

**MODELAGEM SEMI-EMPÍRICA DA
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE ASPERSORES
AUTOPROPELIDOS SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES DE VENTO**

HENRIQUE FONSECA ELIAS DE OLIVEIRA

2008

HENRIQUE FONSECA ELIAS DE OLIVEIRA

**MODELAGEM SEMI-EMPÍRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
DE ASPERSORES AUTOPROPULIDOS SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES DE VENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Água e Solo, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador

PhD. Alberto Colombo

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2008

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Oliveira, Henrique Fonseca Elias de.

Modelagem semi-empírica da distribuição de água de aspersores
autopropelidos sob diferentes condições de vento / Henrique Fonseca Elias
de Oliveira. – Lavras : UFLA, 2008.

74 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2008.

Orientador: Alberto Colombo.

Bibliografia.

1. Modelagem. 2. Autopropelido. 3. Distribuição de água. 4. Vento. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.587

HENRIQUE FONSECA ELIAS DE OLIVEIRA

**MODELAGEM SEMI-EMPÍRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE
ASPERSORES AUTOPROPULIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
DE VENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Água e Solo, para obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 03 de Março de 2008.

Dr. Manoel Alves de Faria

UFLA

Dr (a). Myriane Stella Scalco

UFLA

PhD. Alberto Colombo

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus, por sempre me acompanhar;

Aos meus pais, Maurílio e Ana, pelo imenso amor recebido;

À minha namorada, Eliene, pelo amor e compreensão;

À minha avó, Ana, pelos ensinamentos;

Aos meus parentes e amigos, pelo carinho;

OFEREÇO

A todas as pessoas que através de atos, palavras e orações têm
colaborado em minha jornada pessoal e profissional;

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Alberto Colombo pelos ensinamentos e pela paciência.

Aos professores Manoel Alves de Faria e Myriane Stella Scalco, membros da banca examinadora, pelas sugestões e observações.

Aos professores do Departamento de Engenharia, pelos ensinamentos.

Ao colega Giuliani do Prado, pela disponibilização dos dados.

À secretária do Departamento de Engenharia, Daniela, pelo auxílio.

Ao professor Delvio Sandri, da Universidade Estadual de Goiás, pelo incentivo e oportunidade de realização do meu primeiro trabalho na área de irrigação.

A todos os amigos de infância, em especial Deyvid, Vilson, Leandro, Tiago, Marcos, Bruno, Renato, Marlon, Tião, Flávio, Alisson, Ricardo “primo” Leonardo, Glauco e Cristina, pela amizade sincera.

A todos os meus parentes, pela confiança e incentivo.

À minha sogra, Teresinha, pelo auxílio.

Aos colegas de mestrado, em especial Lessandro, Bruno, Luciano e Marcelo, pela amizade e pelos momentos de alegria compartilhados.

Aos inesquecíveis colegas de graduação, em especial Greice, Camila, Jaqueline, Luciano, Magela, Adriano, Diego e Márcio, pela sincera amizade e pelos inesquecíveis momentos vividos.

Aos colegas de república, Ricardo, Reginaldo, Emmanuel, Alexandre, Tiago, Felipe e Lucas, pelas inúmeras gargalhadas compartilhadas.

BIOGRAFIA

Henrique F. E. de Oliveira, filho de Ana Fonseca de Oliveira e Maurílio Elias de Oliveira, nasceu em Ceres, GO, em 23 de janeiro de 1981.

Em dezembro de 1998 concluiu o segundo grau no Colégio Imaculada Conceição (CIC), em Ceres, GO.

Em julho de 2001 ingressou no curso de Engenharia Agrícola na Universidade Estadual de Goiás, em Anápolis, GO. Durante a graduação foi bolsista de Iniciação Científica na área de Engenharia de Irrigação e Drenagem. Também participou de estágios extracurriculares na área de construções na Empresa ELETROENGE ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES LTDA, situada em Goiânia, GO. Trabalhou como professor nas disciplinas de Física e Matemática, no Ensino Médio do Colégio Estadual Dr. Genseric Gonzaga Jaime, em Anápolis, GO, durante o período de agosto de 2002 a agosto de 2006. Graduou-se Engenheiro Agrícola em agosto de 2006.

Em agosto de 2006, iniciou o Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, área de concentração em Engenharia de água e Solo, concluindo-o em março de 2008.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Irrigação por aspersão com sistema autopropelido.....	3
2.2 Distribuição espacial da água aplicada por aspersores	4
2.2.1 Distribuição espacial de água na ausência de vento	5
2.2.2 Distribuição espacial de água em condições de vento	9
2.3 Uniformidade de distribuição de água	13
2.3.1 Importância e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).....	13
2.3.2 Fatores que interferem na uniformidade de distribuição de água de sistemas autopropelidos	14
2.4 Simulação da aplicação de água	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 Dados da distribuição de água do aspersor PLONA-RL250	20
3.1.1 Dados da distribuição de água na ausência de vento	20
3.1.2 Dados da distribuição de água em condições de vento.....	21
3.2 Análise de agrupamento das combinações de bocal e pressão	22
3.3 Determinações experimentais das dimensões da área molhada distorcida pelo vento	23
3.4 Ajuste dos parâmetros empíricos	24
3.4.1 Ajuste através das dimensões da área molhada distorcida pelo vento	24
3.4.2 Ajuste através da distribuição de água em condições de vento	28
3.5 Avaliação do modelo ajustado.....	31

3.5.1 Modelagem da distribuição de água sob vento	31
3.5.2 Modelagem da uniformidade de aplicação de água de sistemas autopropelidos.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Análise de agrupamento.....	35
4.2 Determinação dos parâmetros normalizados	38
4.2.1 Estimativas pelas dimensões da área molhada.....	38
4.2.2 Estimativas através dos mínimos quadrados.....	42
4.3 Avaliação do modelo ajustado	44
4.3.1 Comportamento do modelo	44
4.3.2 Estimativas da taxa de aplicação.....	46
4.3.3 Estimativas da uniformidade de aplicação de água de sistemas autopropelidos.....	47
4.4 Simulações de uso do aspersor PLONA-RL250 sob condições de vento.....	54
4.4.1 Efeitos da velocidade e direção do vento.....	54
4.4.2 Efeitos da velocidade e direção do vento na escolha do ângulo de giro do aspersor	56
5 CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
ANEXO A	66

RESUMO

OLIVEIRA, Henrique Fonseca Elias. **Modelagem semi-empírica da distribuição de água de aspersores autopropelidos sob diferentes condições de vento.** 2008. 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola. Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

A uniformidade de aplicação de água é um importante aspecto da *performance* de um sistema de irrigação. Uma aplicação não uniforme resulta em perdas econômicas e compromete a qualidade ambiental. A uniformidade de aplicação de água de sistemas autopropelidos depende da combinação de diversos fatores, incluindo: (i) tipo de aspersor e características operacionais (tamanho de bocal, pressão de serviço, ângulo do jato e ângulo do setor molhado); (ii) espaçamento entre carregadores; e (iii) velocidade e direção do vento. Neste estudo, um modelo semi-empírico que prediz a distorção pelo vento dos padrões de aplicação de água foi usado com o intuito de ajustar os parâmetros empíricos necessários para predizer o padrão de aplicação de água do aspersor canhão PLONA-RL250, operando sob diferentes condições de vento. Este modelo semi-empírico foi calibrado e validado usando medidas em campo do padrão de distribuição de água distorcido pelo vento. Valor de coeficientes de uniformidade de Christiansen para canhões hidráulicos, baseados em medidas de campo da distribuição espacial de água do aspersor operando sob condições de vento, foi comparado com valores baseados em dados simulados da distribuição espacial de água, mostrando uma boa correlação entre eles ($r^2 = 0,718$ e desvio absoluto médio de 5,38%). Várias simulações foram rodadas com o objetivo de identificar configurações de canhões hidráulicos que alcancem uniformidades ótimas de irrigação. As simulações foram agrupadas de acordo com quatro perfis radiais típicos de aplicação (I, II, III e IV), identificados através de análise de agrupamento, as quais foram usadas para representar as 160 combinações possíveis de pressão e diâmetro do bocal do aspersor PLONA-RL250. Os resultados simulados indicaram que: (i) o espaçamento máximo entre carregadores necessário para alcançar valores de coeficiente de Christiansen acima de 80% depende do perfil radial de aplicação do aspersor, velocidade e direção de vento; (ii) a uniformidade de irrigação de autopropelidos é mais afetada pela direção de vento paralela ao carregador do que outras direções; (iii) sob qualquer condição de vento, não há indicação de que o desempenho da irrigação sob um setor molhado de 270° é melhor do que sob 360°.

* Comitê Orientador: Alberto Colombo – UFLA (Orientador), Elio Lemos da Silva - UFLA (Co-orientador).

ABSTRACT

OLIVEIRA, Henrique Fonseca Elias. **Semi empirical modeling of traveling gun sprinkler water distribution under different wind conditions**. 2008. 74 p. Dissertation (Master of Science in Agricultural Engineering/ Engineering of Water and Soil) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.*

Water application uniformity is an important aspect of irrigation system performance. A non uniform application results in economic losses and compromises environmental quality. Water application uniformity of travel irrigation machines depends on the combination of several factors including: (i) sprinkler type and operational characteristics (nozzle size, working pressure, jet angle, and wetted sector angle), (ii) towpath spacing, and (iii) wind speed and direction. In this study, a semi empirical model that predicts the distortion by wind of raingun application patterns, was used to adjust the empirical parameters necessary to predict water application pattern of the PLONA-RL250 gun sprinkler operating under different wind conditions. This semi-empirical model was calibrated and validated using infield measured wind-distorted water distribution patterns. Values of traveling gun machine Christiansen's coefficient of uniformity based on infield measured wind-distorted water distributions were compared with values based on simulated wind-distorted water distributions showing a good correlation among them ($r^2 = 0.718$ and average absolute deviation of 5.38%). Several simulations were run in order to identify traveling gun irrigation configurations that achieve optimal irrigation uniformities. Simulations were grouped according to four typical radial application patterns (I, II, III and IV), identified through clustering analysis, that were used to represent the 160 possible pressure-nozzle combinations of the PLONA- RL250 gun sprinkler. Simulated results indicated that (i) maximum towpath spacing necessary to achieve Christiansen's coefficient values above 80% depends on sprinkler radial application pattern, wind speed and wind direction; (ii) traveling irrigation uniformity is more affected by a wind direction parallel to towpath than other directions; (iii) under any wind condition, there is no indication that irrigation performance under a 270° wetted sector is better than that under 360° .

* Guidance Committee: Alberto Colombo - UFLA (Major Professor), Elio Lemos da Silva - UFLA.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população mundial junto com a escassez cada vez mais acelerada dos recursos naturais, dentre eles a água, com certeza vem se tornando um desafio presente na vida de agricultores e pesquisadores, os quais buscam tecnologias que proporcionem um uso racional dos recursos naturais, reduzindo amplamente o consumo de água e energia, sobretudo na agricultura irrigada.

A irrigação por aspersão é uma prática que tem por objetivo distribuir água sobre a superfície do solo, de modo a permitir a sua infiltração sem escoamento superficial.

O sistema de aspersão tipo autopropelido é composto de um chassi, apoiado sobre rodas pneumáticas e dotado de uma unidade acionada por meio de dispositivos hidráulicos e mecânicos, onde é instalado um aspersor de médio ou grande alcance. Entre a carreta sobre a qual vai montado o aspersor e o sistema de distribuição de água há uma mangueira de polietileno que os interliga. Este sistema de irrigação apresenta alto consumo de energia, porém ainda é muito empregado por produtores rurais, na irrigação de culturas de grande porte e capineiras, bem como na aplicação de subprodutos da indústria canavieira, tal como a vinhaça.

Sob o ponto de vista da distribuição espacial da água aplicada, os sistemas de irrigação são avaliados pela sua uniformidade de aplicação de água, que é, normalmente, quantificada por um coeficiente estatístico. É uma prática comum, na literatura especializada, atribuir um valor mínimo aceitável para o coeficiente de uniformidade dos diferentes sistemas de irrigação, o qual deve ser entendido como um elemento decisório no processo de planejamento e operação do sistema de irrigação.

Inúmeros fatores podem influenciar a uniformidade de aplicação de água, o que torna a realização de ensaios de campo uma tarefa demorada e, na maioria das vezes, não se consegue realizar as avaliações em todas as condições operacionais e ambientais desejadas (Carrión et al., 2001; Conceição, 2002). Deste modo, o uso de simulações digitais em computadores, para efetuar a análise da uniformidade de aplicação de água, possibilita uma combinação mais diversificada e rápida das diversas análises pretendidas, tornando-se uma ferramenta extremamente útil devido à agilização, precisão e segurança dos resultados obtidos (Yanagi Júnior, 1995).

Segundo Borges Júnior et al. (2008) o uso de modelos computacionais de simulação propicia ganhos em termos de tempo e economia de recursos materiais e financeiros podendo ser, também, eficazes instrumentos de difusão de agrotecnologias.

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram:

- Ajustar o modelo de Richards & Weatherhead (1993) para modelagem do comportamento do aspersor PLONA-RL250 operando sob condições de vento em equipamentos autopropelidos;
- Analisar a capacidade do modelo ajustado em prever a uniformidade de aplicação de água do aspersor PLONA-RL250, operando em condições de vento em sistemas de irrigação por aspersão do tipo autopropelido;
- Identificar, com auxílio da modelagem da uniformidade de aplicação de água sob diferentes condições de vento, estratégias operacionais que permita o uso mais adequado do aspersor PLONA-RL250 em sistemas autopropelidos de aspersão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Irrigação por aspersão com sistema autopropelido

Segundo Bernardo et al. (2005), a irrigação por aspersão diz respeito a um método em que a água é aspergida sobre a superfície do terreno, assemelhando-se a uma chuva, por causa do fracionamento do jato de água em gotas, devido a sua passagem sob pressão através de pequenos orifícios ou bocais.

Christofidis (2002) diz que a aspersão apresenta-se como um dos sistemas de irrigação mais difundidos no Brasil. Penaforte (1992) relata que esta grande aceitação é decorrente da boa uniformidade de aplicação que o sistema oferece, da facilidade de controle do volume de água a ser aplicado, elevada eficiência, redução dos perigos de erosão e potencialidade de seu emprego nos mais diversos tipos de solo e condição de topografia.

Conforme Costa et al. (1994) a evolução dos sistemas de irrigação por aspersão convencional, propiciou o desenvolvimento da aspersão mecanizada, a qual procurou substituir a mão-de-obra necessária no transporte e montagem de tubulações e aspersores por sistemas mecânicos. O autor ainda salienta que o sistema por aspersão mecanizada representa um maior capital investido na compra de equipamentos hidráulicos, elétricos e convencionais.

Dentro da aspersão mecanizada, destacam-se os equipamentos autopropelidos de irrigação, os quais, segundo a norma ISO 8224-1 (ISO, 2004), são “máquinas projetadas para irrigar um campo seqüencialmente, faixa por faixa, que provocam, através de várias técnicas de rebocamento, o deslocamento de um carrinho equipado com um sistema de distribuição de água (aspersor ou canhão aspersor, combinação de aspersores e canhões, barra com uma série de aspersores, sprayers ou outros tipos de dispositivos de distribuição de água)

através de um campo, e que deve ser deslocada para, e operada a partir de, diversos pontos pré-estabelecidos de suprimento de água”. Esta Norma também prevê três diferentes tipos de autopropelidos. O Tipo 1 corresponde aos carretéis enroladores que operam estacionados recolhendo a mangueira de alimentação do sistema móvel de distribuição de água. O Tipo 2 corresponde aos autopropelidos tracionados a cabo que puxam a mangueira de alimentação à medida que recolhe um cabo de aço preso numa âncora. O Tipo 3 corresponde aos carretéis autopropelidos que se deslocam sobre a mangueira de alimentação.

Os sistemas autopropelidos de irrigação mais utilizados atualmente no mercado nacional são do tipo carretel enrolador, ou seja, do Tipo 1, de acordo com a classificação dada pela norma ISO 8224-1 (ISO, 2004).

De acordo com Rocha (2000), o sistema autopropelido representa uma etapa importante no processo de automatização dos métodos de irrigação, e a atualização deste sistema tem crescido bastante, principalmente por causa da necessidade cada vez maior da redução nos gastos com a mão-de-obra. Embora este sistema apresente a limitação de grande consumo de energia, devido à elevada perda de carga no mecanismo de propulsão tipo turbina e mangueira (Prado et al., 2003).

Normalmente o aspersor utilizado na composição do sistema autopropelido é do tipo canhão hidráulico, onde a pressão de serviço varia de 50 a 100 m.c.a. e o raio de alcance pode atingir valores entre 40 e 80 m. A utilização mais adequada deste tipo de aspersor é para irrigação de cana-de-açúcar, pastagens e capineiras.

2.2 Distribuição espacial da água aplicada por aspersores

Segundo Prado & Colombo (2007), as características técnicas de distribuição de água dos aspersores são dados essenciais para se estabelecer, com o auxílio de aplicativos computacionais, critérios de dimensionamento e

adequadas condições operacionais que o sistema de irrigação deverá operar. Os mesmos autores ainda citam que, apesar da importância do conhecimento destes dados técnicos, raramente, os fabricantes de aspersores apresentam estes valores em seus catálogos técnicos, ou por desconhecimento ou pela excessiva gama de informações que o catálogo irá apresentar, tornando-se pouco prático.

2.2.1 Distribuição espacial de água na ausência de vento

Na ausência de vento, a distribuição espacial da água aplicada por um aspersor é representada pela sua curva de distribuição de água. A Norma ISO 7749-1 (ISO, 1995) define a “curva de distribuição de água” de um aspersor como a “curva da taxa de aplicação de água acumulada em coletores dispostos ao longo do raio molhado, em função das distâncias dos coletores a partir do aspersor”. Outro termo bastante utilizado para referir-se à “curva de distribuição de água” é “perfil de distribuição de água”, definido como tal pela NBR 8988 (ABNT, 1985).

Dois métodos de ensaio para determinação da curva de distribuição de água de aspersores rotativos são previstos pela norma ISO 7749-2 (ISO, 1990). No método da malha, os coletores encontram-se distribuídos em torno do aspersor; e no método radial, os coletores encontram-se distribuídos ao longo de uma linha. Segundo a mesma norma, para os dois métodos recomenda-se um tempo mínimo de uma hora e o uso de coletores com diâmetro maior que 85 mm.

Molle & Gat (2000), buscando gerar a curva de distribuição de água do aspersor utilizado em seus estudos, utilizaram para a medição e validação desta distribuição radial de água, em condições controladas (laboratório), o método proposto pelo CEMAGREF em Aix-en-Provence, França, o qual consiste em uma série de coletores espaçados 0,5m, coletando água em um setor circular descrito por um ângulo de $1^{\circ}50'$.

Villas-Boas et al. (2000) compararam quatro métodos de amostragem de curvas de distribuição de água e verificaram que o método radial proposto pelo CEMAGREF não diferiu do método em malhas, porém estes dois métodos diferiram do método radial e do radial simplificado proposto pelos autores.

Segundo Keller & Bliesner (1990), cada tipo de aspersor tem uma curva de distribuição de água característica, que varia com o tamanho do bocal e a pressão de operação, resultando em uma taxa ótima de pressão de operação para cada diâmetro de bocal. Os efeitos das características desta curva sobre a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação têm sido objetos de diversos estudos.

Conforme mostra a Figura 1, Christiansen (1942) concentra seus estudos sobre seis padrões geométricos de distribuição de água, os quais foram analisados para se determinar a uniformidade de distribuição de água para vários espaçamentos. Entretanto, este estudo apenas descreveu estes formatos, não quantificando-os.

