

**SIMULAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE
APLICAÇÃO DE ÁGUA EM SISTEMAS
CONVENCIONAIS DE IRRIGAÇÃO
OPERANDO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
DE VENTO**

LESSANDRO COLL FARIA

2008

LESSANDRO COLL FARIA

**SIMULAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA EM
SISTEMAS CONVENCIONAIS DE IRRIGAÇÃO OPERANDO 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 em Engenharia de Água e Solo, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Dr. Alberto Colombo (Orientador)

Dr. Geraldo Magela Pereira (Co-orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS-BRASIL
2008

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

Coll Faria, Lessandro.

Simulação da uniformidade de aplicação de água em sistemas
convencionais de irrigação operando sob diferentes condições de vento /
Lessandro Coll Faria. -- Lavras : UFLA, 2008.

76 p. : il.

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

Orientador: Alberto Colombo.

Co-orientador: Geraldo Magela Pereira.

Bibliografia.

1. Modelagem. 2. Uniformidade. 3. Vento. I. Universidade Federal de
Lavras. II. Título.

CDD - 631.587

LESSANDRO COLL FARIA

**SIMULAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA EM
SISTEMAS CONVENCIONAIS DE IRRIGAÇÃO OPERANDO 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 em Engenharia de Água e Solo, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 04 de março de 2008.

Dr. Gilberto Coelho (UFLA)

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho (UFLA)

Dra. Myriane Stella Scalco (UFLA)

Prof. Dr. Alberto Colombo
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

Aos meus pais, Alípio Pereira Faria e Lucimeri Coll Faria, pelo incentivo,
educação e ensinamentos recebidos.

Aos meus irmãos, Leandro Coll Faria, Leonardo de Freitas Coll e Mateus de
Castro Veiga, pelo carinho e amizade.

OFEREÇO E 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 valiosa orientação na realização deste trabalho.

Ao Professor Geraldo Magela Pereira, pela co-orientação na realização deste trabalho.

Aos Professores Gilberto Coelho, Jacinto de Assunção Carvalho e Myriane Stella Scalco, membros da banca examinadora, pelas sugestões e observações.

Aos professores do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, pelos ensinamentos recebidos.

À Professora Rita de Cássia Fraga Damé pelo profissionalismo e incentivo, e aos demais professores da Universidade Federal de Pelotas que contribuíram para minha formação profissional.

Ao amigo Giuliani do Prado, por disponibilizar os ensaios de campo, pela valiosa contribuição na realização deste trabalho, pela amizade e convivência durante a realização do curso.

Ao amigo Henrique Fonseca Elias de Oliveira, pela valiosa contribuição na realização deste trabalho, pela amizade e convivência em todos os momentos.

Aos amigos Bruno Leite Teixeira Perroni e Luciano Geisenhoff, pela amizade e convivência em todos os momentos.

Aos colegas de curso Anselmo Custódio, Carolina Bilibio, Eder Pedroza Isquierdo, Fabiano Alvarenga Rezende, Léo Ávila, Marcelo Viola, Marcos Vinícius Mendes dos Santos, Joaquim Alves Júnior e demais colegas, pela amizade e companheirismo.

Aos funcionários “Nenê” e José Luís, do Laboratório de Hidráulica da UFLA; à secretária Daniela do Departamento de Engenharia da UFLA, pelos serviços prestados.

Ao amigo Samuel Beskow e sua família, pela amizade durante minha passagem por Lavras - MG.

Aos amigos Charles Moreira, Moisés Santiago Ribeiro e Rondon Neto, pela amizade e convivência harmoniosa durante minha passagem por Lavras - MG.

A todos meus familiares e amigos, que mesmo a distância, de alguma forma contribuíram para concretização deste projeto.

A Deus, por sempre me acompanhar.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Sistemas convencionais de irrigação por aspersão.....	3
2.2 Uniformidade de distribuição de água.....	4
2.3 Modelagem da uniformidade de sistemas convencionais	6
2.3.1 Distribuição espacial na ausência de vento	7
2.3.2 Distribuição espacial na presença de vento.....	9
2.4 Fatores que afetam a uniformidade	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Distribuição de água do aspersor PLONA-RL250.....	18
3.1.1 Distribuição de água na ausência de vento.....	18
3.1.2 Distribuição de água em condições de vento	19
3.2 Análise de agrupamento das combinações de bocal versus pressão	20
3.3 Determinações experimentais das dimensões da área molhada distorcida pelo vento	21
3.4 Ajuste dos parâmetros empíricos	23
3.4.1 Ajuste através das dimensões da área molhada distorcida pelo vento	23
3.4.2 Ajuste através da distribuição de água em condições de vento.....	26
3.5 Avaliação da modelagem da uniformidade de aplicação de água.....	30
3.6 Espaçamento e disposição do aspersor PLONA-RL250.....	30

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Perfis típicos de distribuição de água	33
4.2 Determinação dos parâmetros empíricos	36
4.2.1 Estimativas por meio das dimensões da área molhada.....	36
4.2.2 Estimativas através dos mínimos quadrados	40
4.3 Avaliação do modelo ajustado	43
4.3.1 Análise do comportamento do modelo.....	43
4.3.2 Análise da uniformidade de aplicação de água em sistemas convencionais de irrigação	44
4.4 Espaçamento e disposição do aspersor PLONA-RL250	48
4.4.1 Aspersores dispostos em arranjos quadrados	48
4.4.2 Aspersores dispostos em arranjos retangulares	50
4.4.3 Aspersores dispostos em arranjos triangulares.....	57
4.5 Recomendações de uso do aspersor PLONA-RL250 em sistemas convencionais de irrigação	61
5 CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
ANEXOS	68

RESUMO

COLL FARIA, Lessandro. **Simulação da uniformidade de aplicação de água em sistemas convencionais de irrigação operando sob diferentes condições de vento.** 2008. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

A uniformidade de aplicação de água é um importante fator a ser considerado na avaliação dos sistemas de irrigação. A uniformidade em sistemas convencionais de aspersão depende de fatores como: o tipo de aspersor e suas condições operacionais, a disposição e o espaçamento entre aspersores e da velocidade e direção do vento. O modelo semi-empírico de Richards & Weatherhead (1993) foi utilizado neste estudo para prever a aplicação espacial de água do canhão PLONA-RL250 operando sob diferentes condições de vento. Os parâmetros empíricos ajustados indicaram que, para cada aumento de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ na velocidade do vento o raio de alcance do aspersor sofre: uma redução de 7,25%, na direção contrária ao vento; uma redução de 6,28% na direção perpendicular ao vento e um aumento de 1,34% em relação ao raio sem vento na direção do vento. Valores de uniformidade de Christiansen (CUC), obtidos com dados de ensaios de campo realizados com o aspersor PLONA-RL250 operando sob diferentes condições de vento, foram comparados com valores obtidos com dados simulados, mostrando uma boa correlação ($r^2=0,75$ e um desvio absoluto médio de 4,75%). Várias simulações foram testadas a fim de identificar as configurações que atingissem valores adequados de uniformidade de aplicação de água. As simulações foram agrupadas, de acordo com os quatro perfis adimensionais de distribuição de água (I, II, III e IV), que foram identificados pelo algoritmo de agrupamento “K-Means” para representar as 160 combinações de bocais e pressão de serviço do aspersor RL250. Os resultados demonstram que: (i) a direção do vento exerce pouca influência sobre os valores de CUC; (ii) maiores velocidades de vento reduzem a uniformidade de aplicação de água, sendo necessário, para manter níveis aceitáveis de CUC, reduzir o espaçamento entre aspersores no campo; (iii) em termos de valores de CUC obtidos sob condições de vento, a superioridade da disposição triangular, em relação a disposição retangular, só foi observada nas combinações de espaçamento que apresentavam um espaçamento entre aspersores na linha lateral (Sl) maior que o espaçamento entre linhas laterais ao longo da linha principal (Sp).

