,0
<b>IE</b>	198	245	219	176	205	205	145

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-GHOBAR, H.M. Losses from low-pressure center pivot irrigation systems in a desert climate as affected by nozzle height. **Agricultural Water Management**, v.21, p.23-32, 1992.

ADDISCOTT, T.M.; WAGENET, R.J. Concepts of solute leaching in soils: a review of modelling approaches. **Journal of Soil Science**, v.36, p.411-424, 1985.

ALVES, E.F.; LEÃO, M.C.S.; CASTRO, P.T. de. Qualidade de irrigação de um microaspersor em diferentes alturas de instalação e velocidade média de vento na região do Vale do Curu (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., Campina Grande, 1997. **Anais** Campina Grande: SBEA, 1997.

ALVES, E.F.; ROCHA JÚNIOR, O.C.; CASTRO, P.T. de. Perdas de água por evaporação e por arraste em um sistema de irrigação por aspersão em diferentes espaçamentos e velocidades de vento. **Ciência Agrônômica**, v.28, n.1/2, p.32-36, 1997.

AZEVEDO, H.J.; BERNARDO, S.; RAMOS, M.M.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.

Influência de elementos do clima no desperdício de energia em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.336-341, 1999.

BERNUTH, R. D. von. Effect of trajectory angle on performance of sprinklers in wind.

**Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.114, n.4, p.579-587, 1988.

BERNUTH, R.D. von; GILLEY, J.R. Sprinkler droplet size distribution estimation from

single leg test data. **Transactions of the ASAE**, v.27, n.6, p.1435-1441. 1984.

BILANSKI, W.K.; KIDDER, E.H. Factors that affect the distribution of water from a

medium-pressure rotary irrigation sprinkler. **Transactions of the ASAE**, v.1, n.1, p.19-28, 1958.

BOMAN, B.J.; PARSONS, L.R. Microsprinkler experiences in Florida citrus. **Applied**

**Engineering in Agriculture**, v.15, n.5, p.465-475. 1999.

CAMARGO, A.P. de; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes

métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.

CARTER, C.E.; GREER, J.D.; BRAUD, H.J.; FLOYD, J.M. Raindrop characteristics in

south central United States. **Transactions of the ASAE**, v.17, n.6, p.1033-1037, 1974.

- CARVALHO, J.A. Tamanhos de gotas e uniformidade de distribuição de água de dois aspersores de média pressão. Viçosa, 1991. 73p. Dissertação (Mestrado.) - Universidade Federal de Viçosa.
- CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942. 124p.
- DADIAO, C.; WALLENDER, W.W. Droplet size distribution and water application with low-pressure sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v.28, n.2, p.511-516, 1985.
- DANTAS NETO, J.; MEDEIROS, M.G.A. de; AZEVEDO, C.A.V. de; AZEVEDO, H.M. de. Performance hidráulica e perfil de distribuição de água do microaspersor NAAN 7110, sob diferentes condições de vento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.1, p.57-61, 1997.
- D'ÁVILA, J.H.T.; SOARES, A.A.; SILVA, A.F. da. Modelo computacional para simulação da irrigação por aspersão convencional levando em conta o vento e a declividade do solo (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., Fortaleza, 2000. **Anais** Fortaleza: SBEA; UFC, 2000.
- DeBOER, D.W.; MONNENS, M.J.; KINCAID, D.C. Measurement of sprinkler droplet size. **Applied Engineering in Agriculture**, v.17, n.1, p.11-15, 2001.

DEL PINO, M.A.I.T.; MELO, L.J.V de; VILELA, L.A.A. Distribuição do tamanho de gotas produzidas pelo aspersor escamoteável T22-2.5 submetido a várias pressões de serviço (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., Fortaleza, 2000. **Anais** Fortaleza: SBEA; UFC, 2000.

DYLLA, A.S.; SHULL, H. Estimating losses from a rotating boom sprinkler. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.1, p.123-125, 1983.

EDLING, R.J. Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles. **Transactions of the ASAE**, v.28, n.5, p.1543-1550, 1985.

EIGEL, J.D.; MOORE, I.D. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. **Transactions of the ASAE**, v.27, n.4, p.1079-1084, 1983.