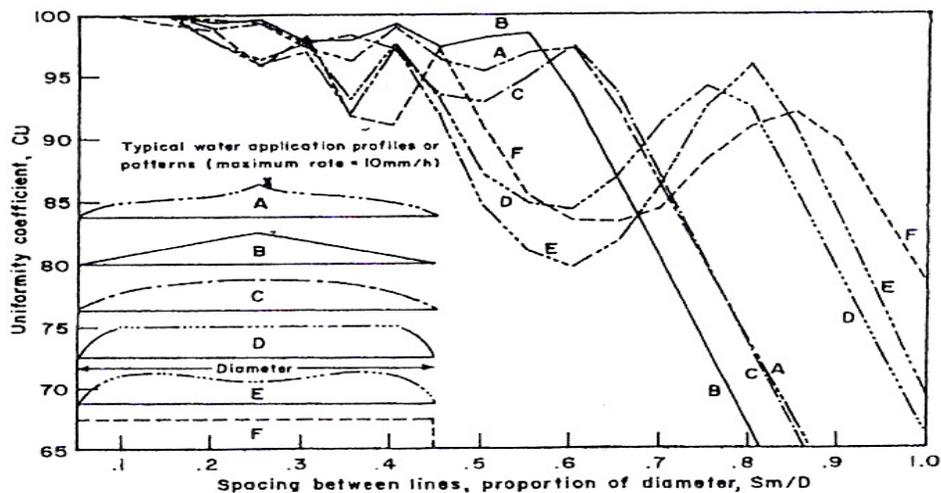


FIGURA 1 Formas geométricas dos perfis de distribuição de água de Christiansen (Christiansen, 1942).

Perfis tipo A e B são característicos de aspersores que tenham dois ou mais bocais; perfis C e D são característicos de aspersores que trabalham com um único bocal; e o perfil tipo E é geralmente obtido com aspersores canhão ou quando estes ou outros tipos de aspersores operam com pressões inferiores àquelas recomendadas para o tamanho de bocal. O perfil F caracteriza-se por uma pluviometria uniforme.

Tarjuelo et al. (1992) relatam que os aspersores apresentam basicamente três tipos de perfis de distribuição de água: 1) elíptico, obtido geralmente quando se trabalha com apenas um bocal; 2) “donut”, obtido quando se opera o aspersor com baixas pressões de serviço; e 3) triangular, obtido normalmente quando se trabalha com dois bocais. Pereira (1995), realizando estudos comparativos entre estes três tipos de perfis de distribuição de água sob diferentes condições operacionais, concluiu que para a maioria das situações estudadas, com relação à uniformidade de distribuição de água, o perfil de distribuição triangular proporcionou os melhores resultados e o perfil de distribuição tipo “donut” os piores

Solomon & Bezdek (1980) utilizaram um processo matemático para quantificar o formato dos perfis radiais de distribuição de água do aspersor canhão hidráulico Rain Bird 103, operando na ausência de vento, propondo uma metodologia em que as distâncias ao aspersor são expressas como fração do raio de alcance e os valores de intensidade de precipitação, como fração da intensidade média de aplicação de água. Os referidos autores, com base nos perfis adimensionais, racionalizaram o número de perfis a partir do algoritmo de agrupamento de “K-Means”, sendo que, para reconstituição destes perfis, foi gerada uma equação para a vazão e outra para o raio de alcance em função do diâmetro do bocal e da pressão de serviço do aspersor. As equações utilizadas na adimensionalização do raio de alcance e da intensidade de precipitação são apresentadas a seguir:

$$ra_{i'} = \frac{r_{i'}}{R} \quad (1)$$

$$ia_{i'} = \frac{i_{i'} \cdot \pi \cdot R^2}{Q} = \frac{i_{i'}}{im} \quad (2)$$

em que, $ra_{i'}$ é a fração do raio de alcance (adimensional); $r_{i'}$ é a distância radial do coletor i ao aspersor (m); R é o raio de alcance do aspersor (m); $ia_{i'}$ é a fração da intensidade média de aplicação de água (adimensional); $i_{i'}$ é a intensidade de aplicação de água do coletor i ao aspersor ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); im é a intensidade média de aplicação de água ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); Q é a vazão do aspersor ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); i' é o índice de identificação de cada ponto de amostragem (coletor) em relação ao aspersor;

Para permitir que as várias condições operacionais disponíveis sejam submetidas à análise de agrupamento (Solomon & Bezdek, 1980), as informações obtidas em cada perfil radial de distribuição de água são sintetizadas, registrando-se apenas os vinte valores de intensidade adimensional de precipitação correspondente às vinte frações do raio de alcance (ra_j) dadas por:

$$ra_j = 0,025 + (j - 1) \cdot 0,05 \quad \text{com } 1 \leq j \leq 20 \quad (3)$$

em que, ra_j é fração do raio de alcance (adimensional) determinado a partir do índice j .

Nos casos em que os valores das frações do raio de alcance (ra_j) não coincidem com os valores medidos (ra_i), esses autores recomendam que se faça uma interpolação entre os valores correspondentes da fração da intensidade de aplicação (ia_j), para cada valor de intensidade medido (ia_i).

2.2.2 Distribuição espacial de água em condições de vento

Em condições de vento, devido à deformação causada pelo mesmo, a qual altera a simetria radial de aplicação de água do aspersor, a distribuição espacial da água aplicada pelo aspersor deve ser representada de forma tridimensional. Existem, na literatura, diversos processos que transformam a distribuição de água na ausência de vento, prevendo a distribuição de água de um sistema de irrigação em condições reais de trabalho, visto que ensaios de campo são difíceis e morosos.

Gat & Molle (2000) propõem um modelo, o qual descreve o padrão de aplicação de água produzido individualmente pelos bocais do aspersor. Baseado em calibrações estatísticas, o modelo utiliza, em uma primeira fase, a distribuição beta de probabilidade, com parâmetros estimados com dados de aplicação de água medidos em condições de ausência de vento. Dados medidos em condição de campo são, então, usados para estimar os efeitos do vento no deslocamento do centro de gravidade da área irrigada, no raio de alcance do aspersor em várias direções e nos valores dos parâmetros da distribuição de probabilidade. Posteriormente, o cálculo da aplicação de água para qualquer ponto da área irrigada pode ser resolvido com o uso de uma equação, a qual pode ser implementada em uma rotina de programação para simular o padrão de aplicação para uma série de aspersores fixados em um pivô central ou equipamentos lineares móveis de irrigação.

Carrión et al. (2001) e Montero et al. (2001) descrevem o modelo SIRIAS (SIMulación de RIego por ASpersión), desenvolvido em linguagem Delphi, para simular a distorção dos padrões de distribuição de água de um aspersor sob ação do vento. O SIRIAS utiliza uma teoria balística, com uma nova formulação para o coeficiente de arraste, na simulação do movimento das gotas sob influência do vento. Para aplicação deste modelo são necessários

dados correspondentes à distribuição radial de água do aspersor sob diferentes condições de vento.

Granier et al. (2003) desenvolveram um trabalho de distribuição espacial de água no qual o modelo ajustado foi baseado no modelo proposto por Richards & Weatherhead (1993). Os autores concluíram que o modelo permite uma boa representação das distribuições de água pelo aspersor, quando sujeito a velocidades de vento inferiores a 8 m.s^{-1} .

O modelo semi-empírico proposto por Richards & Weatherhead (1993) é relativamente simples de usar e pode ser calibrado através de três ensaios de campo (método da malha), sendo um ensaio realizado na ausência de vento e dois sob condições de vento. Este modelo semi-empírico conceitua-se da seguinte forma:

i) A distorção do perfil de aplicação de água é devido à combinação do arraste das gotas pelo vento e da redução do raio de alcance devido à interrupção do fluxo de ar induzido pelo jato;

ii) A água que iria atingir um ponto particular no padrão molhado sob condições de ausência de vento é tratada como uma única entidade cujas características são alteradas pelo vento;

iii) A amplitude da redução do alcance do raio molhado devido ao rompimento do fluxo de ar induzido é proporcional a componente da velocidade do vento perpendicular ao jato de água próximo ao bocal;

iv) O arraste pelo vento é proporcional à velocidade do mesmo;

v) A evaporação é suficientemente pequena ao ponto de ser desconsiderada.

Em conseqüência desses conceitos, a área de irrigação pode ser tratada como um corpo flexível tridimensional. Em condições de ausência de vento, este corpo flexível assume o volume e a forma de um sólido de revolução que tem

perfeita simetria radial. Sob condições de vento, o corpo flexível é reduzido e esticado pelo vento, mas o seu volume permanece constante.

O modelo Richards & Weatherhead (1993) utiliza um sistema de coordenadas (X_w, Y_w) orientadas pela direção do vento (Figura 2). Neste sistema, o eixo X_w é posicionado contra o sentido do vento, o eixo Y_w é posicionado perpendicularmente à direção do vento e o aspersor localiza-se no ponto correspondente às coordenadas $x_w = 0, y_w = 0$.

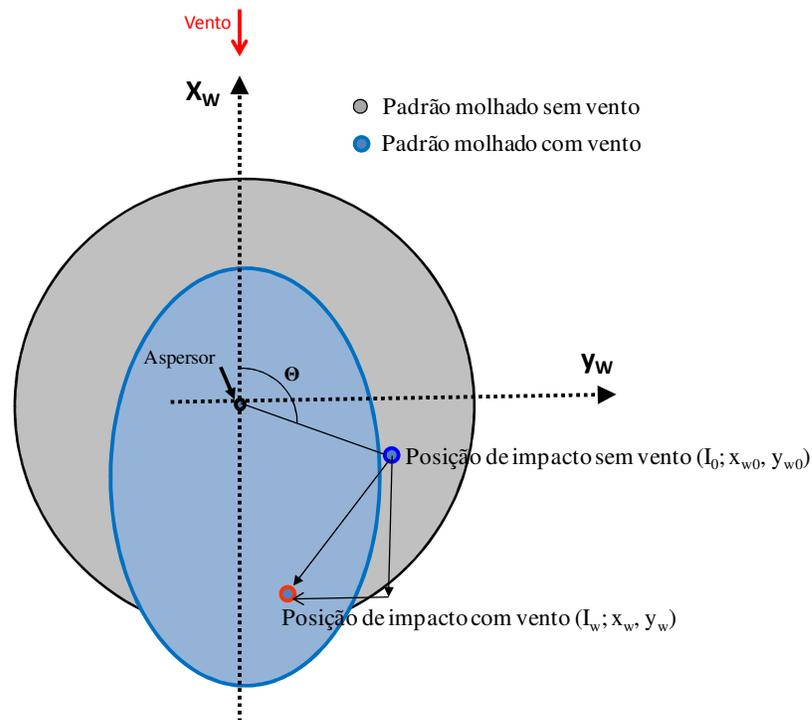


FIGURA 2 Deslocamento do ponto de impacto da água aplicada pelo aspersor devido à incidência de vento.

A relação entre o valor das coordenadas do ponto de impacto na ausência de vento (x_{w0} , y_{w0}) e o valor das coordenadas do ponto de impacto sob condições de vento (x_w , y_w) é dado pelas equações (4) e (5).

$$x_w = x_{w0} - WD - RS \cdot \cos \theta \quad (4)$$

$$y_w = y_{w0} - RS \cdot \sin \theta \quad (5)$$

em que WD representa a deriva pelo vento e RS representa a redução no raio de alcance devido à interrupção do fluxo de ar induzido. Sendo assim, tem-se:

$$WD = [A + B(r/R) + C(r/R)^2] \cdot W \quad (6)$$

$$RS = [D(r/R) + E(r/R)^2 + F(r/R)^3] \cdot W \cdot S \quad (7)$$

A a F são constantes empíricas, m por $m \cdot s^{-1}$;

W é a velocidade do vento, $m \cdot s^{-1}$;

$$r = (x_{w0}^2 + y_{w0}^2)^{0.5} \quad (8)$$

$$S = (\sin e^2 \cdot \cos \theta^2 + \sin \theta^2)^{0.5} \quad (9)$$

A função (S) calcula o seno do ângulo entre o vetor velocidade do vento e a direção do jato, baseado sobre o ângulo do jato no plano vertical (e; graus) e o ângulo entre o vetor vento e o jato d'água no plano horizontal (θ ; graus), conforme indicado na Figura 2.

A relação entre o valor da intensidade de aplicação de água observado no ponto de impacto sem vento (I_0 (x_{w0} , y_{w0}) em $mm \cdot h^{-1}$) e o valor da intensidade de aplicação de água no ponto de impacto sob condições de vento (I_w (x_w , y_w) em $mm \cdot h^{-1}$) é dada pela equação 10.

$$I_w = \frac{I_0}{\left(\frac{\partial X_w}{\partial X_{w0}} \cdot \frac{\partial Y_w}{\partial Y_{w0}} \right)} \quad (10)$$

em que

I_w : intensidade de aplicação de água em x_w, y_w (em condições de vento, mm.h^{-1});

I_0 : intensidade de aplicação de água em x_{w0}, y_{w0} , (dada pelo perfil radial de aplicação de água do aspersor em condições de ausência de vento, mm.h^{-1});

$\frac{\partial X_w}{\partial X_{w0}}; \frac{\partial Y_w}{\partial Y_{w0}}$ são obtidos diferenciando-se as Equações 4 e 5.

2.3 Uniformidade de distribuição de água

2.3.1 Importância e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

Segundo Keller & Bliesner (1990), na escolha de um aspersor o objetivo principal é encontrar uma combinação entre espaçamento dos aspersores, pressão de operação e tamanho do bocal que providenciará uma ótima taxa de aplicação de água com o melhor grau de uniformidade de distribuição. Os mesmos afirmam que o grau de uniformidade obtido com o sistema de aspersão depende amplamente do padrão de distribuição de água e do espaçamento entre aspersores.

A uniformidade de aplicação de água é de grande interesse para fabricantes de aspersores, projetistas de sistemas de irrigação e usuários devido à necessidade de se diminuir custos com água e energia e, com isso também, a proteção ambiental será enfatizada através da conservação de água (Louie & Selker, 2000).

Christiansen (1942) foi o primeiro a descrever quantitativamente a uniformidade na sobreposição dos padrões da aspersão com:

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n \cdot \bar{X}} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

em que CUC é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%); X_i é a precipitação obtida do pluviômetro de ordem i ; \bar{X} é média geral das observações; e n é o número de observações.

Vários coeficientes podem ser usados para expressar a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação. Frizone & Dourado Neto (2003) salientam que muitas críticas são feitas ao CUC, no entanto, nenhum dos outros coeficientes de uniformidade que têm sido apresentados como alternativas ao de Christiansen apresentam vantagens significativas.

Keller & Bliesner (1990) citam que a concepção de baixos valores de uniformidade é relativa, porém, geralmente consideram-se como baixos valores aqueles com coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) menores do que 75%, e valores superiores a 84% são recomendados para culturas de valor econômico mais alto. Bernardo et al. (2005) diz que o valor mínimo recomendável de coeficiente de uniformidade de Christiansen, para a irrigação por aspersão, é de 80%. Matsura & Testezlaf (2003) afirmam que, para sistemas autopropelidos de irrigação, valores da ordem de 70% podem ser considerados como bons.

2.3.2 Fatores que interferem na uniformidade de distribuição de água de sistemas autopropelidos

Keller & Bliesner (1990) afirmam que vários fatores podem influir na uniformidade de distribuição de água. Dentre estes, têm-se os aspectos ligados ao sistema de irrigação, tais como: pressão de serviço, diâmetro do bocal, espaçamento entre aspersores e outros fatores variáveis como velocidade e

direção do vento. No caso de autopropelidos os autores também relacionam fatores como: variação na velocidade de deslocamento do aspersor, setor de operação do aspersor e perfil radial do aspersor, como causas que afetam a uniformidade de distribuição de água. Colombo (1991) ainda inclui as características do mecanismo de propulsão, as quais afetam a velocidade de deslocamento do aspersor e, conseqüentemente, causa desuniformidade.

A irrigação por aspersão é muito influenciada pela ação do vento e vários trabalhos de pesquisa têm demonstrado que o aumento da velocidade do vento provoca redução na uniformidade de distribuição de água, como resultado da distorção do perfil de aplicação de água e da redução da área coberta pelo aspersor e, conseqüentemente, pela diminuição da sobreposição dos jatos de água (Vories & Bernuth, 1986; Tarjuelo et al., 1992).

Scardua & Leme (1979), citados por Charmelo (1990), em ensaios para determinar a uniformidade de aplicação de água para autopropelido, concluíram que ventos com velocidades acima de 3 m.s^{-1} e com direção no sentido de deslocamento do conjunto autopropelido prejudicam a uniformidade de distribuição de água e a lâmina aplicada, desaconselhando o uso deste equipamento em áreas onde a velocidade do vento exceda este valor.

Tarjuelo (1991), citado por Rocha (2000), classificou o vento segundo três níveis de velocidade: vento fraco (0 a 2 m.s^{-1}); vento mediano ($2,1$ a 4 m.s^{-1}); e vento forte (acima de 4 m.s^{-1}). Este mesmo autor cita que a uniformidade de distribuição de água diminui 20% quando a velocidade do vento passa de valores menores que 2 m.s^{-1} a valores superiores a 4 m.s^{-1} .

Segundo Tarjuelo (2005), é possível estabelecer uma relação entre velocidade do vento e espaçamento entre carreadores, a qual proporcione valores aceitáveis de coeficiente de uniformidade. Na Tabela 1 são apresentados os espaçamentos recomendados entre carreadores para aspersores operando com ângulo do jato entre 23 e 25° . Os espaçamentos são dados em função do

diâmetro molhado do aspersor e da velocidade média de vento prevista. Os maiores valores de espaçamento, previstos para cada faixa de velocidade, devem ser usados para bocais cônicos e os menores valores para bocais anel.

TABELA 1 Valores recomendados de espaçamento entre carregadores em função da velocidade do vento.

Velocidade do vento (m.s⁻¹)						
> 4,4		2,2 a 4,4		0,88 a 2,2		0 a 0,88
Espaçamento (Porcentagem do diâmetro molhado – (% D.M))						
50	55	60	65	70	75	80

FONTE: Keller & Bliesner (1990).

Com relação à direção de incidência do vento, Shull & Dylla (1976) afirmam que os espaçamentos entre carregadores devem ser reduzidos à medida que a direção do vento se torna mais paralela ao deslocamento do aspersor e, também, à medida que ocorrem incrementos na velocidade do vento.

Em estudo para determinar os efeitos do vento no padrão estacionário de aplicação de água do aspersor, Shull & Dylla (1976) afirmam que tais efeitos são determinados comparando-se os padrões de aplicação afetados por vento com os padrões calculados sem a presença de vento. Os mesmos afirmam que a distorção na área molhada pelo aspersor é acrescida à medida que ocorrem incrementos na velocidade do vento, sendo a água projetada a distâncias mais longas na direção a favor do vento e a distâncias menores no sentido contra e também no sentido perpendicular à direção do vento.

Rocha (2000), avaliando um sistema de irrigação por autopropelido a campo para três pressões (400, 450 e 500 kPa), três velocidades distintas de recolhimento da mangueira e giro setorial do canhão hidráulico igual a 270°, observou que os maiores valores de CUC foram obtidos para larguras de faixa compreendidas entre 70 e 80 % do diâmetro molhado do aspersor. Além disto, o

autor constatou que com pressões de serviço em torno de 400 kPa, a uniformidade não sofreu prejuízos consideráveis, quando comparada com pressões maiores.

Conforme Keller & Bliesner (1990), alguns aspersores acoplados em autopropelidos necessitam ser operados com ângulo de giro inferior a 360° para se obter maior uniformidade de distribuição de água. Outra razão importante para este tipo de operação é evitar o molhamento do carreador. Ao mostrarem a influência do ângulo de giro, estes autores citam que ângulo de giro igual a 210° proporciona o perfil de aplicação de água mais uniforme para o aspersor em movimento no carreador; entretanto o perfil produzido com ângulo de 240° é quase tão bom quanto o de 210° e que o ângulo de 270° proporciona uma uniformidade razoavelmente baixa.

Prado & Colombo (2007), ao analisarem a uniformidade de distribuição de água para o aspersor PLONA-RL250, concluíram que ângulos de giro entre 210 e 240° geram melhores valores de uniformidade de aplicação de água que o ângulo de 270°.

Segundo Prado & Colombo (2007), o desconhecimento das características de distribuição de água leva a critérios de dimensionamento e condições operacionais, comumente, apresentadas na literatura ou usualmente recomendadas por projetistas de sistemas de irrigação. Estas recomendações podem, muitas vezes, não adequar-se ao sistema de irrigação projetado.

Para sistemas autopropelidos de irrigação é recomendado na literatura (Keller & Bliesner, 1990; Bernado et al., 2005) que o valor de espaçamento entre carreadores seja igual a 80% do diâmetro molhado do aspersor, proporcionando assim adequado valor de uniformidade de aplicação de água. Rocha (2000), estudando a distribuição de água de um sistema autopropelido de irrigação, operando com aspersor Big River, e Prado (2004), com o auxílio de simulações digitais para algumas condições operacionais do aspersor PLONA-

RL300 em sistemas autopropelidos de irrigação, confirmaram este valor de espaçamento.