¹Comitê Orientador: Alberto Colombo – UFLA (Orientador); Geraldo Magela Pereira – UFLA (Co-orientador).

ABSTRACT

COLL FARIA, Lessandro. **Simulation of water application uniformity with solid set sprinkler irrigation systems operating under different wind conditions**. 2008. 76 p. Dissertation (Master of Science in Agricultural Engineering/Engineering of water and soil) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil².

Water application uniformity is a main factor to be considered in performing irrigation system evaluations. Uniformity of solid-set sprinkler systems depends on several factors such as: sprinkler type and working conditions, sprinkler disposition and grid spacing, and wind velocity and direction. The semi-empirical model developed by Richards & Weatherhead was applied in predicting the distortion by wind of PLONA_RL250 sprinkler water application patterns. Model's empirical parameters were adjusted showing that, for each 1.0 m.s^{-1} increase in wind velocity, there is a 7.25% up-wind range reduction, a 6.28% cross-wind range reduction and a 1.34% down-wind range increase in relation to the zero-wind sprinkler radius of throw. Christiansen uniformity coefficient (CUC) values, computed based on PLONA-RL250 catch can field tests, held under different wind conditions, were compared with CUC values computed based on simulations showing a good correlation ($r^2 = 0.75$ and a 4.75% average absolute deviation). Several simulations were run aiming identifying sprinkler configurations that result on near optimum uniformity values. Simulations were grouped in to four typical water application profiles (I, II, III and IV), that were identified by the “K- means” clustering algorithm, after analyzing the 160 possible combinations of working pressure and nozzle size of the RL250 sprinkler. Results indicated that: (i) wind direction has little effect over CUC values; (ii) increased wind velocities reduce CUC values and, consequently, in order to keep acceptable CUC values, it is necessary to decrease sprinkler grid spacing; (iii) in term of CUC values achieved under windy conditions, the better performance of triangular dispositions, in relation to rectangular dispositions, was only achieved under triangular dispositions presenting a sprinkler spacing on the lateral line (Sl) that is greater than the spacing between lateral lines along the main line (Sp).

²Guidance Committee: Alberto Colombo – UFLA (Major Professor) e Geraldo Magela Pereira – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

É notório o aumento nas preocupações da sociedade em se tratando de água, pois este bem natural é cada vez mais escasso. A sábia utilização dos usos dos recursos hídricos é um desafio para pesquisadores e irrigantes que buscam otimização da produtividade e da qualidade de produtos agrícolas, com um consumo reduzido de água e energia.

Os sistemas de irrigação devem aplicar água de maneira mais uniforme possível, porque, sob níveis adequados de manejo da irrigação, a desuniformidade na aplicação de água causa redução na produtividade das culturas irrigadas e desperdício de água, energia e fertilizantes, fatores estes que estão associados a um menor retorno econômico e um maior impacto ambiental da irrigação.

Os sistemas de irrigação por aspersão são muito difundidos no Brasil e sua uniformidade de aplicação de água é muito afetada pelo vento. Outros fatores, tais como o modelo do aspersor, condições operacionais do aspersor (pressão, bocais, altura de instalação e uniformidade de rotação), disposição no campo e a própria uniformidade das condições de operação e instalação dos aspersores afetam a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação por aspersão.

Estudos de campo para avaliação dos efeitos do vento sobre a uniformidade dos sistemas de aspersão são raros e difíceis de conduzir, porque nem sempre as condições naturais do vento (direção e velocidade) permitem a análise de diferentes combinações de incidência e velocidade do vento, ou mesmo, a análise de diferentes disposições dos equipamentos sob condições idênticas de vento.

Modelos matemáticos de simulação da distribuição de água de aspersores, apesar de requererem laboriosos trabalhos de calibração e validação

e exigirem elevada capacidade de processamento de cálculo, são ferramentas úteis para estudos do efeito do vento, porque eliminam muitas das limitações dos estudos de campo, principalmente no que se refere à possibilidade de comparações sob condições idênticas de vento.

Este estudo foi desenvolvido tendo em vista que a ocorrência do vento é uma verdade que exige, de pesquisadores e irrigantes, a análise de procedimentos para minimizar os efeitos danosos do mesmo sobre a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação por aspersão, permitindo uma melhor maneira de conviver com tal problema.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivos:

(i) ajustar os parâmetros empíricos do modelo de Richards & Weatherhead (1993), requeridos para simulação da distribuição de água do aspersor PLONA-RL250 operando sob condições de vento;

(ii) avaliar a capacidade do modelo ajustado em prever a uniformidade de aplicação de água do aspersor PLONA-RL250 operando em condições de vento em sistemas convencionais de irrigação por aspersão;

(iii) avaliar a eficácia de diversos procedimentos (seleção de condições operacionais, espaçamentos entre aspersores, disposições entre aspersores e ângulos de incidência do vento em relação às linhas laterais) na redução dos efeitos danosos do vento sobre a uniformidade de aplicação de água do aspersor canhão PLONA-RL250 em sistemas convencionais de irrigação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas convencionais de irrigação por aspersão

Tarjuelo (2005) descreve que, no método de irrigação por aspersão, a água é aplicada em forma de chuva mais ou menos intensa e uniforme sobre a parcela que se deseja irrigar, de maneira a infiltrar totalmente sobre o ponto aonde ela cai. O processo de aplicação de água consiste em um jato de água a alta velocidade que se dissipa no ar em forma de gotas, distribuindo-se sobre a superfície do terreno.

Existem diferentes tipos de sistemas de irrigação por aspersão, cada qual apresentando suas vantagens e desvantagens. De acordo com Pereira (2003), os sistemas por aspersão podem ser classificados em dois grandes grupos, convencionais e mecanizados; sendo os sistemas convencionais classificados em portátil (ou móvel), semi-portátil e fixo.

O sistema de aspersão convencional por canhão hidráulico é, segundo Pereira (2003), um sistema portátil composto de uma ou mais linhas laterais, com apenas um aspersor tipo canhão hidráulico por linha lateral. Terminada a irrigação numa posição, o canhão hidráulico é removido para a posição seguinte, na mesma linha lateral até irrigar toda área. Neste sistema o aspersor é montado sobre engate rápido facilitando sua montagem e desmontagem, sendo muito utilizado para irrigar pastagens, capineiras, pomares e cana-de-açúcar.