FACI, J.; BERCERO, A. Efecto del viento en la uniformidad y en las perdidas por evaporacion y arrastre en el riego por aspersion. **Investigacion Agraria: Produccion y Proteccion Vegetal**, v.6, n.2, p.173-182, 1991.

FACI, J.M.; SALVADOR, R.; PLAYÁN, E. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 127, n.4, p.224-233, 2001.

FRIZZONE, J.A. **Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência**. Piracicaba: ESALQ, DER, 1992. 53p. ( Série didática, 003).

FROST, K.R.; SCHWALEN, H.C. Sprinkler evaporation losses. **Agricultural Engineering**, v.36, n.8, p.526-528, 1955.

FUKUI, Y.; NAKANISHI, K.; OKAMURA, S. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. **Irrigation Science**, v.2, n.1, p.23-32, 1980.

HALL, M.J. Use of the stain method in determining the drop-size distributions of coarse liquid sprays. **Transactions of the ASAE**, v.13, n.1, p.33-41, 1970.

HILLS, D.J.; GU, Y. Sprinkler volume mean droplet diameter as a function of pressure. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.2, p.471-476, 1989.

HOLANDA FILHO, R.S.F. de; PORTO FILHO, F.Q.; MIRANDA, N.O.; MEDEIROS, J.F. de; HOLANDA, R.H.M. de. Caracterização hidráulica do microaspersor Rondo 50 L/h da Plastro (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., Fortaleza, 2000. **Anais** Fortaleza: SBEA; UFC, 2000.

KINCAID, D.C.; SOLOMON, K.H.; OLIPHANT, J.C. Drop size distributions for irrigation sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v.39, n.3, p.839-845, 1996.

KOHL, R.A. Drop size distribution from medium-sized agricultural sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v.17, n.4, p.690-693, 1974.

KOHL, R.A.; DeBOER, D.W. Drop size distributions for a low pressure spray type agricultural sprinkler. **Transactions of the ASAE**, v.27, n.6, p.1836-1840, 1984.

KOHL, K.D.; KOHL, R.A.; DeBOER, D.W. Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.4, p.1071-1074, 1987.

KOHL, R.A.; BERNUTH, R.D. von; HUEBNER, G. Drop size distribution measurement problems using a laser unit. **Transactions of the ASAE**, v.28, n.1, p.190-192, 1985.

LEDUR, E.O.; VILAS BOAS, M.A. Avaliação das características hidráulicas e da uniformidade de distribuição de água do microaspersor Dan Sprinklers (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais** Foz do Iguaçu: SBEA; UNIOESTE, 2001.

LI, J.; KAWANO, H.; YU, K. Droplet size distributions from different shaped sprinkler nozzles. **Transactions of the ASAE**, v.37, n.6, p.1871-1878, 1994.

MATOS, J.A. de; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, C.A.V. de; AZEVEDO, H.M. de. Avaliação da distribuição de água de um microaspersor autocompensante. **Irriga**, v.4, n.3, p.168-174, 1999.

MATSURA, E.E. Observation et modélisation du jet produit par un canon d'arrosage. Montpellier, 1993. 148p. These (doctorat.) - École Nationale du Génie Rural, des Eaux et de Forêts.

- McLEAN, R.K.; SRI RANJAN, R.; KLASSEN, G. Spray evaporation losses from sprinkler irrigation systems. **Canadian Agriculture Engineering**, v.42, n.1, p.1-8, 2000.
- MEDEIROS, M.G.A.; MATOS, J.A.; AZEVEDO, C.A.V. de; DANTAS NETO, J. Influência de fatores climáticos na eficiência potencial de aplicação de água do microaspersor Naan 7110 em condições de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Lavras, 1998. **Anais** Lavras: UFLA; SBEA, 2001. v.2, p.142-144.
- MERGULHÃO, M.C.R. Distribuição de gotas por tamanho em dois modelos de aspersores tipo canhão hidráulico, na ausência de vento. Viçosa, 1992. 57p. Dissertação (Mestrado.) - Universidade Federal de Viçosa.
- NASCIMENTO, T.; SOARES, J.M.; PINTO, J.M. Caracterização hidráulica de microaspersores. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9., Natal, 1991. **Anais** Fortaleza: ABID, 1992. p.191-243.
- NASCIMENTO, T.; SOARES, J.M.; AZEVEDO, C.A.V. de. Caracterização hidráulica do microaspersor Rain-Bird QN-14. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.1, p.30-33, 1999.
- OLIVEIRA, R.A. de. Distribuição de gotas por tamanho e perfil de precipitação de um aspersor fixo. Viçosa, 1991. 103p. Dissertação (Mestrado.) - Universidade Federal de Viçosa.