2.4 Simulação da aplicação de água

Montero et al. (2001) enfatizam que a escassez de água e energia é um desafio para agricultores e pesquisadores, sendo necessário o desenvolvimento de estratégias para reduzir o consumo destes bens e incrementar a eficiência na utilização destes recursos. Estes autores destacam os modelos de simulação em computador como importantes ferramentas para atingir estes objetivos.

Segundo Carrión et al. (2001), a realização de ensaios de campo para avaliação da distribuição de água em sistemas de irrigação é uma tarefa demorada e, na maioria das vezes, não é possível realizar as avaliações em todas as condições operacionais e ambientais desejadas. Assim, o uso de modelos matemáticos, para simulação computacional, possibilita uma combinação mais diversificada e rápida das diversas análises pretendidas.

Em sistemas de irrigação por aspersão tipo autopropelido, Rolland (1982) relata que a partir de um perfil radial de distribuição de água obtido na ausência de vento, um programa de computador pode simular a uniformidade de aplicação de água em qualquer ponto da faixa irrigada. Desta forma, é possível determinar, na condição de ausência de vento e sob as mesmas condições operacionais do aspersor nas quais o perfil radial foi determinado, a distribuição da lâmina aplicada na faixa irrigada sob diferentes combinações de ângulo de giro do aspersor, espaçamento entre carregadores e velocidade de deslocamento.

Colombo (1991) e Zaggo et al. (1998) descrevem um programa de simulação, baseado no padrão estacionário de aplicação de água do aspersor (método da malha), que permite simular a lâmina de água aplicada por sistemas autopropelidos de irrigação. As simulações obtidas com este modelo limitam-se às mesmas combinações de modelo de aspersor, bocais, pressão de serviço,

velocidade e direção de vento, observadas durante a determinação do padrão estacionário de aplicação de água.

Yanagi Júnior (1995) desenvolveu um aplicativo computacional que simula a uniformidade de aplicação de água de equipamentos autopropelidos, baseado em perfis radiais adimensionais de aplicação de água de aspersores. A utilização de perfis adimensionais permite simulações sob condições intermediárias de pressão e diâmetro de bocal do aspersor. As simulações produzidas com auxílio deste aplicativo são limitadas à condição de ausência de vento.

Newell e colaboradores (Newell et al., 2003; Smith et al., 2008) desenvolveram um modelo computacional para simular a aplicação de água de sistemas autopropelidos sob diferentes condições de vento. Este modelo permite ao usuário manipular as configurações, objetivando alcançar elevados índices de uniformidade. O mesmo é baseado na teoria de distorção do padrão de aplicação de água sob condições de vento, desenvolvida por Richards & Weatherhead (1993).

Mais recentemente, Prado (2004) desenvolveu o aplicativo SIMULASOFT, o qual simula, para condições de ausência de vento, a distribuição de água de equipamentos autopropelidos dotados dos aspersores canhão da marca PLONA, modelos RL250, RL300 e RL400. Este aplicativo também se limita a simulações da distribuição de água dos aspersores operando sob condições de ausência de vento.

Apresenta-se na seqüência deste trabalho, a análise da distribuição de água do aspersor PLONA-RL-250, realizada através de determinações das dimensões da área molhada distorcida pelo vento e também com utilização de uma rotina computacional, baseada no modelo de Richards & Weatherhead (1993), a qual simula a distribuição de água do aspersor operando sob condições de vento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Dados da distribuição de água do aspersor PLONA-RL250

Neste estudo foram utilizados dados de ensaios do aspersor PLONA-RL250 fornecidos por Prado & Colombo (2005). Este aspersor é um canhão hidráulico de reversão lenta, com um ângulo de inclinação do lançamento do jato d'água de 24°, flange de acoplamento de 2 1/2" e giro proporcionado pelo impacto de um de seus dois braços oscilantes. O canhão PLONA-RL250 opera com dois bocais cônicos, um principal, de latão, disponível em oito diâmetros distintos (14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 e 28 mm), e bocal auxiliar, de plástico, disponível em três diâmetros (5, 6 e 7 mm) e cinco diferentes valores de pressão de serviço (294, 392, 490 e 580 e 686 kPa), recomendados pelo fabricante.

3.1.1 Dados da distribuição de água na ausência de vento

Foram disponibilizados 160 perfis radiais de aplicação de água do aspersor PLONA-RL250 operando em condições de ausência de vento, os quais foram gerados pelo aplicativo SIMULASOFT versão 3.0 (Prado, 2004). Os 160 perfis fornecidos correspondem às possíveis combinações entre 8 bocais principais, 5 pressões de serviço e três bocais auxiliares (5, 6 e 7 mm, mais a possibilidade de trabalhar sem o bocal auxiliar). Cada perfil consta de 20 valores de precipitação adimensional, tomada em vinte distâncias adimensionais (que variam desde 0,025 até 0,975 do raio de alcance, em intervalos regulares de 0,05 (0,025, 0,075, 0,125...0,975)). Os valores de vazão e raio de alcance, necessários para converter o perfil de aplicação de água a sua forma dimensional são apresentados na Tabela 1A do Anexo.

3.1.2 Dados da distribuição de água em condições de vento

Para condições de vento, realizaram-se 53 ensaios a campo em uma área experimental pertencente ao Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET), Uberaba-MG, conduzidos pelo método da malha e seguindo norma ISO 7749-2 (ISO, 1990). Dispôs-se para os mesmos de uma malha de coletores considerando-se uma matriz A (14 x 14), com coletores de 80 mm de diâmetro (exceção a ISO 7749-2, que recomenda diâmetro mínimo de 85 mm), espaçados de 6 m, perfazendo uma área de 84 x 84 m, em cujo centro foi instalado o aspersor (Figura 3). As variáveis meteorológicas pertinentes aos ensaios foram registradas com o auxílio de uma estação agrometeorológica, a qual registrava os dados a cada 5 minutos. O tempo de duração de cada ensaio foi de 1h e a velocidade média do vento, medida a 2 m de altura, variou entre $0,9 \text{ m.s}^{-1}$ e $5,58 \text{ m.s}^{-1}$, conforme mostra a Tabela 2A do Anexo, que ainda apresenta os valores dos diâmetros de bocal, da pressão de serviço, média e desvio padrão da velocidade e da direção do vento nos 53 ensaios.

O sistema de eixos orientados dos ensaios de campo (X, Y), utilizado no cálculo das coordenadas de cada coletor, e a notação horária de registro do ângulo Φ da linha de ação do vento em relação ao eixo X são indicados na Figura 3. As coordenadas $x = 0$, $y = 0$ representam a posição do aspersor; $x = 39 \text{ m}$, $y = -39 \text{ m}$ é o coletor cuja intensidade de precipitação foi armazenada em A (1, 1) e $x = -39 \text{ m}$, $y = 39 \text{ m}$ é o coletor cuja intensidade de precipitação foi armazenada em A (14, 14).

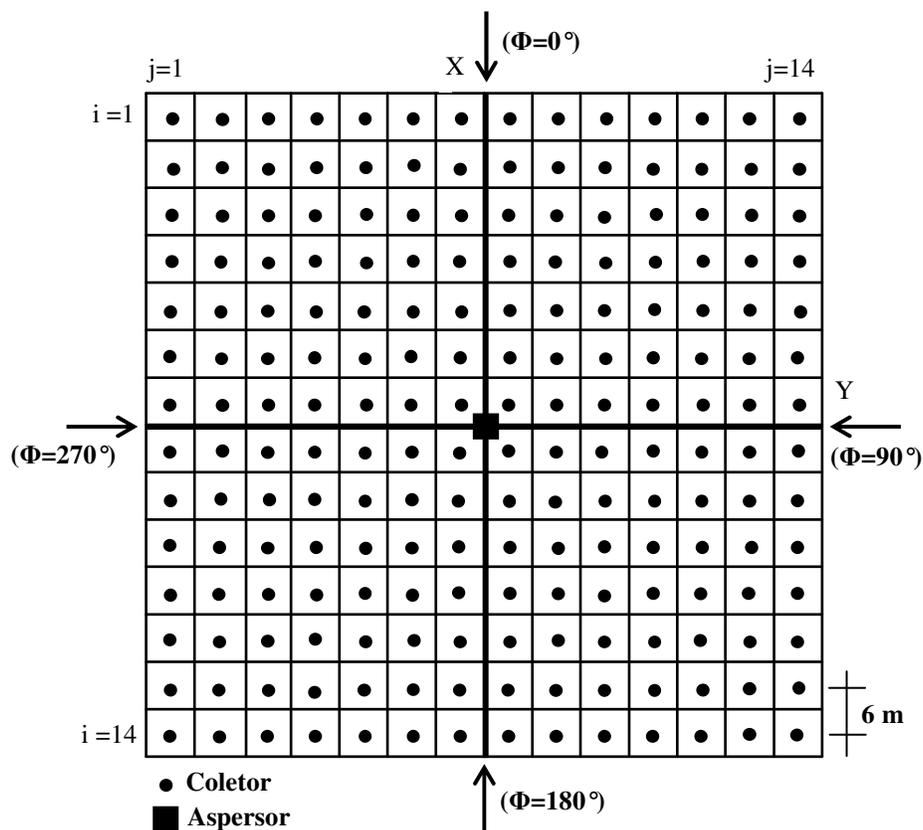


FIGURA 3 Eixos orientados dos ensaios de campo (X, Y) e notação do ângulo Φ da linha de ação do vento em relação ao eixo X.

3.2 Análise de agrupamento das combinações de bocal e pressão

Para sintetizar a análise do comportamento do aspersor PLONA-RL250 sob diferentes condições operacionais, caracterizadas pelas diferentes combinações de bocal e pressão de serviço, que alteram o grau de pulverização do jato d'água, os 160 perfis de distribuição de água do aspersor foram submetidos à análise de agrupamento, através do algoritmo de "K-Means" (Tou & Gonzales, 1974), utilizando-se a metodologia citada por Prado (2004) e Prado & Colombo (2005).

3.3 Determinações experimentais das dimensões da área molhada distorcida pelo vento

Utilizou-se um programa gráfico para transformar as 53 matrizes, contendo os dados da distribuição espacial da água observada nos ensaios realizados sob condições de vento, em mapas de superfície (de 16 cm x 16 cm), que mostravam, em escala apropriada (1 cm = 5,625 cm), a distribuição espacial das linhas de mesma intensidade de precipitação (desde 20,25 mm.h⁻¹ até 0,25 mm.h⁻¹ em intervalos de 5 mm.h⁻¹) ao redor do aspersor.

Na análise das dimensões da área molhada distorcida pelo vento, foi utilizado um valor integrado da direção predominante do vento durante cada ensaio. O valor integrado da direção do vento foi determinado através da reta que liga o ponto representativo da posição do aspersor com o ponto representativo da posição do centro de gravidade (CG) das lâminas coletadas (Figura 4).

Conforme indicado na Figura 4, a linha da direção predominante do vento foi utilizada como referência para determinação das medidas das distâncias do aspersor até a extremidade da área molhada pelo mesmo (definida pela posição da isoietas correspondente a uma intensidade de precipitação de 0,25 mm.h⁻¹) no sentido contra o vento (RU-upwind); a favor do vento (RD-downwind) e na direção perpendicular à direita (RC_D-crosswind) e perpendicular à esquerda (RC_E-crosswind) do vento. Posteriormente, a média das distâncias perpendiculares ($RC = (RC_D + RC_E) / 2$) e as distâncias contra e a favor do vento foram expressas em termos de porcentagem do raio de alcance sem vento (100RC/R, 100RU/R e 100RD/R).

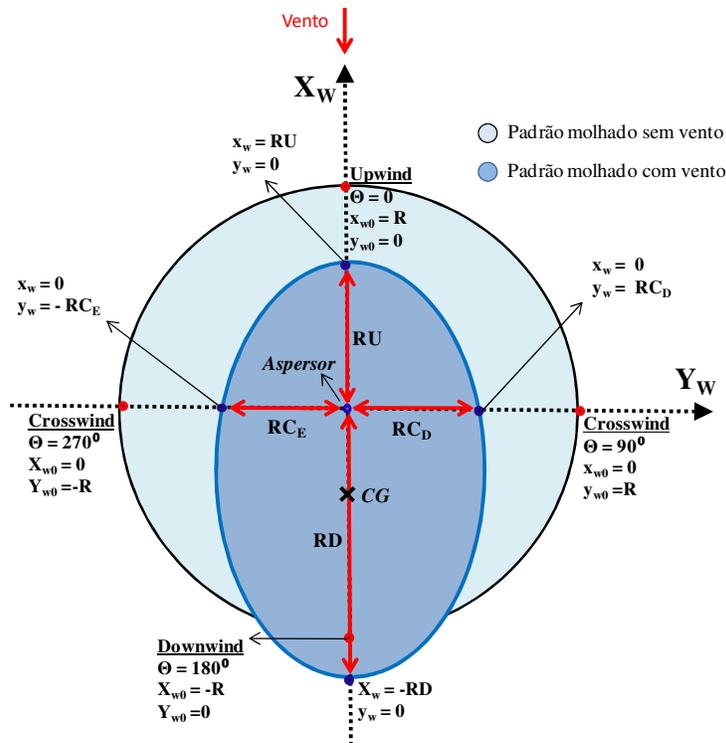


FIGURA 4 Distorção das dimensões do padrão de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250 devido à incidência do vento.

3.4 Ajuste dos parâmetros empíricos

O ajuste dos parâmetros empíricos do modelo de Richards & Weatherhead (1993) foi realizado através de determinações experimentais das dimensões da área molhada distorcida pelo vento e também com o auxílio de uma rotina computacional desenvolvida para simular a distribuição espacial de água de um aspersor operando em condições de vento.

3.4.1 Ajuste através das dimensões da área molhada distorcida pelo vento

No modelo de Richards & Weatherhead (1993) a relação entre a distância até a extremidade da área molhada, tomada no sentido a favor do vento

(RD – downwind; $\theta = 180^\circ$), e a velocidade do vento (W) é estabelecida considerando, conforme esquematizado na Figura 4, os seguintes valores: $x_w = -RD$; $y_{w0} = 0$; $x_{w0} = -R$. Conseqüentemente, com $r = R$, $(r/R) = 1$; $\cos(\theta = 180^\circ) = -1$; $\sin(\theta = 180^\circ) = 0$ e $\sin(e = 24^\circ) = 0,407$, as equações 4, 6, 7 e 9 fornecem:

$$-RD = -R - (A + B + C) \cdot W - \dots \quad (12a)$$

$$(D + E + F) \cdot W \cdot \sqrt{0,407^2 \cdot (-1)^2 + 0^2} \cdot (-1)$$

$$RD = R + (A + B + C) \cdot W - (D + E + F) \cdot W \cdot 0,407 \quad (12b)$$

Quando RD é expresso em termos de porcentagem do raio de alcance sem vento (R), a equação 12b toma a seguinte forma:

$$100 \cdot \frac{RD}{R} = 100 + 100 \cdot \left[\frac{(A + B + C)}{R} - 0,407 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \right] \cdot W \quad (12c)$$

De acordo com a equação 12c, o coeficiente angular da reta ajustada aos pares de valores experimentais $100RD/R$ versus W pode ser interpretado como uma boa estimativa do valor $100/R (A+B+C - 0,407 (D+E+F))$.

No modelo de Richards & Weatherhead (1993) a relação entre a distância até a extremidade da área molhada, tomada no sentido contrário ao vento (RU – upwind; $\theta = 0^\circ$), e a velocidade do vento (W) é calculada considerando, conforme esquematizado na Figura 4, os seguintes valores: $x_w = RU$; $y_{w0} = 0$; $x_{w0} = R$. Conseqüentemente, com $r = R$, $(r/R) = 1$; $\cos(\theta = 0^\circ) = 1$; $\sin(\theta = 0^\circ) = 0$ e $\sin(e = 24^\circ) = 0,407$, as equações 4, 6, 7 e 9 fornecem:

$$RU = R - (A + B + C) \cdot W - (D + E + F) \cdot W \cdot \sqrt{0,407^2 \cdot 1^2 + 0^2} \cdot 1 \quad (13a)$$

Quando RU é expresso em termos de porcentagem do raio de alcance sem vento (R), a equação 13a toma a seguinte forma:

$$100 \cdot \frac{RU}{R} = 100 - 100 \cdot \left[\frac{(A + B + C)}{R} + 0,407 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \right] \cdot W \quad (13b)$$

De acordo com a equação 13b, o coeficiente angular da reta ajustada aos pares de valores experimentais $100RU/R$ versus W pode ser utilizado como uma boa estimativa do valor de $100/R (A+B+C+0,407 (D+E+F))$.

De acordo com o modelo de Richards & Weatherhead (1993), quando o ângulo de saída do jato assume uma posição perpendicular à direção do vento, o ângulo θ pode assumir um valor igual a 90° (RC_D – crosswind direita na Figura 4) ou 270° (RC_E – crosswind esquerda na Figura 4).

No caso em que $\theta = 90^\circ$, conforme indicado na Figura 4, a distância até a extremidade da área molhada, em função da velocidade do vento W , é calculada sem levar em conta o efeito da deriva, de forma que: $y_w = RC_D$; $y_{w0} = R$; $x_{w0} = 0$. Conseqüentemente, com $r = R$, $(r/R) = 1$; $\cos(\theta = 90^\circ) = 0$; $\sin(\theta = 90^\circ) = 1$ e $\sin(e = 24^\circ) = 0,407$, as equações 5, 7 e 9 fornecem:

$$RC_D = R - (D \cdot 1 + E \cdot 1^2 + F \cdot 1^3) \cdot W \cdot \sqrt{0,407^2 \cdot 0^2 + 1^2} \cdot 1 \quad (14a)$$

Quando RC_D é expresso em termos de porcentagem do raio de alcance sem vento (R), a equação 14a toma a seguinte forma:

$$100 \cdot \frac{RC_D}{R} = 100 - 100 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \cdot W \quad (14b)$$

No caso em que $\theta = 270^\circ$, conforme indicado na Figura 4, a distância até a extremidade da área molhada, em função da velocidade do vento W , é calculada sem levar em conta o efeito da deriva, de forma que: $y_w = -RC_E$; $y_{w0} = -R$; $x_{w0} = 0$. Conseqüentemente, com $r = R$, $(r/R) = 1$; $\cos(\theta = 270^\circ) = 0$; $\sin(\theta = 270^\circ) = -1$ e $\sin(e = 24^\circ) = 0,407$, as equações 5, 7 e 9 fornecem:

$$-RC_E = -R - \left(D \cdot 1 + E \cdot 1^2 + F \cdot 1^3 \right) \cdot W \cdot \dots \quad (15a)$$

$$\sqrt{0,407^2 \cdot 0^2 + (-1)^2} \cdot (-1)$$

Quando RC_E é expresso em termos de porcentagem do raio de alcance sem vento (R), a equação 15a toma a seguinte forma:

$$100 \cdot \frac{RC_E}{R} = 100 - 100 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \cdot W \quad (15b)$$

Considerando que as equações 14b e 15b são iguais e que RC é definido como a média das distâncias perpendiculares ($RC = (RC_D + RC_E) / 2$), pode-se concluir que a média das distâncias perpendiculares ao vento é dada por:

$$100 \cdot \frac{RC}{R} = 100 - 100 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \cdot W \quad (15c)$$

De acordo com a equação 15c, o coeficiente angular da reta ajustada aos pares de valores experimentais $100RC/R$ versus W pode ser utilizado como uma boa estimativa do valor de $100(D/R + E/R + F/R)$.

3.4.2 Ajuste através da distribuição de água em condições de vento

Foi desenvolvida uma rotina computacional, em *Visual Basic para Aplicativos (VBA)*, para a planilha eletrônica *Excel*, que utiliza o modelo Richards & Weatherhead (1993) para simular a distribuição espacial de água de um aspersor operando em condições de vento. A rotina desenvolvida gera os valores de precipitação (mm.h^{-1}) ao longo de uma malha de pontos (coletores fictícios) uniformemente distribuídos ao redor do aspersor, observando a mesma geometria dos ensaios de campo esquematizada na Figura 3.