Vários tipos de aspersores estão disponíveis no mercado e podem, segundo Bernardo et al. (2006), ser classificados conforme a pressão de serviço. Os aspersores tipo canhão hidráulico podem ser de médio ou longo alcance, com pressão de serviço variando de 392 kPa a 979 kPa, e raio de alcance de até 80 m. Estes aspersores apresentam elevada intensidade de precipitação e, embora

permitam boa distribuição de água, são muito influenciados pelo vento. De acordo com Tarjuelo (2005), os canhões hidráulicos podem irrigar grandes áreas em uma única posição e, além disso, apresentam baixo custo por hectare irrigado e pouca necessidade de mão-de-obra.

2.2 Uniformidade de distribuição de água

Na medida em que a proteção ambiental é enfatizada e a conservação de água é cada vez mais necessária, a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação ganha importância (Louie & Selker, 2000).

De acordo com Rocha et al. (1999), a avaliação de sistemas de irrigação logo após a implantação destes no campo é importante para verificar se o desempenho está de acordo com o estabelecido em projeto, possibilitando, quando necessário, a realização de ajustes para melhorar o seu desempenho. Além disso, avaliações periódicas asseguram a manutenção do bom desempenho dos sistemas de irrigação.

Existem diferentes coeficientes que são usados para expressar a variabilidade de distribuição da água aplicada por um sistema de irrigação por aspersão, destacando-se os coeficientes proposto por Christiansen (1942), Wilcox & Swailes (1947), Criddle et al. (1956) e Hart (1961).

O coeficiente desenvolvido por Christiansen (1942) é um dos índices mais utilizados para quantificar a uniformidade na distribuição de água dos sistemas de irrigação, e é calculado pela seguinte equação:

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

em que:

CUC é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);

X_i é a precipitação obtida do pluviômetro de ordem i (mm);

\bar{X} é a média geral das precipitações (mm);

n é o número de observações.

De acordo com Keller & Bliesner (1990), recomenda-se valores mínimos de CUC na faixa de 75% a 83%, para culturas de campo que apresentam sistema radicular profundo, e de no mínimo 85% para culturas de sistema radicular menos profundo como batata e hortaliças em geral. Estes autores recomendam ainda que, nas aplicações de produtos químicos a uniformidade não deve ser menor que 80%. No entanto, conforme demonstrado em diversos trabalhos (Hill & Keller, 1980; Bernuth, 1983; Chen & Wallender, 1984), valores ótimos de uniformidade dependem da análise de custos do sistema, da água e de energia, podendo ainda serem considerados os custos relativos ao impacto ambiental da irrigação (Ortega et al. 2004).

O coeficiente proposto por Wilcox & Swailes (1947) utiliza o desvio padrão (s) das precipitações, sendo calculado de acordo com:

$$CWS = \left[1 - \left(\frac{s}{\bar{X}} \right) \right] \cdot 100 \quad (2)$$

O coeficiente proposto por Criddle et al. (1956), CUD, considera a razão entre a média do menor quartil ($\bar{X}_{25\%}$) e a média das precipitações:

$$CUD = \left(\frac{\bar{X}_{25\%}}{\bar{X}} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

De acordo com Wilson & Zoldoske (1997), outro coeficiente que é muito usado na avaliação de sistemas de aspersão, principalmente os utilizados em jardins e gramados, é o Scheduling Coefficient (SC), que é computado de acordo com:

$$SC = \left(\frac{\bar{X}}{\bar{X}_{p\%}} \right) \quad (4)$$

em que: $\bar{X}_{p\%}$ é a média das menores precipitações do percentil ($p\%$).

Para o cálculo do SC, o valor de 5% das observações mais baixas é geralmente usado. Ao contrário dos demais índices, o valor numérico de SC cresce na medida em que a uniformidade diminui. Um valor unitário de SC corresponde a um sistema que aplica água de forma perfeitamente uniforme.

Dentre todos esses índices de uniformidade, o proposto por Christiansen (1942) é o que tem sido mais utilizado em trabalhos de pesquisa e, de acordo com Frizone & Dourado Neto (2003), apesar das críticas a este coeficiente, não existe um estudo que comprove a vantagem da utilização de outro. Além disto, cabe ressaltar que diversas normas internacionais e nacionais se referem a este coeficiente, a exemplo das normas ASAE S.398.1 (American Society Agricultural Engineers, 1998); ISO 7749-2 (International Organization Standardization, 1990) e NBR 8988 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985).

2.3 Modelagem da uniformidade de sistemas convencionais

A modelagem matemática da aplicação de água pelos aspersores, para simulação da uniformidade de distribuição de água dos diversos sistemas de

irrigação, vem sendo cada vez mais utilizada (Carrión et al., 2001). No caso dos sistemas convencionais de irrigação por aspersão, a uniformidade alcançada por uma dada disposição de aspersores é computada com base na sobreposição da distribuição espacial de água dos aspersores circunvizinhos. Este processo de sobreposição pode ser efetuado com a ajuda de diversos aplicativos computacionais disponíveis, tais como: o CATCH 3D, desenvolvido na Utah State University (Allen, 1992 e Merkley, 2004); o SPACE ProTM, desenvolvido por Oliphant (2003) no Center for Irrigation Technology (CIT), da California State University; o SORA (Solapamiento em Riego por Aspersión), desenvolvido na Universidad de Castilla-La Mancha, (Carrión et al., 2001); o WinSIPP, disponibilizado pela empresa Senninger (2007) e o NaanCat 9.5, disponibilizado pela empresa NaanDanJain (2007).

É importante salientar que todos esses aplicativos de modelagem da uniformidade de sistemas convencionais de irrigação requerem a caracterização da distribuição espacial de água dos aspersores operando isoladamente. Os diversos métodos utilizados na caracterização da distribuição espacial da água aplicada pelos aspersores, em diferentes condições de vento, são apresentados a seguir.

2.3.1 Distribuição espacial na ausência de vento

A caracterização da distribuição de água de um aspersor, operando isoladamente, na ausência de vento, deve ser realizada de acordo com procedimentos previstos em normas de ensaio ASAE, S.398.1 (ASAE, 1998); ISO 7749-2 (ISO, 1990) ou, NBR 8988 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985). Nas avaliações realizadas através do método completo de campo (método da malha), estas normas recomendam que o aspersor seja instalado na posição central de uma malha de coletores. No método radial, que

se aplica somente às determinações realizadas em condições de ausência de vento, os coletores devem ser instalados ao longo de uma linha reta, definida a partir do centro do aspersor a ser ensaiado.

Solomon & Bezdek (1980) desenvolveram um procedimento para estimar a curva de distribuição de água dos aspersores operando em condições de pressão intermediárias àquelas observadas nos ensaios de campo. Conforme indicado nas Equações 5 e 6, este processo exige que as curvas de aplicação radial de água, determinadas nos ensaios de campo, sejam adimensionalizadas, de forma a expressar as distâncias radiais (r_j em m) ao aspersor em termos da fração (ra_j) do raio de alcance (R em m) e os valores de intensidade de precipitação (i_j em $m \cdot h^{-1}$) em termos da fração (ia_j) da intensidade média de aplicação de água (im em $m \cdot h^{-1}$). Os valores assumidos pelos pares (r_j, i_j), em condições intermediárias de pressão, podem ser estimados a partir dos valores constantes dos pares adimensionais (ra_j, ia_j) e dos valores de vazão e raio de alcance do aspersor operando na condição de trabalho em que se deseja estimar a curva de aplicação de água.

$$ra_j = \frac{r_j}{R} \quad (5)$$

$$ia_j = \frac{i_j \cdot \pi \cdot R^2}{Q} = \frac{i_j}{im} \quad (6)$$

em que:

Q é a vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);

j é o índice de identificação de cada ponto de amostragem (coletor) em relação ao aspersor.