- PAIR, C.H. Water distribution under sprinkler irrigation. **Transactions of the ASAE**, v.11, n.5, p.648-651,1968.
- PAZ, V.P.S.; BERNARDO, S.; SEDIYAMA, G.C.; RAMOS, M.M.; AZEVEDO, H. M. de; REGAZZI, A.J. Perdas de água na irrigação por aspersão, para as condições do projeto de irrigação São Gonçalo, Paraíba. **Revista Ceres**, v.38, n.216, p.117-124, 1991.
- PEREIRA, G.M.; SOARES, A.A.; ALVES, A.R.; RAMOS, M.M.; MARTINEZ, M.A. Modelo computacional para simulação das perdas de água por evaporação na irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, v.16, n.3, p.11-26. 1997.
- RAPOSO, J.R. **A rega por aspersão**. Lisboa: Livraria Clássica Editora, 1980. 339p.
- RUGGIERO, M.A.G.; LOPES, V.L.R. **Cálculo numérico**; aspectos teóricos e computacionais. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1997. 406p.
- SAMPAIO, S.C.; VILELA, L.A.A.; DIAS, J.A.A.; FARIA, M.A.de. Características hidráulicas e da distribuição de água do microaspersor NAAN 7110. **Ciência e Agrotécnica**, v.20, n.1, p.70-78, 1996.
- SEGINER, I. Tangential velocity of sprinkler drops. **Transactions of the ASAE**, v.8, p.90-93, 1965.
- SEGINER, I. Water losses during sprinkling. **Transactions of the ASAE**, v.14, p.656-664, 1971.

- SEGINER, I.; KOSTRINSKI, M. Wind, sprinkler patterns and system design. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering Division**, v. 101, n.4, p.251-264, 1975.
- SEGINER, I.; NIR, D.; BERNUTH, R.D. von. Simulation of wind-distorted sprinkler patterns. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 117, n.2, p.285-306, 1991.
- SOARES, A.A.; WILLARDSON, L.S.; KELLER, J. Surface-slope effects on sprinkler uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 117, n.6, p.870-880, 1991.
- SOLOMON, K. H.; KINCAID, D. C.; BEZDEK, J. C. Drop size distributions for irrigation spray nozzles. **Transactions of the ASAE**, v.28, n.6, p.1966-1974, 1985.
- SOUZA, R.O.R.; LUCAS, A.A.T.; RIGHI, E.Z.; COELHO, R.D.; CONCEIÇÃO, M.A.F. Influência da inclinação da haste e da ação do vento no desempenho do microaspersor Dan 2001 (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais** Foz do Iguaçu: SBEA; UNIOESTE, 2001.
- STERNBERG, Y. M. Analysis of sprinkler irrigation losses. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.92, n.4, p.111-124, 1967.

- TARJUELO J. M.; CARRION, P.; VALIENTE, M. Simulación de la distribución del riego por aspersión en condiciones de viento. **Investigación Agraria: Producción e Protección Vegetal**, v.9, n.2, p.255-271, 1994.
- TARJUELO, J.M.; MONTERO, J.; CARRIÓN, P.A.; HONRUBIA, F.T.; CALVO, M.A. Irrigation uniformity with medium size sprinklers. Part II: Influence of wind and other factors on water distribution. **Transactions of the ASAE**, v.42, n.3, p.677-689, 1999.
- TARJUELO, J.M.; ORTEGA, J.F.; MONTERO, J.; JUAN, J.A. de. Modeling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, v.43, n.4, p.263-284, 2000.
- VILELA, L.A.A. Avaliação do impacto de gotas sobre a superfície de um Latossolo Vermelho Escuro irrigado por aspersão. Lavras, 1995. 76p. Dissertação (Mestrado.) - Universidade Federal de Lavras.
- VORIES, E.D.; BERNUTH, R.D. von; MICKELSON, R.H. Simulating sprinkler performance in wind. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 113, n.1, p.119-130, 1987.
- YAZAR, A. Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. **Agricultural Water Management**, v.8, p.439-449. 1984.