Os seguintes valores são requeridos como parâmetros de entrada:

- i) Velocidade (W , em m.s^{-1}) e direção do vento (Φ , em graus) em relação ao sistema de eixos orientados dos ensaios de campo;
- ii) Coordenadas (x , y , em m) da posição dos coletores ao redor do aspersor no sistema de eixos orientados utilizados nos ensaios de campo;
- iii) Curva de aplicação de água do aspersor operando na ausência de vento, contendo vinte pares de valores de intensidade de precipitação e distância ao aspersor;
- iv) Valor do raio de alcance na ausência de vento (R , em m);
- v) Valor dos coeficientes empíricos normalizados (A/R , B/R , C/R , D/R , E/R , F/R , em s.m^{-1});

Os seguintes passos são executados pela rotina:

- i) Conversão dos parâmetros empíricos para sua forma não normalizada. Na conversão os valores normalizados são multiplicados pelo valor do raio sem vento;
- ii) Conversão das coordenadas (x , y) da posição do coletor, tomadas no sistema de eixos orientados dos ensaios de campo, para coordenadas x_w , y_w , nos eixos orientados pela direção do vento usados no modelo (Figura 5).

Esta conversão é feita através das equações 16 e 17, que se baseiam nos ângulos Φ e β , mostrados na Figura 5, onde Φ representa o ângulo entre os eixos

orientados utilizados no teste de campo e os eixos orientados pela direção do vento; e β representa o ângulo anti-horário, calculado conforme a equação 18.

$$x_w = x \cdot \cos(\beta) - y \cdot \sin(\beta) \quad (16)$$

$$y_w = y \cdot \cos(\beta) + x \cdot \sin(\beta) \quad (17)$$

$$(\beta = 360 - \Phi). \quad (18)$$

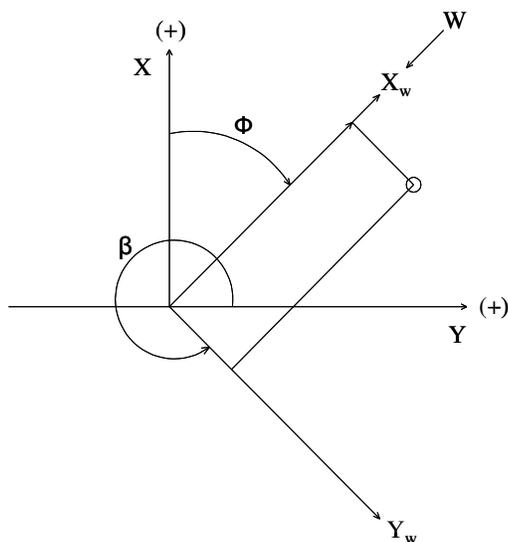


FIGURA 5 Inversão do eixo orientado segundo o teste de campo (X,Y) para o eixo orientado segundo à direção do vento (X_w, Y_w).

iii) Cálculo, nos eixos orientados pela direção do vento, das coordenadas (x_{w0}, y_{w0}), do ponto de impacto sem vento, que teriam coordenadas, do ponto de impacto com vento, coincidentes com a posição do coletor (x_w, y_w). O processo iterativo para determinação das coordenadas (x_{w0}, y_{w0}), tem início com $x_{w0} = x_w$, e $y_{w0} = y_w$, e termina quando o valor absoluto da correção das estimativas de x_{w0} e y_{w0} é menor que 0,001m. Para acelerar a convergência do

processo iterativo, o método de Newton (Burden & Faires, 2003) é aplicado ao sistema de equações simultâneas obtidas pela inversão das Equações (4) e (5):

$$fx_{w0}(x_{w0}, y_{w0}) = \left\{ \begin{array}{l} x_{w0} - [A + B \cdot (r/R) + C \cdot (r/R)^2] \cdot W - \dots \\ [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot \dots \\ W \cdot \sqrt{\text{sen}^2 e \cdot \left(\frac{x_{w0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{w0}}{r}\right)^2} \cdot \left(\frac{x_{w0}}{r}\right) \end{array} \right\} - x_w \quad (19)$$

$$fy_{w0}(x_{w0}, y_{w0}) = \left\{ \begin{array}{l} y_{w0} - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + \dots \\ F \cdot (r/R)^3] \cdot W \cdot \dots \\ \sqrt{\text{sen}^2 e \cdot \left(\frac{x_{w0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{w0}}{r}\right)^2} \cdot \left(\frac{y_{w0}}{r}\right) \end{array} \right\} - y_w \quad (20)$$

iv) Cálculo da taxa da aplicação, I_0 , na ausência de vento, no ponto de coordenada x_{w0} , y_{w0} , que corresponde à distância radial $r = (x_{w0}^2 + y_{w0}^2)^{1/2}$, utilizando as informações do perfil radial de aplicação de água;

v) Cálculo da taxa da aplicação; $I_w(x_w, y_w)$ através da Equação (10);

vi) Repete os passos de ii até v para todos os coletores do sistema de eixos orientados utilizados nos testes de campo.

Os valores das constantes normalizadas A/R , B/R , C/R , D/R , E/R e F/R foram ajustados utilizando o comando ‘Solver’ da planilha Excel, tendo como objetivo minimizar a soma do quadrado das diferenças entre valores de intensidade de precipitação tomados em malhas de ensaio geradas pela rotina desenvolvida e valores de intensidade de precipitação tomados em malhas de ensaio realizado em campo. Seguindo recomendação de Richards &

Weatherhead (1993) foram minimizados, simultaneamente, a soma de quadrados de desvios correspondentes a 3 pares de matrizes (estimadas vs observadas).

3.5 Avaliação do modelo ajustado

3.5.1 Modelagem da distribuição de água sob vento

A habilidade com que o modelo ajustado é capaz de prever a distribuição de água do aspersor PLONA-RL250, operando sob condições de vento, foi avaliada através das diferenças entre valores de intensidade de precipitação tomados em malhas geradas pelo modelo e malhas observadas em ensaios de campo.

Os desvios entre valores simulados e valores observados de intensidade de precipitação foram quantificados através da raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado (RMSa), equação 21, tomados em relação aos valores não nulos, conforme proposto por Granier et al. (2003) e Newell e colaboradores (Newell et al., 2003; Smith et al., 2008)

$$\text{RMSa} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} [(I_{(i,j)\text{obs}} - I_{(i,j)\text{sim}})^*]^2}{n_0}} \quad (21)$$

em que

$I_{(i,j)\text{obs}}$ = Intensidade de aplicação de água no ponto de coordenada (i,j) da malha observada em campo, mm.h^{-1} ;

$I_{(i,j)\text{sim}}$ = Intensidade de aplicação de água no ponto de coordenada (i,j) da malha simulada pelo modelo ajustado, mm.h^{-1} ;

n_0 = número de pontos com desvio diferente de zero;

$(I_{(i,j)\text{obs}} - I_{(i,j)\text{sim}})^*$ = desvios com valor diferente de zero.

3.5.2 Modelagem da uniformidade de aplicação de água de sistemas autopropelidos

A metodologia utilizada para transformar os valores de intensidade de precipitação, das matrizes que representam a distribuição espacial de água do aspersor PLONA-RL250, operando de forma estacionária no centro da malha de coletores em valores de lâminas de água aplicada ao longo de uma linha perpendicular à trajetória infinita de deslocamento linear de um aspersor é esquematizada na Figura 6. Esta metodologia, que é semelhante às utilizadas por Colombo (1991), Newell (2003) e Smith et al. (2008), tem como base a aplicação da equação 22, que tem seus elementos definidos de acordo com o esquema da Figura 6.

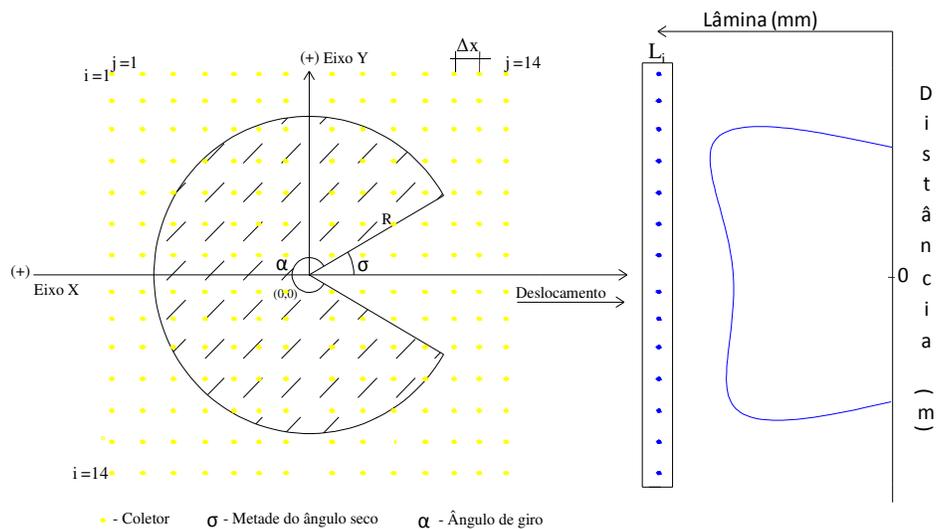


FIGURA 6 Conversão dos valores de intensidade de precipitação da malha de ensaio estacionário do aspersor em valores de lâminas de água aplicada ao longo de uma linha perpendicular à trajetória de deslocamento linear do aspersor.

Em todas as simulações efetuadas foi considerado que o aspersor se desloca com velocidade linear (v , $m.s^{-1}$) constante de $50 m.h^{-1}$, ao longo de uma trajetória infinita, que tem sentido oposto ao do eixo x do sistema de coordenadas dos ensaios de campo.

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} (I_{0(i,j)obs} \cdot \Delta x)}{v} \quad (22)$$

em que

L_i = lâmina, de índice i aplicada ao longo da linha perpendicular ao deslocamento linear do aspersor, mm;

$I_{0(i,j)obs}$ = intensidade de aplicação de água no coletor de índice i, j , da malha de coletores do ensaio de distribuição de água, $mm.h^{-1}$;

Δx = espaçamento regular entre coletores, m.

v = velocidade de deslocamento linear do aspersor; $m.h^{-1}$.

Nas simulações de uniformidade de autopropelidos, que envolviam um ângulo de giro do aspersor menor que 360° , os valores de intensidade de precipitação da malha estacionária de distribuição de água, representando a condição de ausência de vento, foram alterados de acordo com o seguinte esquema: (i) nos pontos de amostragem situados fora do setor molhado os valores de intensidade de precipitação foram zerados; (ii) nos pontos de amostragem situados no interior do setor molhado os valores de intensidade de precipitação foram corrigidos, conforme indicado pela equação 23:

$$I_{0(i,j)} = \frac{360 \cdot I_{(i,j)}}{\alpha} \quad (23)$$

em que

α = ângulo do setor molhado pelo aspersor, em graus;

$i_{(i,j)}$ = taxa de aplicação de água, no ponto de amostragem (i,j) da malha estacionária do aspersor operando com ângulo de 360°, mm.h⁻¹;

$I_{0(i,j)}$ = taxa de aplicação de água, no ponto de amostragem (i,j) da malha estacionária do aspersor operando com ângulo menor que 360°, mm.h⁻¹.

Para simulação da uniformidade de distribuição de água de equipamentos autopropelidos operando sob diferentes espaçamentos de carregadores, os valores de lâmina aplicada na linha perpendicular ao deslocamento do aspersor foram sobrepostos lateralmente, seguindo metodologia amplamente utilizada na avaliação de equipamentos autopropelidos (Merriam & Keller, 1978), ISO 8224-1 (ISO, 2004).

A habilidade com que o modelo ajustado é capaz de prever a uniformidade de aplicação de água em sistemas autopropelidos, equipados com o aspersor PLONA-RL250 operando sob condições de vento, foi avaliada através da análise do desvio absoluto (%) entre valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) oriundos de matrizes de ensaios de campo (CUC_{obs}) e valores de uniformidade oriundos de matrizes estimadas pelo modelo avaliado (CUC_{est}). O desvio absoluto (Da, em %) foi calculado pela seguinte expressão:

$$Da = \text{Abs} (CUC_{obs} - CUC_{est}) \cdot 100 \quad (24)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de agrupamento

A variação do erro médio (E_k) na estimativa da precipitação adimensional, em função do número K de perfis típicos considerados no agrupamento, é mostrada na Figura 7. Nesta figura, observa-se uma alteração substancial no comportamento da curva na região em que número de grupos (K) é reduzido de seis para quatro.

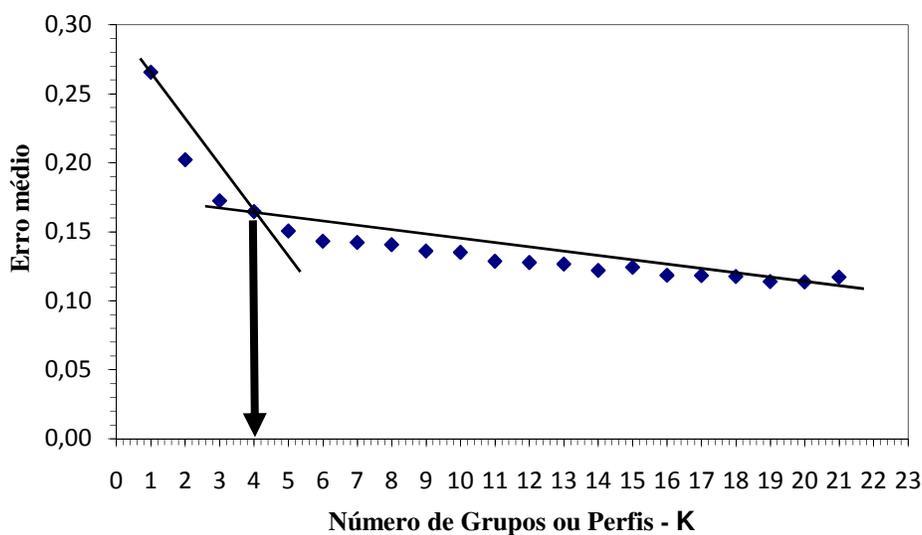


FIGURA 7 Variação do erro médio (E_k) da intensidade adimensional em função do número (k) de perfis típicos adotados.

Quando os 160 perfis adimensionais são agrupados em quatro conjuntos distintos (I, II, III, e IV), o erro médio observado (0,165) fica pouco acima dos valores, 0,116, 0,119 e 0,147, relatados, respectivamente, por Solomon & Bezdek (1980), Colombo et al. (1996) e Prado (2004). No entanto, conforme

recomendado por Solomon & Bezdeck (1980), com quatro perfis típicos é possível estabelecer uma relação bastante racional entre as condições operacionais do aspersor e o grupo de ocorrência do perfil radial normalizado de aplicação de água do aspersor PLONA-RL250. Este fato é mais bem ilustrado na Figura 8, que mostra, para as 160 combinações de pressão e diâmetro dos bocais, o diâmetro molhado (m) característico de cada combinação e, também, a forma geométrica típica (I, II, III, IV) a ela vinculada (Tabela 1A do Anexo).

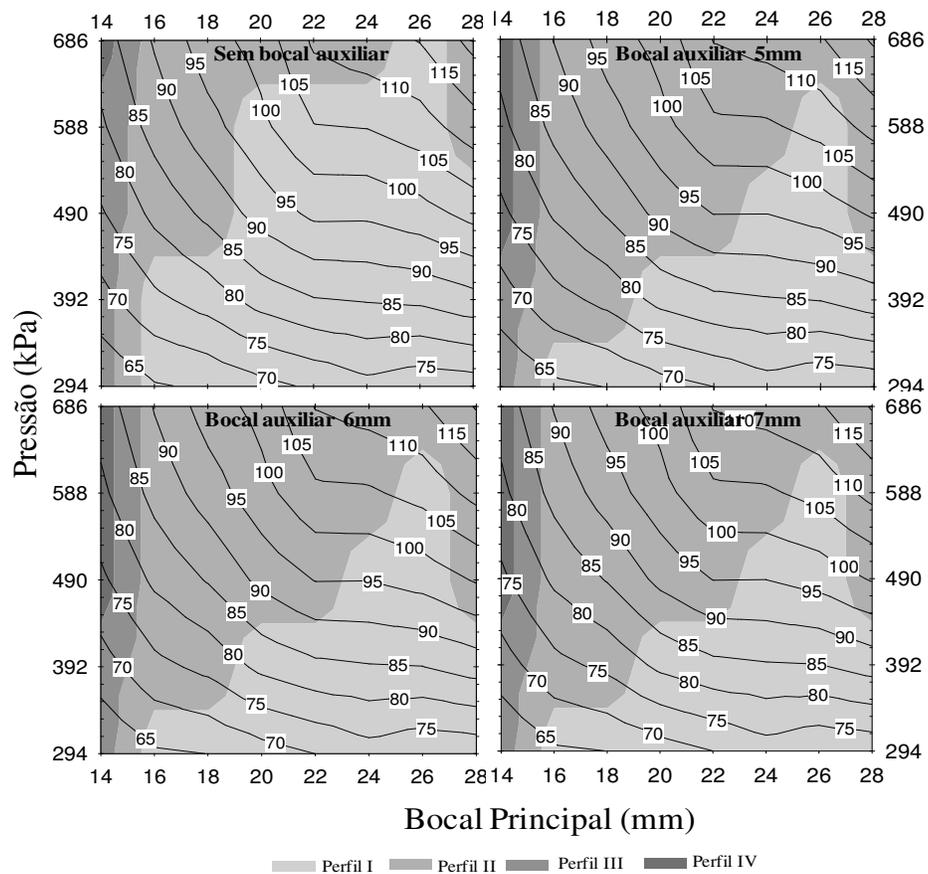


FIGURA 8 Diâmetro molhado (m) e forma do Perfil típico característico (I, II, III, IV) correspondentes às diferentes combinações entre pressão e diâmetro dos bocais do aspersor PLONA-RL250.

Na Figura 8, a região de ocorrência dos diferentes perfis típicos pode ser associada à ocorrência de condições operacionais que determinam diferentes níveis de pulverização do jato de água do aspersor. A região do canto inferior direito das superfícies mostradas na Figura 8, onde a ocorrência do perfil I predomina, corresponde à utilização dos maiores diâmetros do bocal principal sob as menores pressões de serviço. A região mais centralizada da figura, onde o perfil II predomina, corresponde à utilização de bocais intermediários com maiores pressões. E a região do canto superior esquerdo destas figuras, onde predominam os grupos III e IV, corresponde à utilização dos menores diâmetros do bocal principal sob as maiores pressões de serviço.

A forma geométrica dos perfis radiais normalizados, correspondentes a cada um dos quatro grupos (Tabela 3A do Anexo), que é mostrada na Figura 9, confirma a adequação da associação entre agrupamento e grau de pulverização do jato de água do aspersor, resultante das condições operacionais seleccionadas.

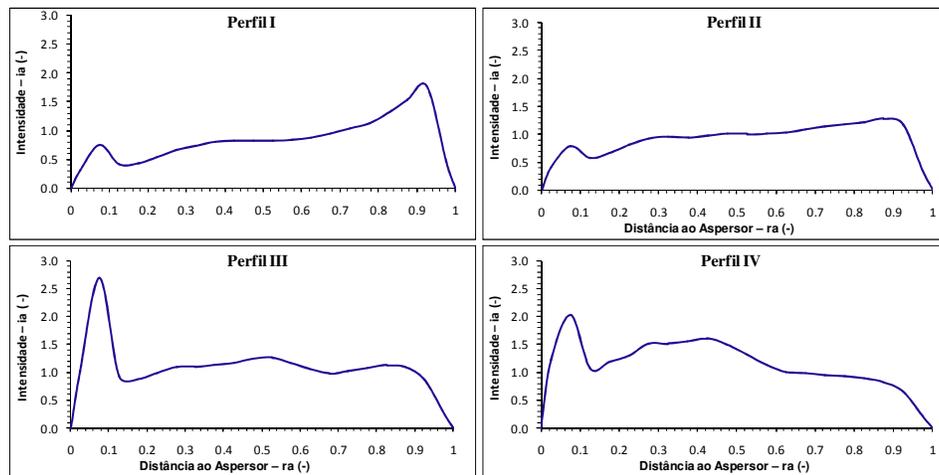


FIGURA 9 Representação dos perfis adimensionais (I, II, III, IV) do aspersor PLONA-RL250.