Além de permitir a estimativa do perfil radial de distribuição de água dos aspersores, operando em condições intermediárias àquelas observadas nos ensaios de distribuição, a adimensionalização dos perfis radiais permite que estes sejam submetidos à análise de agrupamento. A análise de agrupamento, conforme demonstram os trabalhos de Solomon & Bezdek (1980), Prado (2004), e Prado & Colombo (2005), permite identificar as combinações de diâmetro de bocal e pressões de serviço do aspersor que resultam em um mesmo perfil radial adimensional de aplicação de água. Desta forma, ao invés de se fazer a análise do comportamento do aspersor em função das centenas de combinações possíveis de pressão e diâmetro de bocais, pode-se analisar o comportamento do aspersor em função de um pequeno número de perfis adimensionais, cada um dos quais representando um determinado agrupamento de condições operacionais.

2.3.2 Distribuição espacial na presença de vento

Carrión et al. (2001) desenvolveram o modelo SIRIAS (Simulacion de Riego por Aspersión), baseado na teoria balística, com o intuito de simular a distribuição de água de um aspersor isolado sob condições de vento. Para calibração dos parâmetros deste modelo são necessários dados de distribuição radial de água do aspersor operando com e sem vento. Montero et al. (2001) obtiveram um erro absoluto médio de 2,7% ao compararem valores de uniformidade de aplicação de água, de aspersores operando em sistemas convencionais de irrigação, simulados pelo SIRIAS com valores obtidos em ensaios de campo.

Richards & Weatherhead (1993) desenvolveram um modelo semi-empírico no qual a distorção do padrão de distribuição de água de um aspersor, que ocorre em condições de vento, é resultante da ação de dois processos

distintos: deriva das gotas e interrupção do fluxo induzido de ar junto ao jato de água. Nesta modelagem, considera-se que a deriva das gotas e a interrupção do fluxo induzido de ar são proporcionais à velocidade do vento e que a evaporação, sendo suficientemente pequena, pode ser desprezada. Estes autores consideram a região molhada por um aspersor como sendo um corpo flexível tridimensional, que pode ser deformado pela ação do vento, mas mantém seu volume praticamente constante, em função da ocorrência de uma pequena perda de água por evaporação.

A primeira medida para aplicação do modelo de Richards & Weatherhead (1993) é a determinação da curva de distribuição radial de água do aspersor, em condições nulas de vento. O cálculo da distorção do padrão molhado causada pelo vento é realizado no sistema de eixos esquematizado na Figura 1, que tem o eixo X_v direcionado no sentido contrário ao vento e o eixo Y_v direcionado perpendicularmente a direção do vento. Neste sistema de coordenadas, o ponto de instalação do aspersor determina a localização da origem dos eixos ($x_v = 0, y_v = 0$).

De acordo com o esquema mostrado na Figura 1, no modelo proposto por Richards & Weatherhead (1993), a água que, na ausência de vento, teria um ponto de impacto no solo P_0 , localizado nas coordenadas (x_{v0}, y_{v0}) , passa a ter, em função da ação do vento, um outro ponto de impacto no solo P , localizado nas coordenadas (x_v, y_v) . As alterações nos valores das coordenadas do ponto de impacto da água são dadas pela Equações 7 e 8.

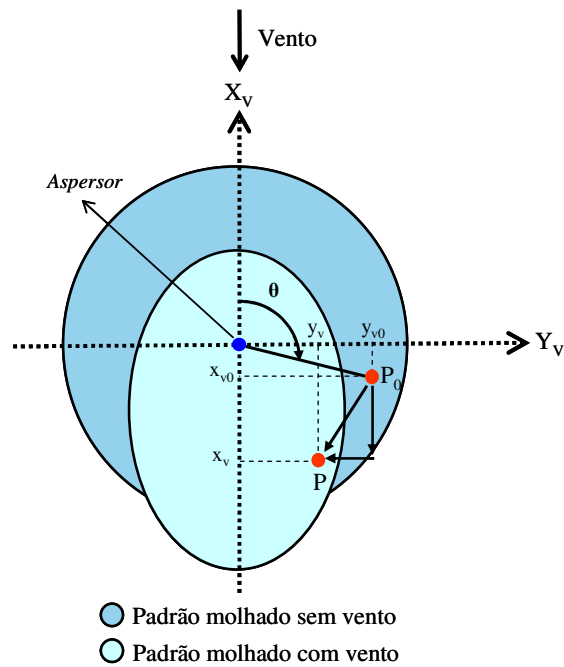


FIGURA 1. Esquema do deslocamento do ponto de impacto da água aplicada pelo aspersor devido à influência do vento.

$$x_v = x_{v0} - [A + B \cdot (r/R) + C \cdot (r/R)^2] \cdot V \dots - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot S \cdot \cos\theta \quad (7)$$

$$y_v = y_{v0} - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot S \cdot \sin\theta \quad (8)$$

em que:

x_v, y_v são as coordenadas do ponto de impacto da água em condições de vento;

x_{v0}, y_{v0} são as coordenadas de impacto da água em condições nulas de vento;

r é a distância radial ao aspersor em condição de ausência de vento (m), dado pela Equação 9;

R é o raio molhado do aspersor na ausência de vento (m);

A, B, C, D, E e F são constantes empíricas (m por $m \cdot s^{-1}$);

V é a velocidade do vento ($m \cdot s^{-1}$);

S é o seno do ângulo entre o vetor velocidade do vento e a direção do jato, que depende, no plano vertical, do ângulo (e em graus) de saída do jato de água do aspersor e, no plano horizontal, do ângulo (θ em graus) formado entre a direção de lançamento do jato e a linha da direção do vento, conforme dado pela Equação 10.

$$r = \sqrt{(x_{v0})^2 + (y_{v0})^2} \quad (9)$$

$$S = \sqrt{\sin^2 e \cdot \cos^2 \theta + \sin^2 \theta} \quad (10)$$

Levando em conta que, no modelo de Richards & Weatherhead (1993), a deriva pelo vento só afeta a coordenada x_v do ponto de impacto pode-se, em função das Equação 7 e 8, concluir que as seguintes expressões representam, respectivamente, os efeitos da deriva pelo vento (DV) e da interrupção do fluxo de ar induzido (IF) sobre as coordenadas dos pontos de impacto:

$$DV = [A + B \cdot (r/R) + C \cdot (r/R)^2] \cdot V \quad (11)$$

$$IF = [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot S \quad (12)$$

De acordo com esse modelo, a relação entre o valor da taxa aplicação de água I_0 , no ponto de impacto sem vento (x_{v0}, y_{v0}) e o valor da taxa de aplicação I_v , no ponto de impacto com vento (x_v, y_v) é dada pela Equação 13:

$$I_v = \frac{I_0}{\left(\frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}} \cdot \frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}} \right)} \quad (13)$$

em que:

I_v é a intensidade de aplicação de água em x_v, y_v (condições de vento, mm.h^{-1});

I_0 é a intensidade de aplicação de água em x_{v0}, y_{v0} (dada pelo perfil radial de aplicação de água do aspersor em condições de ausência de vento, mm.h^{-1});

$\frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}}$ e $\frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}}$ são obtidos diferenciando-se as Equações 7 e 8.