Nota-se, na Figura 9, a existência de um acúmulo de aplicação de água na extremidade final do perfil radial do tipo I, havendo uma intensificação do grau de pulverização do jato de água à medida que o perfil assume os formatos II, III e IV, respectivamente. Esta dissipação do acúmulo de aplicação de água na extremidade do raio de alcance, em função da elevação da pressão, está de acordo com o comportamento previsto por diversos autores (Christiansen, 1942; Keller & Bliesner, 1990; Bernardo et al., 2005; Tarjuelo, 2005).

4.2 Determinação dos parâmetros normalizados

A viabilidade da utilização, no modelo de Richards & Weatherhead (1993), de coeficientes empíricos com valores normalizados, através do raio de alcance sem vento (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R), foi analisada através de estimativas pelas dimensões da área molhada distorcida pelo vento e posteriormente, com estimativas através do método dos mínimos quadrados.

4.2.1 Estimativas pelas dimensões da área molhada

Observa-se nas figuras 10, 11 e 12 que as relações determinadas em ensaios de campo, entre dimensões da área molhada e velocidade do vento, seguem as mesmas tendências previstas pelas equações 15c, 13b e 12c.

Em cada curva, correspondentes às observações de campo nas Figuras 10, 11 e 12, foram considerados 53 valores de distância, determinados em condições de vento, e 26 valores de raio de alcance, determinados pelo aplicativo SIMULASOFT. De acordo com valores mostrados (Tabela 4A do Anexo), estes conjuntos de dados cobrem uma variação no valor do raio de alcance, sem vento, do aspersor PLONA-RL 250 que abrange desde 33,7 m (bocais de 14 x 7 mm na pressão de 392 kPa) até 45,68 m (20 x 6 mm; pressão de 490 kPa).

A variação, em função do valor da velocidade do vento, do valor médio ($RC = (RC_D + RC_E) / 2$) das distâncias entre o aspersor e a extremidade da área

molhada, tomada em direções perpendiculares à da linha de ação do vento é mostrada na Figura 10. O bom ajuste dos dados observados ao modelo linear ($r^2 = 0,850$) e a proximidade entre o valor assumido pelo intercepto da reta ajustado ao valor teórico esperado (101,5 e 100) são indicadores da adequação do uso de parâmetros empíricos normalizados. O confronto entre as duas equações mostradas na Figura 10 fornece uma primeira estimativa quanto ao valor da soma dos fatores empíricos normalizados, utilizados no cálculo da redução do raio de alcance devido ao fluxo induzido: ($D/R + E/R + F/R = 0,0725 \text{ s.m}^{-1}$).

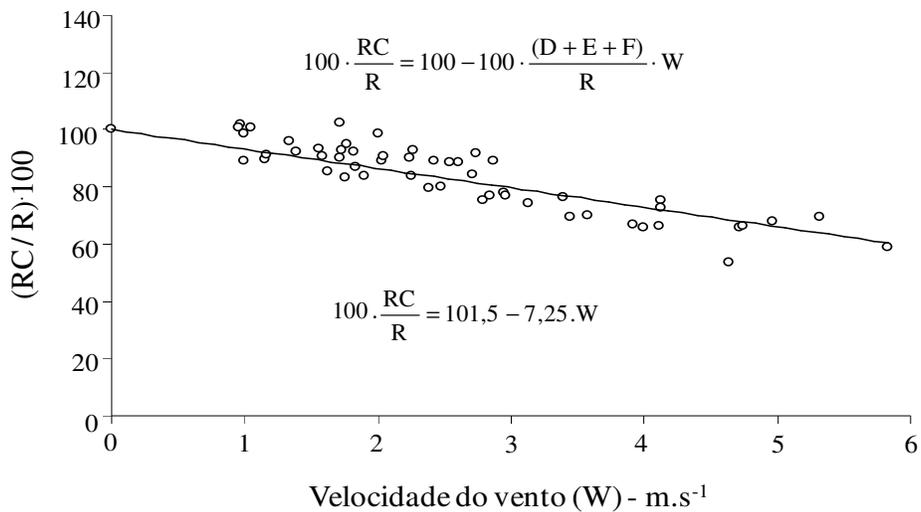


FIGURA 10 Média das distâncias relativas até a extremidade da área molhada (RC/R), tomadas perpendicularmente à direção do vento, sob diferentes velocidades de vento.

A variação, em função do valor da velocidade do vento, do valor da distância relativa (RU/R) entre o aspersor e a extremidade da área molhada, tomada em sentido oposto ao do vento é mostrada na Figura 11. O bom ajuste dos dados observados no modelo linear ($r^2 = 0,737$) e a proximidade entre o

valor assumido pelo intercepto da reta ajustado ao valor teórico esperado (101,7 e 100) são indicadores da adequação do uso de parâmetros empíricos normalizados. O confronto entre as duas equações mostradas na Figura 11 e o valor previamente estimado de $(D/R+E/R+F/R)$ permite estabelecer uma primeira estimativa do valor da soma dos fatores empíricos normalizados para cálculo da deriva pelo vento: $(A/R+B/R+C/R = 0,0333 \text{ s.m}^{-1})$.

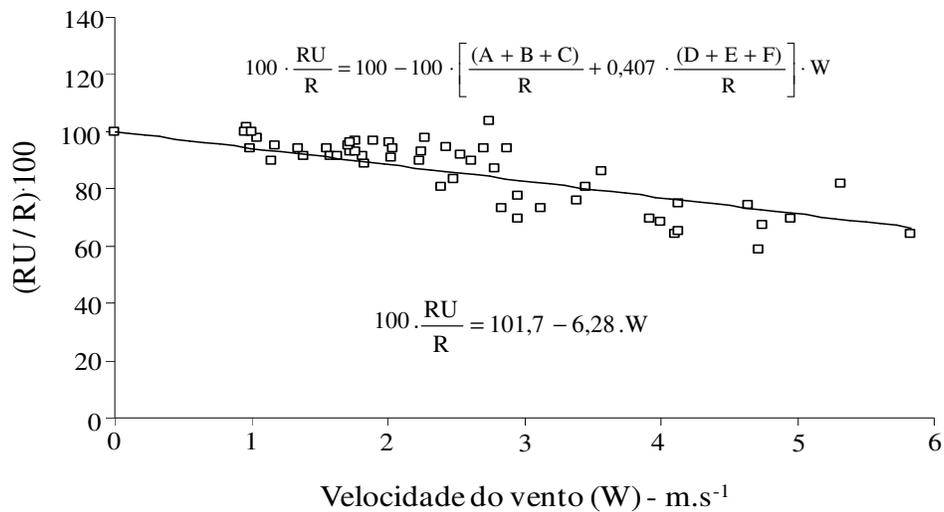


FIGURA 11 Distâncias relativas (RU/R) até a extremidade da área molhada, tomadas em sentido oposto ao do vento, sob diferentes velocidades de vento.

A variação, em função do valor da velocidade do vento, do valor da distância relativa (RD/R) entre o aspersor e a extremidade da área molhada, tomada no mesmo sentido do vento é mostrada na Figura 12.

No caso da Figura 12, o coeficiente de determinação da reta de ajuste obtida não foi tão bom quanto os anteriores ($r^2 = 0,215$), mas a proximidade entre o valor assumido pelo intercepto da reta ajustado e valor teórico esperado (101,4 e 100) foi mantida. A forma ascendente da reta de ajuste obtida indica

que, no sentido do vento, o efeito de redução do raio de alcance, provocado pela interrupção do fluxo induzido de ar, é pouco menor que o efeito da deriva do vento. Com base no confronto entre as duas equações, mostradas na Figura 12, e no valor previamente estimado de $(D/R+E/R+F/R)$, é possível estabelecer uma segunda estimativa para o valor da soma dos fatores empíricos normalizados utilizados no cálculo da deriva pelo vento: $(A/R+B/R+C/R) = 0,0429 \text{ s.m}^{-1}$. Esta segunda, apesar de pouco maior está próxima da primeira. Desta forma pode-se assumir que $(A/R+B/R+C/R = 0,0381 \text{ s.m}^{-1})$.

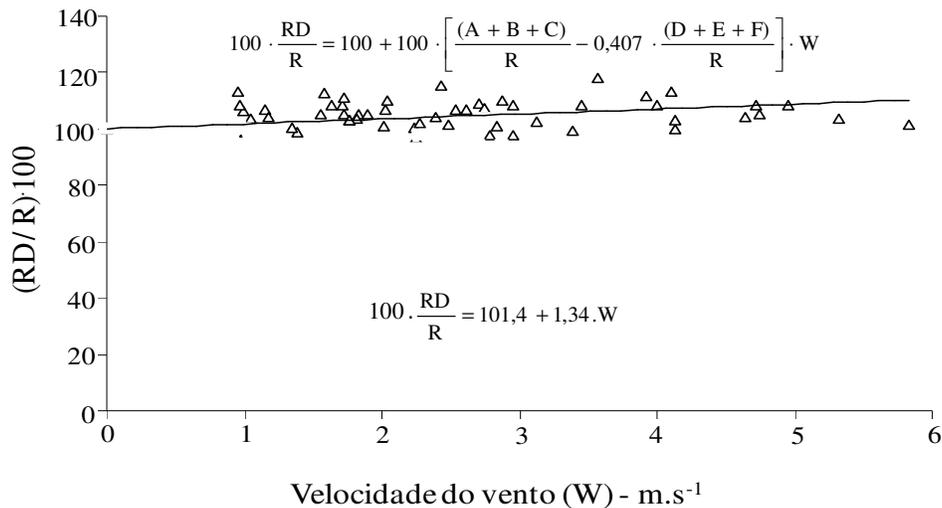


FIGURA 12 Distâncias relativas (RD/R) até a extremidade da área molhada, tomadas no sentido do vento, sob diferentes velocidades de vento.

Além de inferências quanto à adequação dos parâmetros propostos e quanto ao valor assumido pelos coeficientes empíricos, os gráficos mostrados nas Figuras 10, 11 e 12 permitem inferir que: (i) para cada incremento de 1 m.s^{-1} na velocidade do vento, o raio de alcance do aspersor, na direção perpendicular à linha de ação do vento (RC – Figura 10), sofre uma redução de 7,25%, em

relação ao valor sem vento (R); (ii) para cada incremento de 1 m.s^{-1} na velocidade do vento, o raio de alcance do aspersor, tomado no sentido oposto ao vento (RU – Figura 11), sofre uma redução de 6,28%, em relação ao valor sem vento (R); e (iii) para cada incremento de 1 m.s^{-1} na velocidade do vento, o raio de alcance do aspersor, tomado no sentido do vento (RD – Figura 12), sofre um acréscimo de 1,34%, em relação ao valor sem vento (R).

Essa variação no raio de alcance do aspersor PLONA-RL250, devido à ação do vento, está em proximidade com o comportamento previsto por Richards & Weatherhead (1993). Avaliando o aspersor Nelson P150 com bocal de 25,4 mm e ângulo de inclinação do jato de 24° eles deduziram que, para as distâncias perpendiculares e contra o sentido do vento, a distância da borda da área molhada até o aspersor reduz sob uma taxa de 6,4 % para cada incremento de 1 m.s^{-1} na velocidade do vento, enquanto a distância no sentido a favor do vento aumenta sob uma taxa de 1,2% para cada incremento de 1 m.s^{-1} na velocidade do mesmo.

4.2.2 Estimativas através dos mínimos quadrados

Seguindo a recomendação de Richards & Weatherhead (1993), no sentido de minimizar simultaneamente a soma de quadrados de desvios correspondentes à, no máximo, três pares de matrizes (3 estimadas vs 3 observadas), os 53 ensaios de distribuição de água disponíveis permitiam a formação de 23426 conjuntos distintos, contendo 3 ensaios cada. No entanto, em função da análise das dimensões da área molhada distorcida pelo vento, foi estabelecido que valores representativos dos coeficientes empíricos selecionados deveriam atender às seguintes propriedades: (i) $A/R+B/R+C/R = 0,0381 \text{ s.m}^{-1}$; e (ii) $D/R+E/R+F/R = 0,0725 \text{ s.m}^{-1}$.

Dessa forma, diversos conjuntos distintos de 3 ensaios de campo foram submetidos ao processo de ajuste dos parâmetros, até que um conjunto, contendo

os ensaios de campo de número 29 (16 x 6 mm x 490 kPa, com vento de $1,83 \text{ m.s}^{-1}$ na direção de 28°), 26 (16 x 0 mm x 490 kPa, com vento de $2,25 \text{ m.s}^{-1}$ na direção de 353°) e 42 (18 x 5 x 490 kPa, com vento de $4,13 \text{ m.s}^{-1}$ na direção de 107°) da Tabela 2A do Anexo, forneceu valores de parâmetros empíricos ajustados que atendiam ao critério de representatividade estabelecido.

O valor individual dos coeficientes ajustados e a proximidade da soma de alguns destes coeficientes com a meta de representatividade desejada são dados a seguir: (i) $A/R = 0,0362 \text{ s.m}^{-1}$, $B/R = 0,0131 \text{ s.m}^{-1}$ e $C/R = -0,0097 \text{ s.m}^{-1}$ resultam em: $0,0396/0,0381 = 1,0394$; e (ii) $D/R = 0,0026 \text{ s.m}^{-1}$, $E/R = 0,4003 \text{ s.m}^{-1}$ e $F/R = -0,3361 \text{ s.m}^{-1}$ resultam em: $0,0667/0,0725 = 0,9200$.

A adequação dos parâmetros do ajuste obtido pode ser avaliada na Figura 13, que compara mapas de contorno das taxas de aplicação de água (mm.h^{-1}) do aspersor, obtidas nos ensaios de campo (ensaios 29, 26 e 42, da Tabela 2A) com mapas gerados pelo aplicativo desenvolvido, para as mesmas condições dos ensaios de campo.

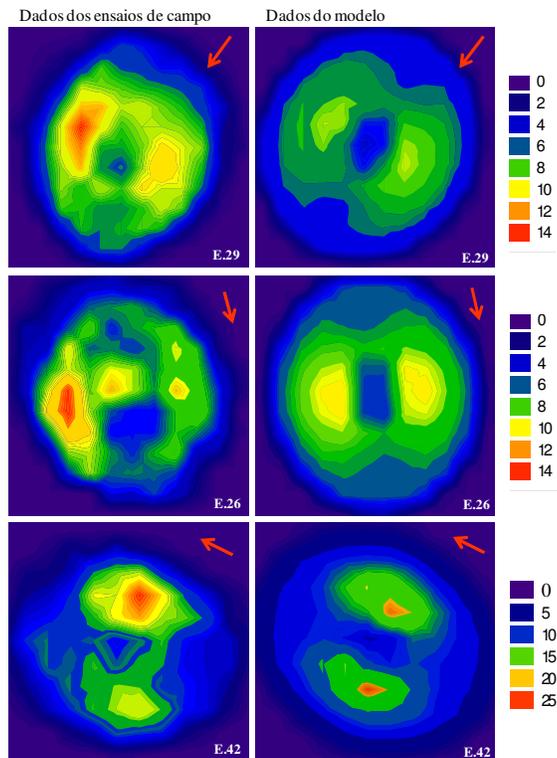


FIGURA 13 - Mapas de contorno das taxas de aplicação (mm.h^{-1}) determinadas em campo e geradas pelo modelo.

4.3 Avaliação do modelo ajustado

4.3.1 Comportamento do modelo

Na Figura 14 são mostrados exemplos de distorção do padrão de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250, operando com bocal de 26 x 7 mm e pressão de serviço de 392 kPa (Perfil típico I), calculados pelo modelo de Richards & Weatherhead (1993) para diferentes valores de velocidades de vento, variando entre 0 e 5 m.s^{-1} , em intervalos regulares de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ para cada figura subsequente entre a e f.

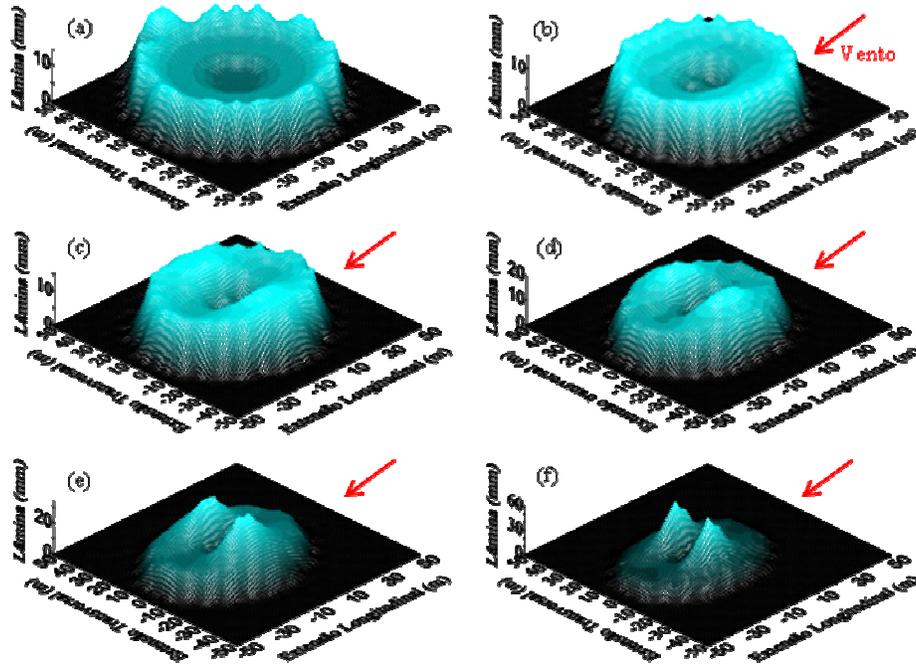


FIGURA 14 Modelagem do efeito da velocidade do vento sobre o padrão de aplicação de água do aspersor PLONA-RL250.

O comportamento do padrão molhado do aspersor, ilustrado na Figura 14, está de acordo com as observações de Shull & Dylla (1976), no que se refere à ocorrência de redução na largura da área molhada pelo aspersor, na direção perpendicular a linha de ação do vento e no sentido contrário ao vento, muito mais acentuada que o aumento no alcance observado no sentido do vento. A modelagem também prevê a formação de duas áreas, uma de cada lado do aspersor, nas quais, segundo Shull & Dylla (1976), a taxa de aplicação pode atingir, em função do aumento da velocidade do vento, um valor até 10 vezes maior que a taxa média de aplicação do padrão de distribuição de água sem vento.

4.3.2 Estimativas da taxa de aplicação

Valores da raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado (RMSa, equação 21), referentes à comparação entre dados de precipitação simulados pelo modelo e obtidos nos 50 ensaios de campo, que não foram utilizados na calibração das constantes do modelo, são mostrados na Figura 15. Com exceção dos ensaios 14, 38, 45 (da tabela 2A do Anexo), os valores de RMSa dos demais ensaios são da mesma ordem da média de RMSa (2,28 mm.h⁻¹), observada nos três ensaios utilizados para ajuste dos parâmetros empíricos.

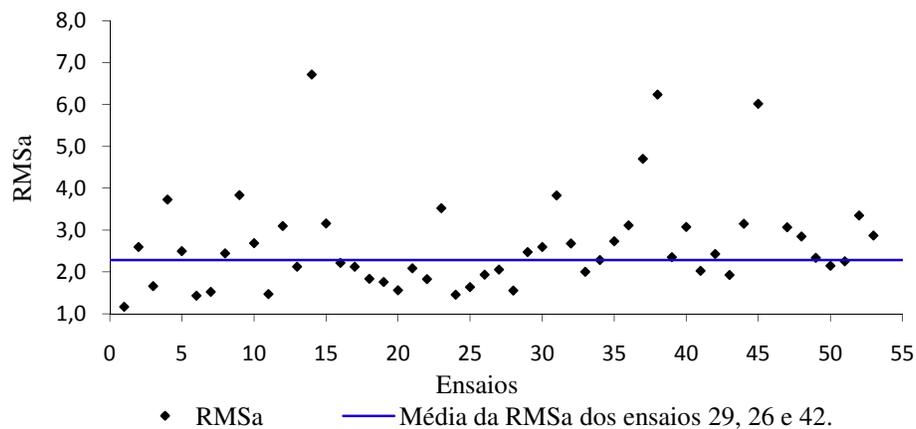


FIGURA 15 Variação entre os dados de precipitação simulados pelo modelo e obtidos com dados de campo.

A adequação da utilização dos parâmetros empíricos ajustados, para condições operacionais do aspersor RL250, diferentes daquelas observadas nos ensaios 29, 26 e 42 (da tabela 2A do Anexo), também pode ser avaliada através da Figura 16, que compara mapas de contorno das taxas de aplicação de água (mm.h⁻¹) do aspersor, referentes aos ensaios de campo de número 52 (22 x 6 mm x 490 kPa, com vento de 2,87 m.s⁻¹ na direção de 347°), 12 (14 x 5 mm x 490 kPa, com vento de 3,92 m.s⁻¹ na direção de 123°) e 2 (14 x 0 mm x 392 kPa, com vento de 4,13 m.s⁻¹ na direção de 114°).

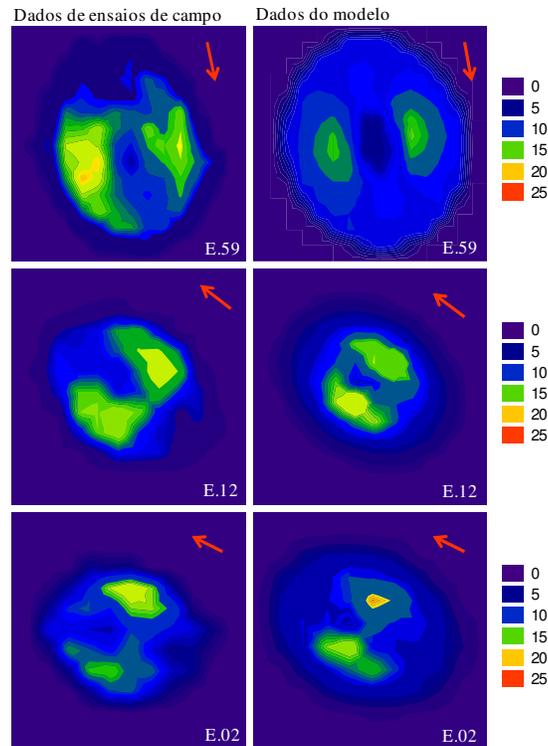


FIGURA 16 Mapas de contorno das taxas de aplicação (mm.h^{-1}) determinadas em campo e geradas pelo modelo

4.3.3 Estimativas da uniformidade de aplicação de água de sistemas autopropelidos

Na coluna esquerda das Figuras 17 e 18 é possível comparar valores de lâmina aplicada, ao longo de linhas perpendiculares à trajetória de deslocamento de um autopropelido isolado, oriundos de distribuições de água geradas pelo modelo de Richards & Weatherhead (1993) com valores oriundos de distribuições observadas em ensaios de campo realizados sob condições de vento (esquema da Figura 3). Na coluna direita destas figuras é possível comparar valores de uniformidade, obtidos através da sobreposição lateral das lâminas apresentadas à esquerda, em diferentes espaçamentos entre carreadores.

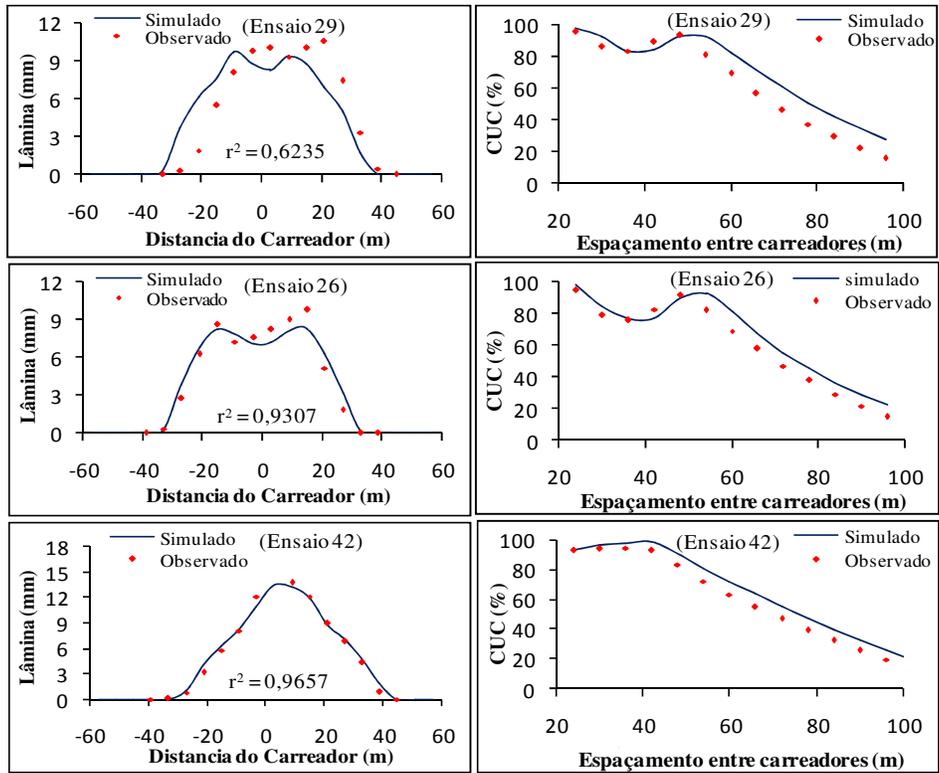


FIGURA 17 Lâminas em linhas perpendiculares a um carreador isolado e uniformidades em diferentes espaçamentos de carreadores: valores oriundos de malhas observadas em ensaios de campo (pontos) e valores oriundos de malhas simuladas pelo modelo ajustado (linhas).

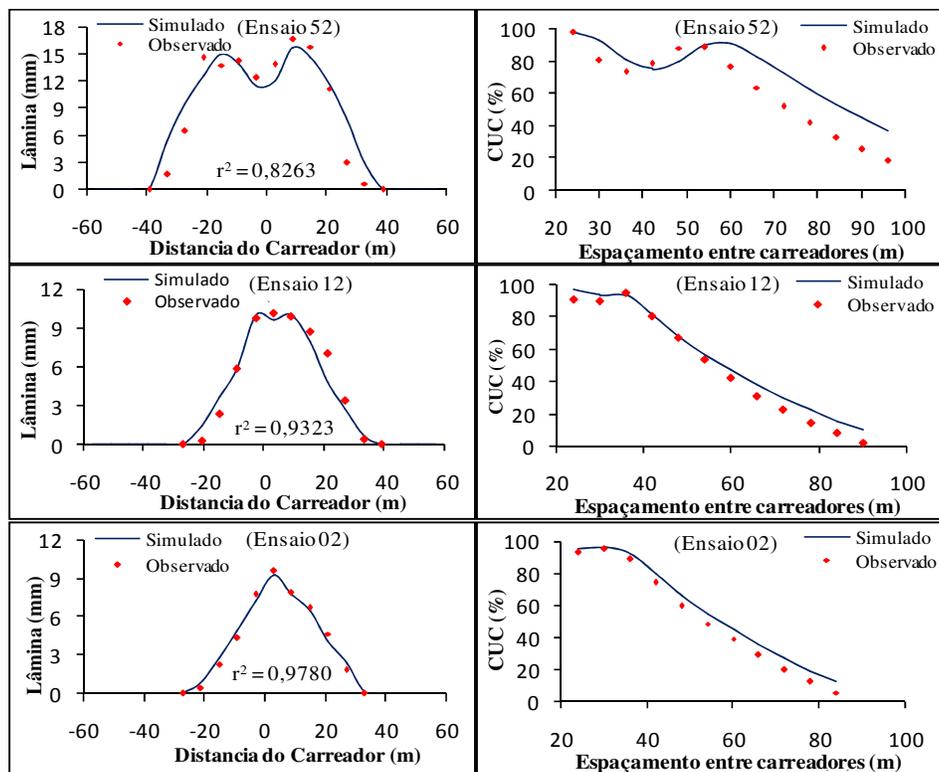


FIGURA 18 Lâminas em linhas perpendiculares a um carreador isolado e uniformidades em diferentes espaçamentos de carreadores: valores oriundos de malhas observadas em ensaios de campo (pontos) e valores oriundos de malhas simuladas pelo modelo ajustado (linhas).

Os valores apresentados na Figura 17 correspondem aos ensaios 29, 26 e 42, da Tabela 2 do Anexo (ensaio 29: 16 x 6 mm x 490 kPa, com vento de $1,83 \text{ m.s}^{-1}$ na direção 28° ; ensaio 26: 16 x 0 mm x 490 kPa, com vento de $2,25 \text{ m.s}^{-1}$ na direção 353° ; ensaio 42: 18 x 5 mm x 490 kPa, vento de $4,13 \text{ m.s}^{-1}$ na direção 107°) que foram utilizados para ajustar os valores dos parâmetros empíricos do modelo de Richards & Weatherhead (1993). Os valores apresentados na Figura 18 correspondem aos ensaios 52, 12, 2, da Tabela 2 do Anexo (ensaio 52: 22 x 6 mm x 490 kPa, com vento de $2,87 \text{ m.s}^{-1}$ na direção

347⁰; ensaio 12: 14 x 5 mm x 490 kPa, com vento de 3,92 m.s⁻¹ na direção 123⁰; ensaio 2: 14 x 0 mm x 392 kPa, com vento de 4,13 m.s⁻¹ na direção de 114⁰), que foram selecionados de forma aleatória para verificar a aplicabilidade dos coeficientes ajustados.

Com exceção do ensaio 29, da Figura 17, nos demais ensaios mostrados nas Figuras 17 e 18, os coeficientes de determinação, entre os valores observados e estimados das lâminas, foram todos superiores a 82,0 %, e muito próximos do valor médio (85%) encontrado por Prado (2004) na validação do seu aplicativo computacional para simulação de distribuição de água para autopropelidos, operando com o aspersor PLONA-RL300 em condições de ausência de vento.

Apesar das diferenças nos valores de lâmina aplicada (gráficos da esquerda), o comportamento geral da uniformidade, em função da variação no espaçamento entre carreadores (gráficos da direita), é adequadamente reproduzido pelas malhas de distribuição de água geradas pelo modelo ajustado. Conforme ilustrado na Figura 19, que mostra a relação entre 354 valores de CUC simulados através de malhas produzidas pelo modelo ajustado e 354 valores de CUC simulados com dados das 53 malhas observadas em ensaios de campo, os bons resultados obtidos com o modelo ajustado na previsão de valores de uniformidade de equipamentos autopropelidos, que foram mostrados nos seis ensaios considerados nas Figuras 17 e 18 também se repetem nos demais ensaios disponíveis.

A adequação da extensão da hipótese, de que estimativas de uniformidade de aplicação de água de equipamentos autopropelidos de irrigação, operando sob condições de vento e oriundas de malhas geradas pelo modelo ajustado são tão boas quanto àquelas oriundas de malhas observadas em ensaios de campo, para outras combinações de bocais e pressão de serviço do aspersor RL-250, que não foram cobertas pelos 53 ensaios de campo, pode ser avaliada

através da Figura 20. Nesta figura, os 354 pares de valores de CUC, mostrados na Figura 19, foram separados em grupos correspondentes aos quatro perfis típicos adimensionais I, II, III e IV.

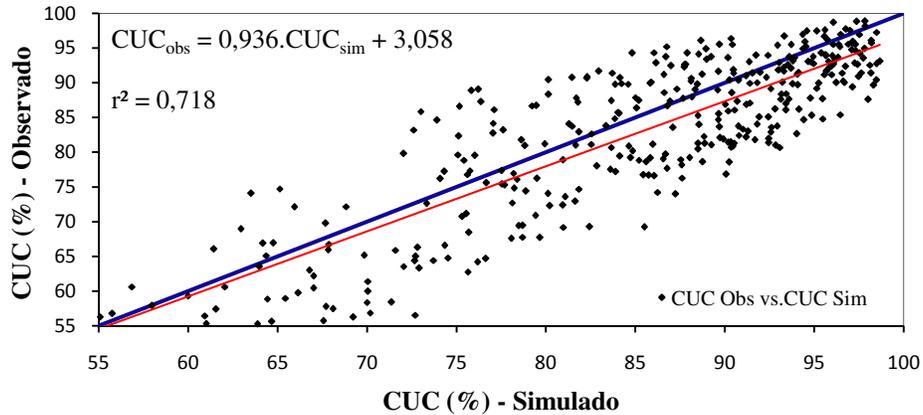


FIGURA 19 Relação entre valores de CUC simulados com dados gerados pelo modelo ajustado e valores de CUC simulados com dados observados nos 53 ensaios de campo realizados.

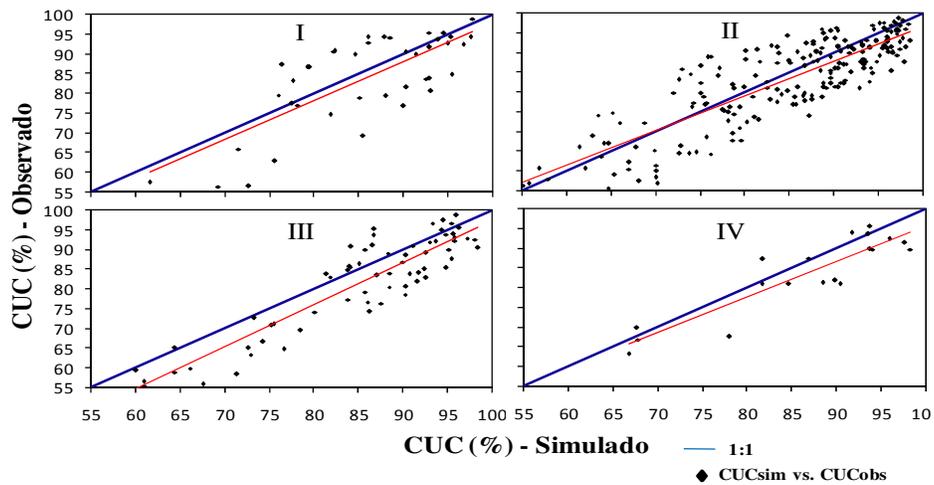


FIGURA 20 Valores, agrupados em função do tipo de perfil teórico (I, II, III e IV), de CUC simulados com dados gerados pelo modelo ajustado e valores de CUC simulados com dados observados nos ensaios de campo.

A Figura 19 mostra a boa correlação ($r^2 = 0,718$) entre os valores de CUC, simulados pelos dois processos, e uma boa distribuição dos pontos em relação à reta 1:1 que, quando comparada com a linha de tendência ajustada aos pontos, demonstra que os valores de CUC simulados com malhas geradas pelo modelo ajustado tendem a ser pouco superiores aos valores simulados com malhas observadas em campo.

A análise da Figura 20 permite concluir que, ao longo da faixa de interesse prático dos valores de CUC ($CUC > 50\%$), todos os quatro grupos apresentam o mesmo comportamento.

Os valores dos 354 desvios absolutos, e da média destes desvios (5,38%), obtidos nas comparações entre valores de CUC (malhas simuladas versus malhas observadas), são apresentados na Figura 21. Nesta figura é possível observar que o maior desvio absoluto foi de 16,25% e o menor foi de 0,061%. Estes valores são pouco superiores aos valores (média de 2% e máximo de 10%,) relatados por Prado & Colombo (2005), em comparações obtidas na ausência de ventos, e maiores que os 7 % relatados por Colombo (1991), com simulações baseadas em distribuições de água de aspersores medidas em campo.

Na Figura 22 os 354 desvios mostrados na Figura 21 foram separados em grupos correspondentes aos quatro perfis típicos adimensionais I, II, III e IV. Mostra-se que o valor médio dos desvios obtidos com os perfis I, II, III e IV são, respectivamente, 6,43, 5,14, 5,22 e 4,41%. É importante salientar que o valor médio do erro absoluto dos valores obtidos com os três ensaios utilizados para calibração das constantes empíricas (5,89 %) é da mesma grandeza do dos valores observados nos quatro grupos.

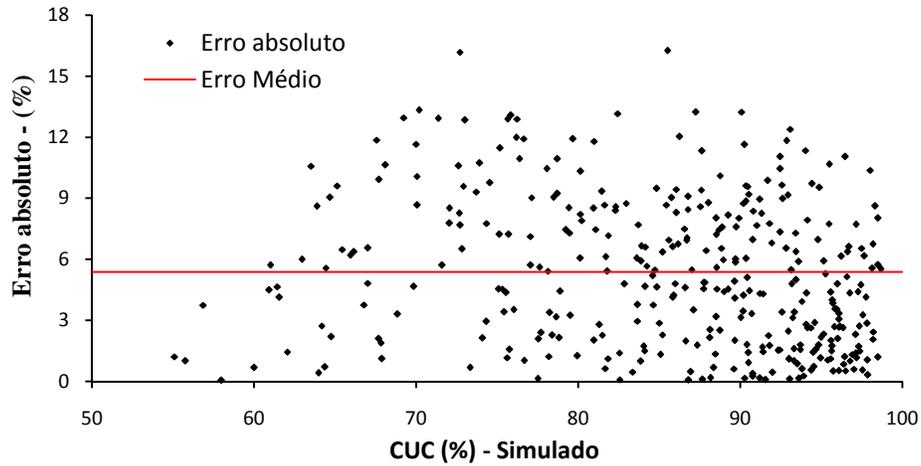


FIGURA 21 Desvio absoluto (%) em função do CUC (%) estimado a partir de malhas simuladas.

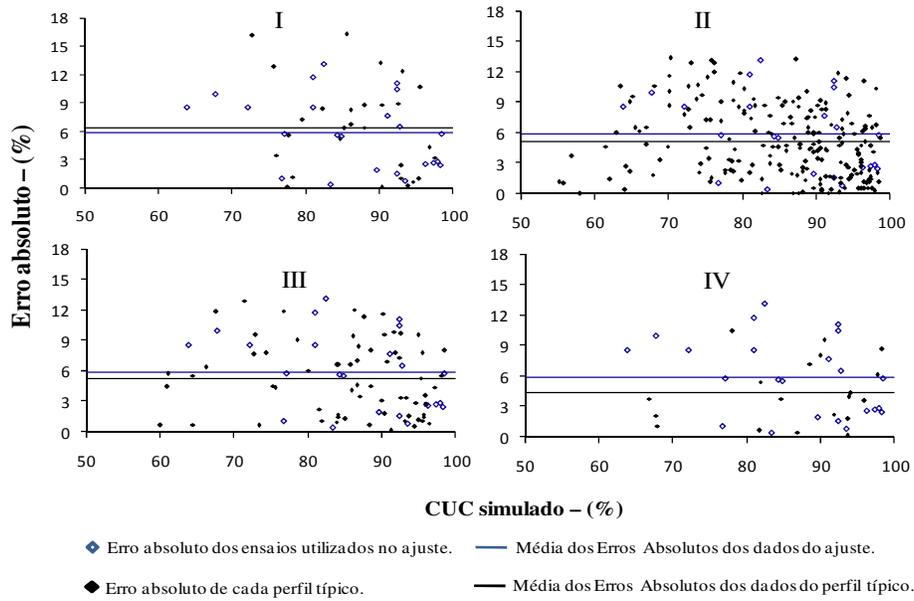


FIGURA 22 Desvio absoluto (%) em função do CUC (%) estimado a partir de malhas simuladas pelo modelo, agrupados em função do tipo de perfil teórico (I, II, III e IV).

4.4 Simulações de uso do aspersor PLONA-RL250 sob condições de vento

4.4.1 Efeitos da velocidade e direção do vento

Superfícies de resposta do coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942) (CUC - %), simuladas em função do espaçamento entre carreadores, expresso em porcentagem do diâmetro molhado (DM - %) do aspersor, e da velocidade do vento (v - $m.s^{-1}$), são apresentadas na Figura 23. Nas simulações foram consideradas três direções de incidência do vento (paralela, inclinada de 45° e perpendicular ao deslocamento do aspersor) e o aspersor PLONA-RL250, com ângulo de giro de 360° , operando em condições correspondentes a cada um dos seus quatro perfis típicos (perfil I: 22 x 6 mm x 392 kPa; Perfil II: 18 x 5 mm x 490 kPa; Perfil III: 14 x 5 mm x 392 kPa; Perfil IV: 14 x 5 mm x 588 kPa).

Na Tabela 2 são apresentadas equações lineares que foram ajustadas, a partir das coordenadas das isolinhas que representam o valor de CUC de 80% de cada superfície de resposta mostrada na Figura 23, para estimar o Espaçamento Máximo entre Carreadores (EMC, expresso em porcentagem do Diâmetro Molhado – DM%) em função da velocidade do vento (v , em $m.s^{-1}$).