Richards & Weatherhead (1993) e Greanier et al. (2003) obtiveram sucesso ao aplicar o Modelo Richards & Weatherhead (1993) na simulação do comportamento de aspersores do tipo canhão hidráulico, Nelson P150 e Komet TWIN 101, respectivamente, operando em condições de vento.


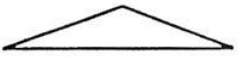

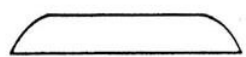

2.4 Fatores que afetam a uniformidade

A distribuição de água em sistemas convencionais de irrigação por aspersão pode ser influenciada por fatores climáticos e fatores não climáticos. Dentre os fatores não climáticos destacam-se: a combinação de bocais, pressão de serviço e ângulo de saída do jato d'água (que determinam a forma geométrica do perfil radial de distribuição de água do aspersor), o espaçamento entre aspersores e a disposição dos mesmos no campo (Keller & Bliesner, 1990;

Bernardo et al, 2006). Dentre os fatores climáticos destacam-se a velocidade e a direção do vento em relação à disposição dos aspersores no campo (Seginer et al., 1992; Tomazela, 1996; Carrión et al., 2001).

Na Tabela 1, adaptada de Keller & Bliesner (1990), são mostrados os cinco perfis de aplicação de água identificados por Christiansen (1942), bem como as recomendações de espaçamento entre aspersores expressas em termos de porcentagem do diâmetro molhado. Segundo estes autores, os perfis do 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 obtido quando se trabalha com pressões inferiores àquelas recomendadas para o tamanho do bocal.

TABELA 1. Formas geométricas dos perfis de distribuição de água de Christiansen.

Perfil	Forma	Recomendações de espaçamento (% do diâmetro molhado)		
		Quadrado	Triângulo Equilátero	Retângulo
A		50	50	40 x 60 a 65
B		55	66	40 x 60
C		60	65	40 x 60 a 65
D		40	70 a 75	40 x 70 a 75
E		40	80	40 x 80

Pereira (2003) e Tarjuelo (2005) descrevem três tipos de perfis: (i) o triangular, que caracteriza os aspersores médios de dois bocais, operando sob condições adequadas de pressão; (ii) o elíptico, que é normalmente obtido com aspersores de um único bocal, operando sob condições adequadas de pressão; e, (iii) o doughnut, que, geralmente, é obtido com os aspersores operando com valores reduzidos de pressão de serviço. Estes autores afirmam que, na maioria dos casos, os melhores resultados são alcançados com perfil triangular e os piores com o perfil tipo doughnut.

Para manter a mesma uniformidade sobre toda área a ser irrigada é preciso que o espaçamento e a disposição dos aspersores no campo sejam constantes. Três tipos de disposições entre aspersores podem ser utilizadas: quadrada, retangular e triangular. De acordo com Bernardo et al. 2006, as disposições retangulares e quadradas são as mais utilizadas.

Pereira (2003) afirma que o espaçamento entre aspersores é um fator fundamental, tanto no aspecto técnico como econômico. A redução no espaçamento entre aspersores pode elevar a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação, mas também pode elevar os custos de investimento com equipamentos. Maiores espaçamentos podem reduzir a necessidade de mão-de-obra e custos de investimento com equipamentos, mas também podem reduzir a uniformidade de aplicação de água e elevar os custos energéticos em função da necessidade de maiores pressões para operação dos aspersores. Soccol et al. (2004), ao simularem a distribuição de água em sistemas fixos com aspersores de alta pressão, também verificaram que, em geral, a uniformidade diminui com o aumento do espaçamento entre aspersores.

Merkley & Allen (2004) sugerem as seguintes recomendações gerais de espaçamento entre aspersores, expressas em termos de porcentagem do diâmetro molhado pelo aspersor na linha lateral e principal, respectivamente:

(i) 40% x 67% nos arranjos retangulares; (ii) 50% x 50% nos arranjos quadrados; e (iii) 62% x 54% nos arranjos triangulares.

Withers & Vipond (1974), citados por Tomazela (1996) e Prado (2004), afirmam que, enquanto a velocidade do vento não excede $2,2 \text{ m.s}^{-1}$, os efeitos do vento sobre a uniformidade de aplicação de água não são quase sentidos. Com velocidades de vento entre $2,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $3,6 \text{ m.s}^{-1}$, os efeitos do vento sobre a uniformidade podem ser tolerados. No entanto, além do limite de $3,6 \text{ m.s}^{-1}$, a uniformidade de aplicação de água é bastante prejudicada pela ação do vento. Azevedo et al. (2000) também relatam valores decrescentes de uniformidade, em decorrência do aumento da velocidade do vento e do aumento no espaçamento entre aspersores.

Keller & Bliesner (1990) relatam que os valores de diâmetro molhado listados nos catálogos dos fabricantes de aspersores baseiam-se em testes realizados na ausência de vento, nos quais o alcance é definido por uma taxa de aplicação de água menor que $0,25 \text{ mm.h}^{-1}$. No entanto, quando a seleção do espaçamento entre aspersores é feita em função do diâmetro molhado, o valor de diâmetro molhado do aspersor a ser considerado deve levar em conta a velocidade do vento, seguindo a seguinte relação: 10% de redução no valor de catálogo para ventos de até 5 km.h^{-1} ($1,4 \text{ m.s}^{-1}$), sendo necessária uma redução adicional de 2,5% para cada acréscimo de $1,6 \text{ km.h}^{-1}$ ($0,4 \text{ m.s}^{-1}$) acima do limite de 5 km.h^{-1} ($1,4 \text{ m.s}^{-1}$). Estes autores também afirmam que, de maneira geral, altas uniformidades de aplicação de água são obtidas com espaçamentos entre aspersores da ordem de 40%, ou menos, do diâmetro molhado. Bernardo et al. (2006) também apresentam recomendações gerais de espaçamentos entre aspersores, expressas em termos do diâmetro de cobertura (%) e da intensidade do vento, conforme mostrado na Tabela 2.

TABELA 2. Espaços entre aspersores de acordo com o diâmetro de cobertura e a intensidade do vento.

Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Espaço em função do diâmetro de cobertura
Sem vento	65 a 75 %
0 a 2,0	55 a 65 %
2,0 a 4,0	45 a 55 %
> 4,0	30 a 45 %

FONTE: Bernardo et al. (2006).