TABELA 2 Equações para estimativa do espaçamento máximo entre carreadores que resulta em CUC de 80%.

		Vento Paralelo	Vento 45 graus	Vento Perpendicular
Perfil I	DMC	- 12,920.v + 96,78	- 6,678.v + 95,89	- 5,571.v + 98,18
	r^2	0,941	0,954	0,951
Perfil II	DMC	- 17,670.v + 95,32	- 6,464.v + 89,10	- 5,357.v + 90,21
	r^2	0,878	0,969	0,931
Perfil III	DMC	- 7,214.v + 77,92	- 6,607.v + 84,53	- 3,785.v + 83,64
	r^2	0,803	0,954	0,913
Perfil IV	DMC	- 15,820.v + 83,64	- 5,500.v + 76,92	- 3,714.v + 77,14
	r^2	0,915	0,933	0,915

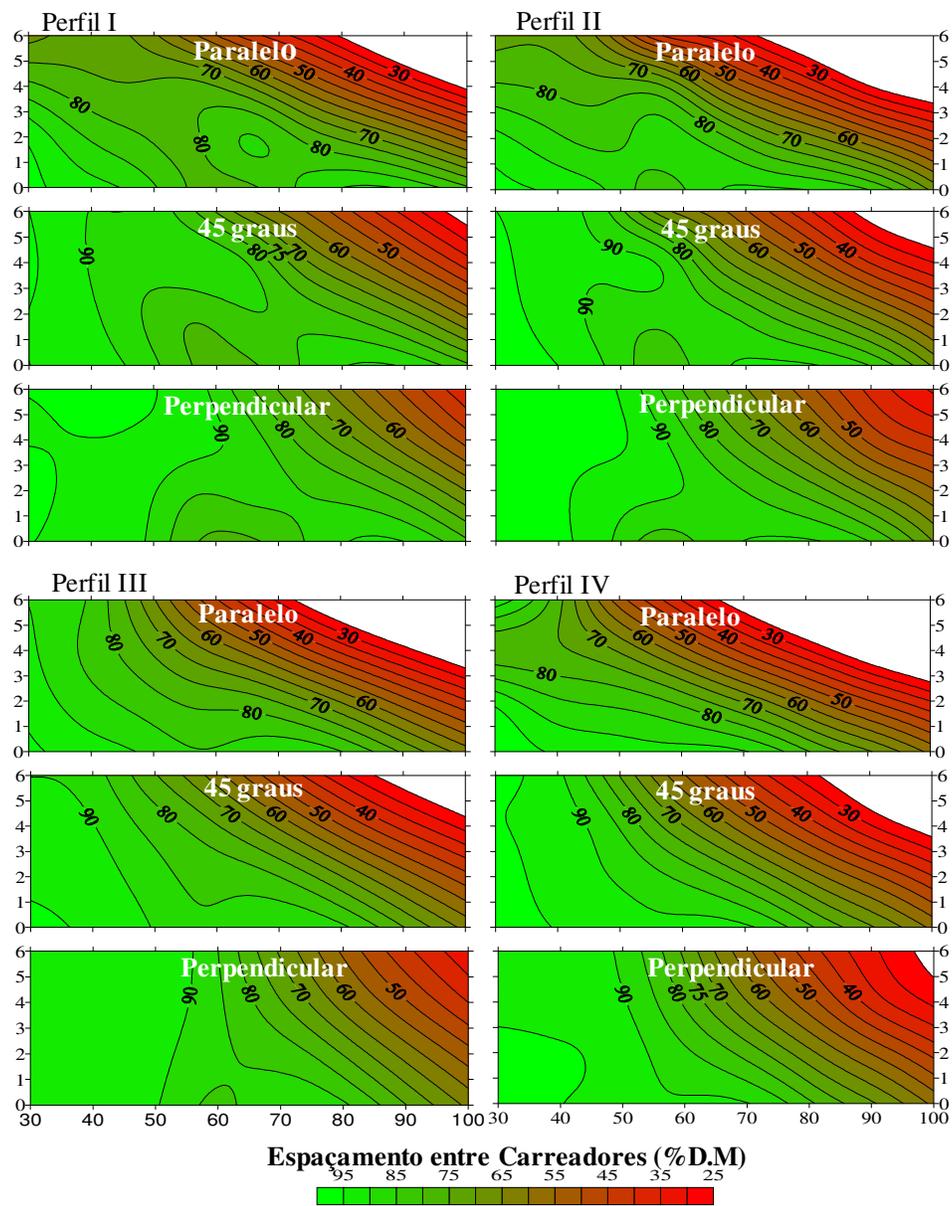


FIGURA 23 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) em função da velocidade e direção do vento e do espaçamento entre carreadores, para os quatro perfis típicos do aspersor PLONARL250.

A Tabela 2, juntamente com a Figura 23, deixa claro que a seleção do espaçamento depende da velocidade e da direção do vento, do tipo de perfil de aplicação de água (ângulo do jato, tipo de bocal, pressão), sendo difícil estabelecer um critério de espaçamento entre carregadores que seja válido para todas as condições.

Para os quatro perfis típicos estudados, percebe-se nitidamente uma maior influência do vento sobre a uniformidade de distribuição de água do aspersor quando o carregador está disposto paralelamente à direção do vento. Estes resultados estão de acordo com as recomendações de Tarjuelo (2005), no sentido de orientar o deslocamento do aspersor perpendicularmente à direção predominante do vento, para diminuir a distorção por ele causada. Para os quatro perfis típicos estudados, confirmam-se também as observações de Keller & Bliesner (1990), quanto à obtenção de valores adequados de uniformidade sob espaçamentos de carregadores menores que 55 % do diâmetro de alcance do aspersor, mesmo sob condições de elevadas velocidades de vento.

De maneira geral, conforme indicado na Figura 23 e na Tabela 2, o espaçamento entre carregadores deve ser reduzido quando a direção do vento passa de perpendicular para paralela ao eixo do carregador e, também, quando a velocidade do vento aumenta.

4.4.2 Efeitos da velocidade e direção do vento na escolha do ângulo de giro do aspersor

Superfícies de resposta do coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942) (CUC - %), simuladas em função do ângulo de giro do aspersor e do espaçamento entre carregadores, expresso em porcentagem do Diâmetro Molhado (DM - %) do aspersor, são apresentadas na Figura 24. As simulações foram efetuadas considerando a ausência de ventos e quatro condições operacionais aspersor PLONA-RL250, cada uma delas correspondente a um dos seus perfis

típicos (perfil I: 22 x 6 mm x 392 kPa; Perfil II: 18 x 5 mm x 490 kPa; Perfil III: 14 x 5 mm x 392 kPa; Perfil IV: 14 x 5 mm x 588 kPa).

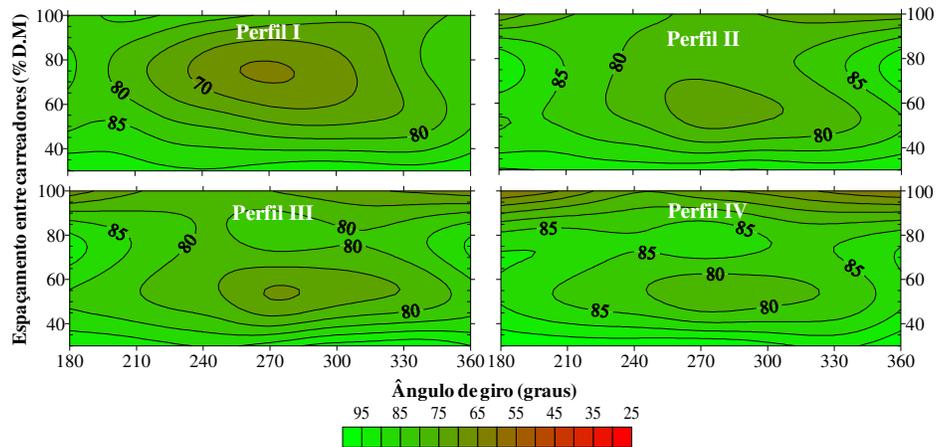


FIGURA 24 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), em função do ângulo de giro e do espaçamento entre carreadores, para as quatro formas geométricas do perfil adimensional do aspersor PLONA-RL250, operando na ausência de vento.

As simulações mostradas na Figura 24 indicam que, na ausência de vento, a utilização de ângulos de giro com valores entre 250° e 330° pode causar uma sensível redução nos valores de uniformidade. Isto pode ser observado principalmente em condições nas quais o perfil I é associado com um espaçamento próximo de 80% do DM, ou quando os Perfis II, III ou IV são associados com espaçamentos próximos de 55%. Estes resultados, apesar de contrariarem a adoção do ângulo de giro de 270° , que, segundo Rocha (2000), é normalmente recomendado pelos projetistas de sistemas autopropelidos de irrigação, confirmam a superioridade do desempenho obtido com ângulos de giro entre 180° e 240° e entre 330° e 360° , recomendados por Keller & Bliesner (1990), Tarjuelo (2005) e Prado & Colombo (2007).

Superfícies de resposta do coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942) (CUC - %), simuladas, para quatro velocidades e duas direções distintas de incidência do vento, em função do ângulo de giro do aspersor e do espaçamento entre carregadores, expresso em porcentagem do Diâmetro Molhado (DM - %) do aspersor, são apresentadas nas Figuras 25 e 26. As simulações mostradas nestas figuras foram efetuadas considerando condições operacionais do aspersor PLONA-RL250 correspondentes, respectivamente, ao perfil I (22 x 6 mm x 392 kPa) e ao Perfil III (14 x 5 mm x 392 kPa).

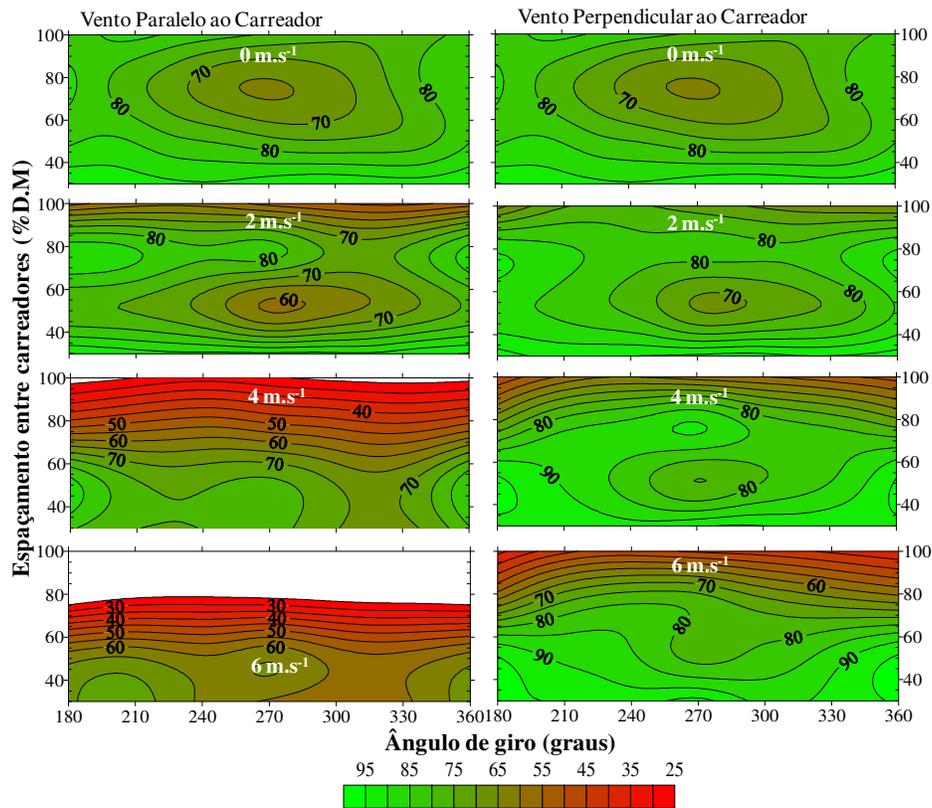


FIGURA 25 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), em função do ângulo de giro e do espaçamento entre carreadores, para o perfil típico I, do aspersor PLONA-RL250 operando sob condições de vento.

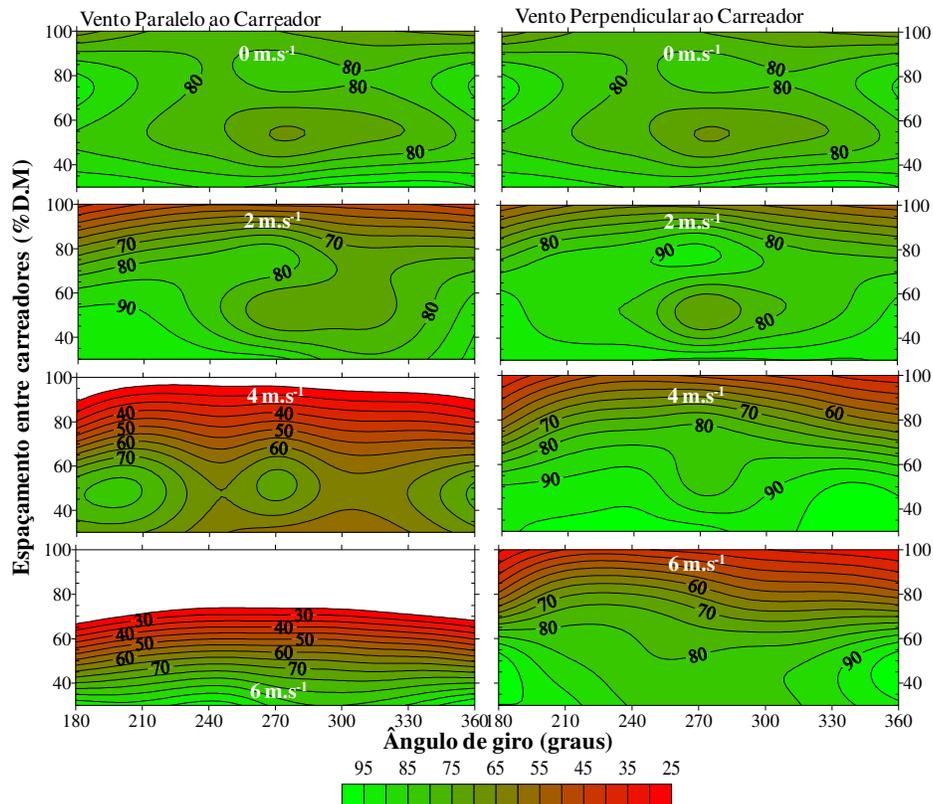


FIGURA 26 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), em função do ângulo de giro e do espaçamento entre carreadores, para o perfil típico III, do aspersor PLONA-RL250 operando sob condições de vento.

As simulações mostradas nas Figuras 25 e 26 confirmam os efeitos da maior degradação dos valores de uniformidade que ocorrem, mesmo sob ângulos de giro diferentes de 360° , quando a incidência do vento é paralela ao deslocamento do aspersor. Sob condições de vento de até 2 m.s^{-1} , que são considerados ventos leves, segundo Tarjuelo (1991), citado por Rocha (2000), a superioridade do desempenho de ângulos entre 180° e 240° ou entre 330° e 360° é bem acentuada. À medida que a velocidade aumenta as diferenças não são tão acentuadas.

5 CONCLUSÕES

- a) As relações determinadas em ensaios de campo, entre as dimensões da área molhada e a velocidade do vento seguem as mesmas tendências previstas pelas equações desenvolvidas a partir do modelo teórico de Richards & Weatherhead (1993);
- b) Apesar de diferenças nos valores de lâmina aplicada, o comportamento geral da uniformidade, em função da variação no espaçamento entre carreadores, é adequadamente reproduzido pelas malhas de distribuição de água geradas pelo modelo ajustado. Nota-se que os valores de CUC simulados com malhas geradas pelo modelo ajustado tendem a ser pouco superiores aos valores simulados com malhas observadas em campo;
- c) Para os quatro perfis teóricos estudados, as simulações indicam que o espaçamento entre carreadores deve ser reduzido quando a direção do vento passa de perpendicular para paralela ao eixo do carreador e, também, quando a velocidade do vento aumenta;
- d) As simulações não confirmam a superioridade dos valores de uniformidade obtidos com ângulos de giro próximos a 270° , que são normalmente recomendados pelos projetistas;
- e) Em condições de ausência de vento, espaçamentos entre carreadores próximos a 90% do diâmetro molhado do aspersor resultam em adequados valores de CUC, para os perfis I, II e III e, espaçamentos em torno de 70% do diâmetro molhado, geram adequados valores para o perfil IV, devendo tais espaçamentos ser reduzidos à medida que ocorram incrementos na velocidade do vento;
- f) Apesar dos bons resultados obtidos com o modelo, recomenda-se um estudo mais aprofundando da estabilidade dos valores dos coeficientes empíricos normalizados do Modelo de Richards & Weatherhead (1993).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aspersores para irrigação**: avaliação de características operacionais: ABNT/NBR 8988. Rio de Janeiro, 1985. 9 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa: UFV, 2005. 661 p.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A.; HEDDEN-DUNKHORST, B.; ANDRADE, C. L. T. Modelo computacional para suporte à decisão em áreas irrigadas: parte I: desenvolvimento e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 3-11, 2008.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. São Paulo: Thomson Learning, 2003. 736 p.

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J. M.; MOTERO, J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation: part I: description of model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p. 73-84, May 2001.

CHARMELO, L. **Desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido, sob diferentes condições operacionais**. 1990. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação a fronteira hídrica na produção de alimentos. **Revista ITEM Irrigação & Tecnologia Moderna**, São Paulo, n. 54, p. 46-55, 2002.

COLOMBO, A. **Simulação do desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido**. 1991. 120 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

COLOMBO, A.; YANAGI JÚNIOR, T.; GUIMARÃES, K. H. Perfis adimensionais de distribuição de água de aspersores e sua utilização em estudos de equipamentos autopropelidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25.; CONGRESSO LATINO AMERICANO INGENIERIA AGRÍCOLA, 2., 1996, Bauru. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 1996. p. 226.

CONCEIÇÃO, M. A. F. **Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento.** 2002. 110 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

COSTA, E. F.; VIEIRA, R. F.; VIANA, P. A. **Quimigação:** aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1994. 315 p.

FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. Avaliação de sistemas de irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação.** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. p. 573-651.

GAT, Y. L.; MOLLE, B. Model of water applications under pivot sprinkler: I theoretical grounds. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 126, n. 6, p. 343-347, Nov./Dec. 2000.

GRANIER, J.; MOLLE, B.; DEUMIER, J. M. IRRIPARC-part 1: modeling spatial water distribution under a sprinkler in windy conditions. **International Workshop**, Montpellier, p. 14-19, Sept. 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7749-2:** irrigation equipment: rotating sprinklers: part 2: uniformity of distribution and test methods. Switzerland, 1990. 6 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7749-1:** agricultural irrigation equipment: rotating sprinklers: part 1: design and operational requirements. Switzerland, 1995. 13 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8224-1:** traveller irrigation machines: part 1: operational characteristics and laboratory and field test methods. Switzerland, 2004. 36 p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York: AnaviBook, 1990. 652 p.

LOUIE, M. J.; SELKER, J. S. Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 126, n. 3, p. 142-148, 2000.

MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Autopropelido. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. p. 179-207.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. 2.ed. Logan: Utah state University, 1978. 271 p.

MOLLE, B.; GAT, Y. L. Model of water applications under pivot sprinkler: II calibration and results. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 126, n. 6, p. 348-354, Nov./Dec. 2000.

MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; CARRIÓN, P. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation: part II: calibration and validation of the model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p. 85-98, May 2001.

NEWELL, G. **Traveling gun simulation model TRAVGUN: user's manual and technical documentation**. Toowoomba: National Centre for Engineering in Agriculture, 2003. 89 p.

PENAFORTE, A. B. **Análise da performance de um sistema de irrigação por aspersão convencional, acima e abaixo do solo**. 1992. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PEREIRA, G. M. **Simulação das perdas de água por evaporação e da uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão**. 1995. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

PRADO, G. **Aplicativo computacional para simulação da distribuição de água pelo aspersor PLONA - RL300 em sistemas autopropelidos de irrigação**. 2004. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Caracterização do aspersor PLONA – RL300. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 53-63, jan./abr. 2005.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Análise da uniformidade de aplicação de água pelo aspersor PLONA-RL250 em sistemas autopropelidos de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 2, p. 249-262, abr./jun. 2007.