A importância do efeito da direção do vento, em relação à posição das linhas laterais de aspersores, sobre a uniformidade de aplicação de água é bastante controversa na literatura. Wiersma (1955) e Nogueira & Souza (1987), citados por Azevedo et al. (2000), relatam que, nos sistemas convencionais de aspersão, o efeito da direção do vento sobre o CUC é muito pequeno ou nulo. Ptacek (1972) afirma não existir orientação única da linha lateral em relação ao vento, que possa resultar em maior uniformidade. Shull & Dylla (1976) e Bernardo et al. (2006) consideram que o melhor posicionamento da linha lateral ocorre na direção perpendicular ao vento. Vories & Bernuth (1986) obtiveram melhores uniformidades com as linhas laterais de aspersores dispostas paralelamente ao deslocamento do vento. Tarjuelo et al. (1999) e Tarjuelo (2005) relatam que o melhor posicionamento da linha lateral em relação à direção do vento depende do padrão de distribuição de água do aspersor.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Distribuição de água do aspersor PLONA-RL250

Neste estudo foram utilizados dados obtidos em ensaios de distribuição de água do aspersor da marca PLONA, modelo RL250. Este aspersor é do tipo canhão hidráulico de reversão lenta, com ângulo de inclinação do lançamento do jato d'água de 24°, flange de acoplamento de 2 ½" e giro proporcionado pelo impacto de um de seus dois braços oscilantes. Conforme recomendação do fabricante, 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 um 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).

3.1.1 Distribuição de água na ausência de vento

Todos os 160 perfis radiais de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250 operando na ausência de vento, correspondentes às possíveis combinações entre 8 bocais principais, 5 pressões de serviço e 3 bocais auxiliares e ainda a possibilidade de trabalhar sem o bocal auxiliar, foram obtidos em simulações efetuadas com o aplicativo SimulaSoft versão 3.0 (Prado, 2004). Os valores de vazão e raio de alcance correspondentes à estas 160 condições operacionais são apresentados na Tabela 1A do ANEXO.

3.1.2 Distribuição de água em condições de vento

Também foram utilizados dados observados em 53 ensaios de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250, realizados em condição de vento sob diferentes combinações de bocais e pressão de serviço. Estes ensaios foram realizados em área experimental do Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET), Uberaba-MG, de acordo com o método da malha preconizado na norma ISO 7749-2 (ISO, 1990).

Cada ensaio foi representado por uma matriz de 14 x 14, contendo os valores de intensidade de precipitação (em mm.h^{-1}) observados em coletores plásticos, com 8 cm de diâmetro, regularmente espaçados de 6 m. Para registro das variáveis meteorológicas pertinentes ao estudo, tais como, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento, dispôs-se de uma estação meteorológica, a qual registrava os referidos dados a cada 5 minutos.

Os valores dos diâmetros de bocal, da pressão de serviço, da média e do desvio padrão da velocidade e da direção do vento nos 53 ensaios são apresentados na Tabela 2A do ANEXO.

O sistema de eixos orientados adotado nos ensaios de campo (X,Y), para identificação das coordenadas dos coletores da matriz A, utilizada no armazenamento dos dados de intensidade de precipitação observados em cada ensaio, e a notação horária de registro do ângulo Φ , da linha de ação do vento em relação ao eixo X, são esquematizados na Figura 2. Neste sistema de eixos orientados, a posição do aspersor corresponde ao centro da matriz, nas coordenadas $x = 0$ e $y = 0$, e a posição do coletor cuja intensidade de precipitação foi armazenada no elemento (1,1) da matriz A, corresponde às coordenadas $x = 39$ m e $y = -39$ m.

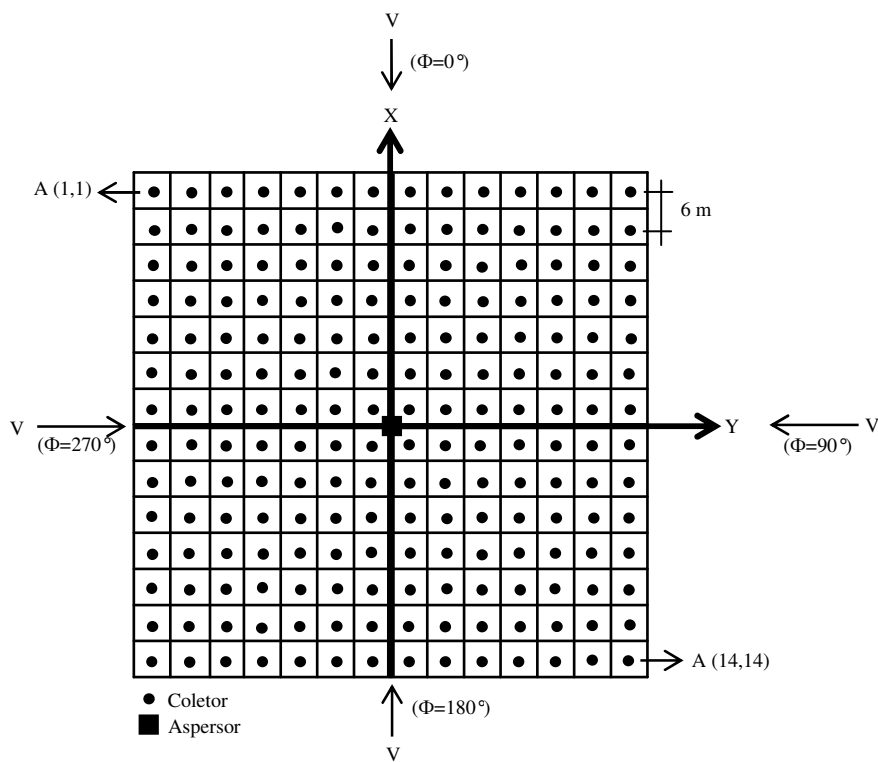


FIGURA 2. Desenho esquemático da malha de coletores ao redor do aspersor e dos ângulos utilizados para caracterizar a direção do vento.

3.2 Análise de agrupamento das combinações de bocal versus pressão

Cada perfil radial de aplicação de água, composto por 20 pares de valores de intensidade de precipitação versus distância ao aspersor, foi adimensionalizado, com base nas Equações 5 e 6 e nos valores de vazão e raio de alcance apresentados na Tabela 1A do ANEXO. A adimensionalização dos 160 perfis radiais de aplicação de água forneceu 160 conjuntos contendo, cada um, 20 valores de precipitação adimensional, correspondentes às mesmas 20

posições em relação ao aspersor (desde 2,5% até 97,5% do raio de alcance, em intervalos regulares de 5%).

Os 160 conjuntos adimensionais foram submetidos à análise de agrupamento, visando identificar grupos de condições operacionais (pressão vs. bocais) que resultam em perfis adimensionais com valores muito semelhantes, que podem ser representados por um mesmo perfil típico. De acordo com as recomendações de Solomon & Bezdek (1980), a análise de agrupamento dos perfis adimensionais foi realizada com o auxílio do algoritmo “K-Means” (Tou & Gonzales, 1974), utilizando-se a mesma metodologia descrita por Prado & Colombo (2005).

3.3 Determinações experimentais das dimensões da área molhada distorcida pelo vento

O Programa Gráfico SigmaPlot (Jandel Scientific, Corte Madera, CA, USA) foi utilizado para transformar as 53 matrizes, contendo os dados da distribuição espacial de 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 m), 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.

Para 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 ($x = 0$, $y = 0$) com o ponto representativo da posição do centro de gravidade (CG) das intensidades de precipitação observadas (Figura 3).

Conforme indicado na Figura 3, a linha da direção predominante do vento foi utilizada como referência para determinação das medidas entre as distâncias do aspersor até a extremidade da área molhada pelo mesmo (definida pela posição da isoietta correspondente a uma intensidade de precipitação de $0,25 \text{ mm.h}^{-1}$) em quatro condições distintas: sentido contra o vento (RC), a favor ao vento (RA), perpendicular à direita (RP_D) e perpendicular à esquerda (RP_E) ao do vento. Posteriormente, os valores medidos em cada ensaio da média das distâncias perpendiculares [$RP = (RP_D + RP_E) / 2$] e as distâncias contra e a favor ao sentido do vento foram expressas em termos de porcentagem do raio de alcance sem vento ($100RC/R$, $100RA/R$ e $100RP/R$).

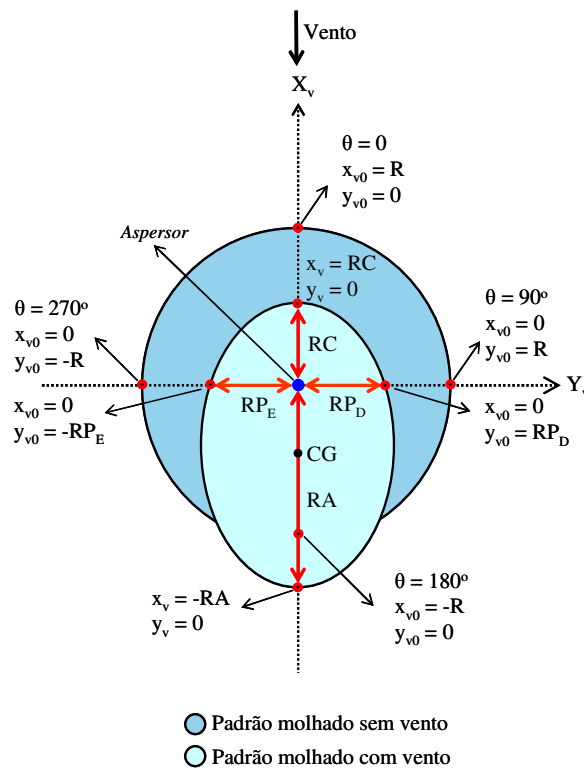


FIGURA 3. Esquema das distâncias do aspersor até a extremidade da área molhada tomadas em quatro sentidos distintos em relação à direção predominante do vento.

3.4 Ajuste dos parâmetros empíricos

Os seis parâmetros empíricos do modelo de Richards & Weatherhead (1993) foram ajustados através de um processo envolvendo duas etapas. Na primeira etapa, foram estabelecidas estimativas dos valores da soma dos parâmetro relacionados aos efeitos da interrupção do fluxo de ar induzido (D+E+F) e da soma dos valores dos parâmetros relacionados aos efeitos da deriva do vento (A+B+C). Na segunda etapa, os valores conhecidos das somas foram utilizados para estabelecer as estimativas iniciais dos valores dos seis parâmetros a serem utilizados em um processo iterativo para minimizar a soma dos quadrados dos desvios.

3.4.1 Ajuste através das dimensões da área molhada distorcida pelo vento

No modelo de Richards & Weatherhead (1993), a relação entre a distância do aspersor até a extremidade da área molhada, tomada no do vento (RA, $\theta = 180^\circ$), e a velocidade do vento (V) é estabelecida considerando, conforme esquematizado na Figura 3, os seguintes valores: $x_v = -RA$; $x_{v0} = -R$, $y_{v0} = 0$. Conseqüentemente, com $r = R$, $(r/R) = 1$; $\cos\theta = x_{v0}/r$ e $S = 0,407$ (calculado pela Equação 10), a Equação 7 fornece:

$$\begin{aligned} -RA = -R - [A + B \cdot (1) + C \cdot (1)^2] \cdot V \dots \\ - [D \cdot (1) + E \cdot (1)^2 + F \cdot (1)^3] \cdot V \cdot 0,407 \cdot (-1) \end{aligned} \quad (14a)$$

$$RA = R + [(A + B + C) - (D + E + F) \cdot 0,407] \cdot V \quad (14b)$$

Esta distância, quando expressa em termos da porcentagem do raio de alcance sem vento (R), toma a seguinte forma:

$$100 \cdot \frac{RA}{R} = 100 + 100 \cdot \left[\frac{(A + B + C)}{R} - 0,407 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \right] \cdot V \quad (14c)$$

De acordo com a Equação 14c, o coeficiente angular da reta ajustada aos pares de valores experimentais $100RA/R$ versus V pode ser interpretado como uma boa estimativa do valor de $100/R [A+B+C-0,407 \cdot (D+E+F)]$.

No modelo Richards & Weatherhead (1993), a relação entre a distância até a extremidade da área molhada, tomada no sentido contrário ao vento (RC , $\theta = 0^\circ$), e a velocidade do vento (V) é estabelecida considerando, conforme esquematizado na Figura 3, os seguintes valores: $x_v = RC$; $y_{v0} = 0$; $x_{v0} = R$. Conseqüentemente, com $r = R$, $(r/R) = 1$; $\cos\theta = x_{v0}/r$ e $S = 0,407$ (calculado pela Equação 10), a Equação 7 fornece:

$$RC = R - [A + B \cdot (1) + C \cdot (1)^2] \cdot V \dots \\ - [D \cdot (1) + E \cdot (1)^2 + F \cdot (1)^3] \cdot V \cdot 0,407 \cdot (1) \quad (15a)$$

$$RC = R - [(A + B + C) + (D + E + F) \cdot 0,407] \cdot V \quad (15b)$$

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

$$100 \frac{RC}{R} = 100 - 100 \cdot \left[\frac{(A + B + C)}{R} + 0,407 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \right] \cdot V \quad (15c)$$

De acordo com a Equação 15c, o coeficiente angular da reta ajustada aos pares de valores experimentais $100RC/R$ versus V pode ser utilizado como uma boa estimativa do valor de $100/R [A+B+C+0,407 \cdot (D+E+F)]$.

De acordo com o modelo 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° (RP_D - perpendicular à direita) ou 270° (RP_E - perpendicular à esquerda), Figura 3.

Para a distância perpendicular à direita da direção do vento (RP_D) até a extremidade da área molhada, em função da velocidade do vento (V), o cálculo considera, conforme indicado na Figura 3, sem levar em conta a deriva, os seguintes valores: $y_v = RP_D$; $y_{v0} = R$; $x_{v0} = 0$. Conseqüentemente, com $r = R$, $(r/R)=1$; $\text{sen}\theta=y_{v0}/r$ e $S = 1$ (calculado pela Equação 10), a Equação 8 fornece:

$$RP_D = R - [D \cdot (1) + E \cdot (1)^2 + F \cdot (1)^3] \cdot V \cdot (1) \cdot (1) \quad (16a)$$

$$RP_D = R - (D + E + F) \cdot V \quad (16b)$$

Esta distância, quando expressa em termos da porcentagem do raio de alcance sem vento (R), toma a seguinte forma:

$$100 \cdot \frac{RP_D}{R} = 100 - 100 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \cdot V \quad (16c)$$