PRADO, G.; ULLMANN, M. N.; VILELA, L. A. A.; CARVALHO, H. P. Características hidráulicas de um conjunto de turbina e mangueira de irrigação de um equipamento autopropelido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2003.

RICHARDS, P. J.; WEATHERHEAD, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 54, p. 281-291, 1993.

ROCHA, A. F. **Desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido em condições de campo**. 2000. 80 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

ROLLAND, L. **Mechanized sprinkler irrigation**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1982. 409 p. (Irrigation and Drainage Paper, 35).

SHULL, H.; DYLLA, A. S. Wind effects on water application patterns from a large, single nozzle sprinkler. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 19, n. 3, p. 501-504, Jan. 1976.

SMITH, R. J.; GILLIES, M. H.; NEWELL, G.; FOLEY, J. P. A decision support model for travelling gun irrigation machines. **Biosystems Engineering**, 2008. No prelo.

SOLOMOM, K.; BEZDEK, J. C. Characterizing sprinkler distribution patterns with a clustering algorithm. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 23, n. 4, p. 899-906, July/Aug. 1980.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología**. 3. ed. Madrid: Mundi, 2005. 581 p.

TARJUELO, J. M.; GÓMEZ, M. V.; PARDO, J. L. Working conditions of sprinkler to optimize application of water. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 118, n. 6, p. 895-913, Nov./Dec. 1992.

TOU, J. T.; GONZALES, R. C. **Pattern recognition principles**. London: A. Wesley, 1974. 377 p.

VILLAS-BOAS, M. A.; BACK, J. F.; SANTOS, R. F.; SILVA, A. M.; OLIVEIRA, M. S. Comparação entre métodos de amostragem “indoors” para avaliação da distribuição espacial de água de aspersores rotativos. **Irriga**, Botucatu, v. 5, n. 2, p. 99-111, 2000.

VORIES, E. D.; BERNUTH, R. D. Single nozzle sprinkler performance in wind. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 29, n. 5, p. 1325-1330, 1986.

YANAGI JÚNIOR, T. **Dimensionamento e predição de água em sistemas de irrigação por aspersores autopropelidos**. 1995. 79 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

ZAGGO, S. P.; COLOMBO, A.; GIL, O. F.; SCALOPPI, E. J. Simulação de desempenho de sistema de irrigação com aspersor autopropelido. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1998, Florianópolis. **Anais...** Sorocaba: Centro Nacional de Engenharia Agrícola; Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1998. p. 283-308.

ANEXO A

	Página
TABELA 1A Valores de raio de alcance, vazão e perfil típico, em função das combinações entre pressão de serviço e diâmetro dos bocais, para o aspersor PLONA-RL250.....	67
TABELA 2A Variação da velocidade e direção do vento para os 53 ensaios de campo realizados, sob diferentes combinações entre pressão de serviço e diâmetro dos bocais do aspersor PLONA-RL250.....	69
TABELA 3A Fração da intensidade média de aplicação de água (ia_j) em função da fração do raio de alcance (ra_j) para os quatro perfis típicos do aspersor PLONA-RL250.....	71
TABELA 4A Distâncias relativas entre o aspersor e a extremidade da área molhada tomada nas direções a favor (RD - downwind), contra (RU - upwind) e perpendicular (RC - crosswind) à direção do vento.	72

TABELA 1A Valores de raio de alcance, vazão e perfil típico, em função das combinações entre pressão de serviço e diâmetro dos bocais, para o aspersor PLONA-RL250.

Pressão	Bocal	Bocal Principal											
		14 mm			16 mm			18 mm			20 mm		
Serviço	Auxiliar	R	Q	Perfil	R	Q	Perfil	R	Q	Perfil	R	Q	Perfil
(kPa)	(mm)	(m)	(m ³ .h ⁻¹)		(m)	(m ³ .h ⁻¹)		(m)	(m ³ .h ⁻¹)		(m)	(m ³ .h ⁻¹)	
294	0	30,28	12,19	III	32,27	15,88	I	32,90	20,53	I	34,25	25,37	I
	5	29,97	13,72	III	31,95	17,40	I	32,56	22,03	I	33,98	26,91	I
	6	30,04	14,32	III	32,12	18,06	I	32,52	22,56	I	33,88	27,41	I
	7	29,89	15,19	III	31,85	18,86	I	32,35	23,42	I	33,82	28,33	I
392	0	34,14	14,08	III	36,93	18,34	I	38,55	23,71	I	40,99	29,29	I
	5	33,79	15,84	III	36,58	20,09	II	38,18	25,43	II	40,71	31,07	I
	6	33,87	16,53	III	36,77	20,85	II	38,14	26,05	II	40,60	31,64	I
	7	33,70	17,54	III	36,47	21,77	II	37,95	27,04	II	40,54	32,71	I
490	0	37,25	15,74	III	40,65	20,51	II	43,11	26,51	II	46,02	32,75	I
	5	36,91	17,71	IV	40,31	22,46	II	42,74	28,43	II	45,78	34,73	II
	6	36,99	18,48	IV	40,50	23,32	II	42,70	29,13	II	45,68	35,38	II
	7	36,82	19,61	IV	40,20	24,34	II	42,51	30,23	II	45,62	36,57	II
588	0	39,63	17,25	III	43,43	22,46	II	46,56	29,04	II	49,36	35,87	I
	5	39,33	19,40	IV	43,14	24,61	II	46,24	31,15	II	49,18	38,05	II
	6	39,39	20,25	IV	43,30	25,54	II	46,20	31,91	II	49,11	38,76	II
	7	39,25	21,48	IV	43,04	26,67	II	46,04	33,12	II	49,07	40,06	II
686	0	41,27	18,63	IV	45,27	9,00	II	48,91	6,00	II	51,00	38,75	II
	5	41,04	20,96	IV	45,06	9,00	II	48,67	33,64	II	50,93	41,10	II
	6	41,09	21,87	IV	45,18	11,00	II	48,65	34,46	II	50,90	41,86	II
	7	40,98	16,00	IV	44,99	11,00	II	48,52	35,77	II	50,88	43,27	II

...continua...

TABELA 1A, Cont.

Pressão Serviço	Bocal Auxiliar	Bocal Principal											
		22 mm			24 mm			26 mm			28 mm		
(kPa)	(mm)	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil
294	0	35,40	30,80	I	36,73	36,43	I	35,86	41,75	I	36,28	48,06	I
	5	35,01	32,23	I	36,41	37,79	I	35,50	43,11	I	35,92	49,41	I
	6	35,00	32,78	I	36,41	38,35	I	35,40	43,58	I	35,78	49,83	I
	7	34,84	33,63	I	36,33	39,24	I	35,19	44,34	I	35,31	50,32	I
392	0	42,35	35,57	I	42,69	42,06	I	42,97	48,21	I	44,13	55,50	I
	5	41,93	37,21	I	42,30	43,64	I	42,56	49,78	I	43,72	57,06	I
	6	41,92	37,85	I	42,31	44,29	I	42,45	50,32	I	43,55	57,53	I
	7	41,74	38,83	I	42,21	45,31	I	42,21	51,20	I	43,02	58,10	I
490	0	48,01	39,77	I	47,97	47,03	I	48,96	53,90	I	50,83	62,05	I
	5	47,59	41,60	II	47,55	48,79	I	48,53	55,66	I	50,40	63,79	II
	6	47,58	42,32	II	47,55	49,52	I	48,42	56,26	I	50,22	64,33	II
	7	47,40	43,41	II	47,45	50,66	I	48,17	57,24	I	49,65	64,96	II
588	0	52,37	43,56	I	52,57	51,51	I	53,84	59,05	I	56,36	67,97	II
	5	51,99	45,57	II	52,13	53,45	II	53,43	60,97	I	55,94	69,88	II
	6	51,98	46,36	II	52,13	54,24	II	53,32	61,63	I	55,77	70,47	II
	7	51,82	47,55	II	52,03	55,49	II	53,08	62,70	I	55,21	71,16	II
686	0	55,43	47,06	II	56,50	55,64	II	57,59	63,78	I	60,74	73,42	II
	5	55,14	49,23	II	56,06	57,73	II	57,23	65,85	II	60,36	75,48	II
	6	55,13	50,07	II	56,06	58,59	II	57,14	66,57	II	60,20	76,11	II
	7	55,00	51,36	II	55,96	59,94	II	56,92	67,73	II	59,69	76,86	II

TABELA 2A Variação da velocidade e direção do vento para os 53 ensaios de campo realizados, sob diferentes combinações entre pressão de serviço e diâmetro dos bocais do aspersor PLONA-RL250.

Nº do ensaio	Bocal	Pressão	Velocidade do vento	Desvio Padrão	Direção do vento	Desvio Padrão
	(mm)	(kPa)	(m.s-1)	(Velocidade)	(graus)	(Direção)
1	14x0	392	1,77	0,90	354,4	98,48
2	14x0	392	4,13	0,50	114,4	22,76
3	14x5	392	1,71	0,95	155,9	48,39
4	14x5	392	4,11	0,46	137,6	11,57
5	14x6	392	1,76	0,44	234,4	29,36
6	14x6	392	0,97	0,50	138,6	66,51
7	14x6	392	0,96	0,42	146,3	31,85
8	14x7	392	2,96	0,81	155,8	24,88
9	14x7	392	4,96	0,90	137,4	17,00
10	14x0	490	4,00	0,65	120,7	14,14
11	14x0	490	1,15	0,63	177,5	30,79
12	14x5	490	3,92	0,71	122,9	9,58
13	14x5	490	1,63	0,79	168,6	27,74
14	14x7	490	4,72	0,68	124,0	14,11
15	14x7	490	3,45	0,97	145,0	14,71
16	16x0	392	1,58	0,62	321,5	23,29
17	16x0	392	2,24	0,67	326,4	37,77
18	16x5	392	1,82	0,66	284,6	56,93
19	16x5	392	1,39	0,68	255,7	76,00
20	16x5	392	1,05	0,47	300,0	65,30
21	16x6	392	2,79	0,23	2,4	17,04
22	16x6	392	2,61	0,78	344,6	23,40
23	16x7	392	2,95	0,55	66,6	13,91
24	16x0	490	0,99	0,52	321,5	36,08
25	16x0	490	1,90	0,35	170,6	30,59
26	16x0	490	2,25	1,01	353,2	71,14
27	16x5	490	1,56	0,80	330,0	24,7
28	16x5	490	1,72	0,74	314,6	15,19
29	16x6	490	1,83	0,98	28,1	10,33
30	16x7	490	2,84	0,86	4,3	20,57
31	16x7	490	3,13	0,94	12,6	17,30
32	18x0	392	2,03	0,98	340,5	21,09

..continua...

TABELA 2A, Cont.

Nº do ensaio	Bocal	Pressão	Velocidade do vento	Desvio Padrão	Direção do vento	Desvio Padrão
	(mm)	(kPa)	(m.s-1)	(Velocidade)	(graus)	(Direção)
33	18x5	392	2,27	0,97	98,9	37,13
34	18x6	392	2,54	0,72	61,9	13,50
35	18x6	392	2,01	0,59	6,7	27,69
36	18x6	392	3,57	0,64	55,5	9,76
37	18x7	392	5,32	0,74	4,3	11,39
38	18x7	392	4,74	0,68	127,8	7,77
39	18x0	490	1,17	0,78	328,5	28,71
40	18x0	490	2,39	0,71	33,9	32,61
41	18x5	490	2,48	0,74	62,3	19,37
42	18x5	490	4,13	0,67	107,3	23,36
43	18x6	490	1,34	1,16	357,7	37,77
44	18x6	490	3,39	0,44	94,6	16,92
45	18x7	490	4,64	0,69	2,5	11,90
46	18x7	490	5,83	0,51	114,4	8,83
47	20x6	392	2,43	0,55	348,8	21,60
48	20x6	392	1,73	0,48	91,1	17,18
49	20x6	392	1,00	0,63	167,0	13,29
50	20x6	490	2,71	0,32	24,0	16,04
51	20x6	490	2,04	0,52	63,9	22,25
52	22x6	490	2,87	0,49	347,4	13,97
53	22x6	490	2,74	0,63	25,4	6,90

TABELA 3A Fração da intensidade média de aplicação de água (ia_j) em função da fração do raio de alcance (ra_j) para os quatro perfis típicos do aspersor PLONA-RL250.

Fração do raio de alcance (-)	Fração da intensidade média (-)			
	Perfil I	Perfil II	Perfil III	Perfil IV
0.025	0,323	0,581	1,024	1,230
0.075	0,746	1,008	2,697	2,031
0.125	0,470	0,769	0,927	1,070
0.175	0,504	0,881	0,869	1,191
0.225	0,625	1,039	0,991	1,305
0.275	0,750	1,175	1,092	1,513
0.325	0,825	1,205	1,103	1,512
0.375	0,865	1,156	1,133	1,553
0.425	0,896	1,117	1,168	1,600
0.475	0,915	1,103	1,234	1,505
0.525	0,907	1,065	1,262	1,321
0.575	0,916	1,045	1,178	1,132
0.625	0,940	1,056	1,062	1,007
0.675	1,004	1,101	0,977	0,980
0.725	1,077	1,136	1,030	0,955
0.775	1,148	1,162	1,081	0,928
0.825	1,258	1,167	1,128	0,889
0.875	1,428	1,151	1,096	0,827
0.925	1,538	0,877	0,859	0,653
0,975	0,425	0,228	0,254	0,210

TABELA 4A Distâncias relativas entre o aspersor e a extremidade da área molhada tomada nas direções a favor (RD - downwind), contra (RU - upwind) e perpendicular (RC - crosswind) à direção do vento.

Ensaio	Bocal (mm)	Pressão (kPa)	Velocidade		Distâncias				
			Vento	Direção	RD/R	RU/R	RCD/R	RCE/R	RC/R
			(m.s ⁻¹)	(graus)	%	%	%	%	%
1	14 x 0	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	14 x 0	392	1,77	354,4	100,51	93,91	93,91	90,62	92,27
3	14 x 0	392	4,13	114,4	97,21	72,50	67,55	79,09	73,32
4	14 x 5	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
5	14 x 5	392	4,11	137,6	111,53	63,26	61,59	68,25	64,92
6	14 x 5	392	1,71	155,9	106,54	93,22	98,22	103,21	100,71
7	14 x 6	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
8	14 x 6	392	1,76	234,4	101,31	91,34	76,40	86,36	81,38
9	14 x 6	392	0,97	138,6	106,29	99,65	97,98	101,31	99,65
10	14 x 6	392	0,96	146,3	113,52	99,96	99,96	101,66	100,81
11	14 x 7	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12	14 x 7	392	4,96	137,4	106,82	68,43	60,09	73,44	66,77
13	14 x 7	392	2,96	155,8	106,82	68,43	83,46	68,43	75,95
14	14 x 0	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
15	14 x 0	490	4,00	120,7	105,70	66,44	64,93	63,42	64,18
16	14 x 0	490	1,15	177,5	104,19	87,58	87,58	87,58	87,58
17	14 x 5	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
18	14 x 5	490	3,92	122,9	109,73	68,58	65,53	65,53	65,53
19	14 x 5	490	1,63	168,6	106,68	89,91	80,77	86,87	83,82
20	14 x 7	490	0,00	-	100,00	100	100,00	100,00	100,00
21	14 x 7	490	4,72	124,0	106,94	58,05	64,16	65,69	64,93
22	14 x 7	490	3,45	145,0	106,94	79,44	68,75	68,75	68,75
23	16 x 0	392	0	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
24	16 x 0	392	1,58	321,5	112,80	91,46	91,46	89,94	90,70
25	16 x 0	392	2,24	326,4	100,61	89,94	89,94	89,94	89,94
26	16 x 5	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
27	16 x 5	392	1,82	284,6	104,57	92,26	93,80	92,26	93,03
28	16 x 5	392	1,39	255,7	99,95	92,26	93,80	92,26	93,03
29	16 x 5	392	1,05	300,0	104,57	98,41	103,03	99,95	101,49
30	16 x 6	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
31	16 x 6	392	2,79	2,40	97,91	87,20	71,90	79,55	75,72

...Continua...

TABELA 4A, Cont.

Ensaio	Bocal (mm)	Pressão (kPa)	Velocidade		Direção					Distâncias				
			Vento (m.s ⁻¹)	Vento (graus)	RD/R	RU/R	RCD/R	RCE/R	RC/R	RD/R	RU/R	RCD/R	RCE/R	RC/R
					%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
32	16 x 6	392	2,61	344,6	107,08	90,26	85,67	91,79	88,73					
34	16 x 7	392	2,95	66,6	98,71	78,66	78,66	78,66	78,66					
35	16 x 0	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
36	16 x 0	490	0,99	321,5	106,55	94,10	91,33	87,18	89,25					
37	16 x 0	490	1,90	170,6	105,17	96,86	85,79	81,64	83,72					
38	16 x 0	490	2,25	353,2	96,86	92,71	81,64	85,79	83,72					
39	16 x 5	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
40	16 x 5	490	1,56	330,0	106,05	94,89	93,49	94,89	94,19					
41	16 x 5	490	1,72	314,6	106,05	93,49	93,49	87,91	90,70					
42	16 x 6	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
43	16 x 6	490	1,83	28,1	105,56	88,89	87,50	87,50	87,50					
44	16 x 7	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
45	16 x 7	490	2,84	4,3	102,15	74,16	79,76	75,56	77,66					
46	16 x 7	490	3,13	12,6	103,54	74,16	81,16	68,56	74,86					
47	18 x 0	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
48	18 x 0	392	2,03	340,5	106,52	90,47	90,47	87,55	89,01					
49	18 x 5	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
50	18 x 5	392	2,27	98,9	103,13	98,71	88,40	98,71	93,55					
51	18 x 6	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
52	18 x 6	392	3,57	55,5	119,46	87,01	81,12	60,47	70,79					
53	18 x 6	392	2,54	61,9	107,66	92,91	92,91	85,54	89,23					
54	18 x 6	392	2,01	6,7	101,76	97,34	98,81	100,29	99,55					
55	18 x 7	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
56	18 x 7	392	5,32	4,3	105,24	83,00	71,15	69,66	70,41					
57	18 x 7	392	4,74	127,8	106,72	68,18	65,22	69,66	67,44					
58	18 x 0	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
59	18 x 0	490	1,17	328,5	104,38	95,25	91,34	91,34	91,34					
60	18 x 0	490	2,39	33,9	104,38	80,90	79,59	79,59	79,59					
61	18 x 5	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
62	18 x 5	490	4,13	107,3	103,97	65,80	77,65	68,44	73,04					
63	18 x 5	490	2,48	62,3	102,66	84,23	78,97	82,91	80,94					
64	18 x 6	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
65	18 x 6	490	1,34	357,7	101,43	94,85	90,90	102,75	96,82					
66	18 x 6	490	3,39	94,6	100,12	76,41	81,67	72,45	77,06					

...Continua...

TABELA 4A, Cont.

Ensaio	Bocal	Pressão	Velocidade		Distâncias				
			Vento	Direção	RD/R	RU/R	RCD/R	RCE/R	RC/R
	(mm)	(kPa)	(m.s ⁻¹)	(graus)	%	%	%	%	%
67	18 x 7	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
68	18 x 7	490	4,64	2,5	105,86	75,42	54,25	54,25	54,25
69	18 x 7	490	5,83	114,4	103,21	64,84	54,25	64,84	59,54
69	18 x 7	490	5,83	114,4	103,21	64,84	54,25	64,84	59,54
70	20 x 6	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
71	20 x 6	392	2,43	348,8	116,38	95,60	95,60	84,51	90,06
72	20 x 6	392	1,73	91,1	112,22	96,98	94,21	92,83	93,52
73	20 x 6	392	1,00	167,0	99,75	101,14	99,75	99,75	99,75
74	20 x 6	490	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
75	20 x 6	490	2,71	24,0	109,59	94,82	81,27	88,66	84,97
76	20 x 6	490	2,04	63,9	110,83	94,82	83,73	98,51	91,12
77	22 x 6	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
78	22 x 6	392	2,87	347,4	111,37	95,27	92,59	87,22	89,90
79	22 x 6	392	2,74	25,4	108,69	104,66	91,25	93,93	92,59