Para a distância perpendicular à esquerda da direção do vento (RP_E) até a extremidade da área molhada, em função da velocidade do vento (V), o cálculo considera, conforme indicado na Figura 3, sem levar em conta a deriva, os seguintes valores: $y_v = -RP_E$; $y_{v0} = -R$; $x_{v0} = 0$. Conseqüentemente, com $r=R$; $(r/R) = 1$; $\text{sen}\theta = y_{v0}/r$ e $S = 1$ (calculado pela Equação 10), a Equação 8 fornece:

$$-RP_E = -R - [D \cdot (1) + E \cdot (1)^2 + F \cdot (1)^3] \cdot V \cdot (1) \cdot (-1) \quad (17a)$$

$$RP_E = -[-R + (D + E + F) \cdot V] \quad (17b)$$

Esta distância, quando expressa em termos da porcentagem do raio de alcance sem vento (R), toma a seguinte forma:

$$100 \cdot \frac{RP_E}{R} = 100 - 100 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \cdot V \quad (17c)$$

Considerando que as Equações 16c e 17c são iguais e que RP é definido como média das distâncias perpendiculares [$RP = (RP_D + RP_E)/2$], pode-se concluir que a média das distâncias perpendiculares ao vento é dada por:

$$100 \cdot \frac{RP}{R} = 100 - 100 \cdot \frac{(D + E + F)}{R} \cdot V \quad (18)$$

De acordo com a Equação 18, o coeficiente angular da reta ajustada aos pares de valores experimentais $100RP/R$ versus V pode ser utilizado como uma boa estimativa dos valores 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) da planilha eletrônica Excel, baseada no modelo de Richards & Weatherhead (1993), para simular a distribuição espacial de um aspersor operando em condições de vento. A rotina desenvolvida gera os valores de precipitação ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) ao longo de uma malha de pontos (coletores fictícios) uniformemente distribuídos ao redor do aspersor, observando o mesmo arranjo de coletores utilizados nos ensaios de campo, esquematizado na Figura 2.

Os seguintes valores são requeridos como parâmetros de entrada:

(i) velocidade (V em $m.s^{-1}$) e direção (Φ em graus) do vento em relação ao sistema de eixos orientados dos ensaios de campo;

(ii) coordenadas (x e 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, sendo os valores normalizados 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_v,y_v), nos eixos orientados pela direção do vento usados no modelo (Figura 4). Esta conversão é feita por meio das Equações 19 e 20, que se baseiam nos ângulos mostrados na Figura 4, sendo Φ o ângulo entre os eixos orientados utilizados no teste de campo e os eixos orientados pela direção do vento, e β o ângulo anti-horário, calculado de acordo com a Equação 21.

$$x_v = x \cdot \cos(\beta) - y \cdot \sin(\beta) \quad (19)$$

$$y_v = y \cdot \cos(\beta) + x \cdot \sin(\beta) \quad (20)$$

$$\beta = 360 - \Phi \quad (21)$$

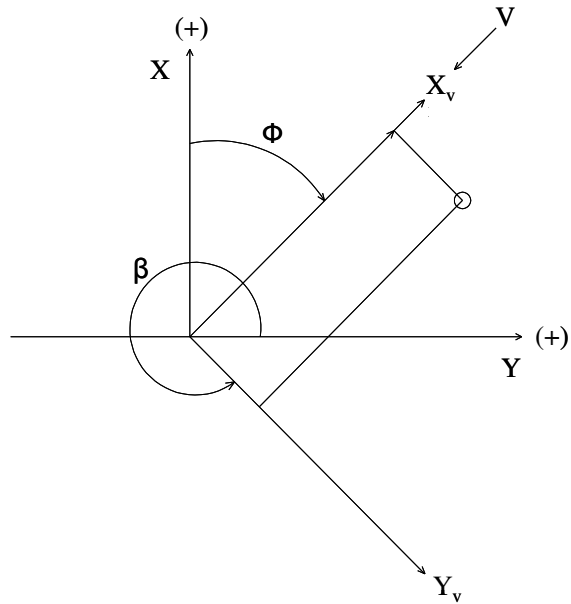


FIGURA 4. Esquema utilizado para inversão do eixo orientado no teste de campo (X,Y) , para o eixo orientado segundo a direção do vento (X_v,Y_v) .

(iii) cálculo das coordenadas (x_{v0},y_{v0}) , dos eixos orientados pela direção do vento, do ponto de impacto sem vento, que teriam coordenadas do ponto de impacto com vento coincidentes com a posição do coletor (x_v,y_v) considerado. O processo iterativo para determinação das coordenadas (x_{v0},y_{v0}) tem início com $x_{v0} = x_v$, e $y_{v0} = y_v$, terminando quando o valor absoluto da correção das estimativas de x_{v0} e y_{v0} são menores que 0,001 m. Para acelerar a convergência do processo iterativo, o método de Newton, descrito por Burden & Faires (2003), é aplicado ao sistema de equações simultâneas obtidas pela inversão das Equações 7 e 8, conforme indicado nas Equações 22 e 23:

$$f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ \begin{array}{l} x_{v0} - [A + B \cdot (r/R) + C \cdot (r/R)^2] \cdot V - \dots \\ [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot \dots \\ V \cdot \sqrt{\text{sen}^2 e \cdot \left(\frac{x_{v0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{v0}}{r}\right)^2} \cdot \frac{x_{v0}}{r} \end{array} \right\} - x_v \quad (22)$$

$$f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ \begin{array}{l} y_{v0} - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + \dots \\ F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot \sqrt{\text{sen}^2 e \cdot \left(\frac{x_{v0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{v0}}{r}\right)^2} \cdot \frac{y_{v0}}{r} \end{array} \right\} - y_v \quad (23)$$

(iv) cálculo da taxa da aplicação, I_0 , na ausência de vento, no ponto de coordenada x_{v0} e y_{v0} , que corresponde à distância radial $r = (x_{v0}^2 + y_{v0}^2)^{1/2}$, utilizando as informações do perfil radial de aplicação de água;

(v) cálculo da taxa da aplicação I_v , em x_v, y_v por meio da Equação 13;

(vi) repete os passos (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 (3 estimadas vs. 3 observadas).

3.5 Avaliação da modelagem da uniformidade de aplicação de água

A habilidade com que o modelo de Richards & Weatherhead (1993) permite prever a uniformidade de aplicação de água, do aspersor PLONA-RL250 operando em sistemas convencionais de irrigação sob condições de vento, foi avaliada através da análise do desvio absoluto entre valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) oriundos de distribuições observadas em ensaios de campo (CUC_{obs}), e valores de uniformidade oriundos de distribuições simuladas pelo modelo avaliado (CUC_{sim}). O desvio absoluto (DA em %) foi calculado pela seguinte Equação:

$$DA = |CUC_{obs} - CUC_{sim}| \cdot 100 \quad (24)$$

3.6 Espaçamento e disposição do aspersor PLONA-RL250

Na avaliação da eficácia dos procedimentos para atenuação dos efeitos danosos do vento sobre a uniformidade de sistemas convencionais de irrigação, que operam com o aspersor canhão PLONA-RL250, o modelo ajustado de Richards & Weatherhead (1993) foi utilizado para gerar matrizes representativas da distribuição espacial de água do PLONA-RL250 operando sob diferentes velocidades de vento e três direções em relação à linha lateral de aspersores (perpendicular, paralela e 45°).

Para cálculo do coeficiente de uniformidade (CUC) em diferentes situações, matrizes simuladas, que tinham um espaçamento regular entre coletores de 3 m, foram sobrepostas considerando espaçamentos entre aspersores, múltiplos de 6 m, variando desde 10% até 100% do diâmetro molhado do aspersor. Neste processo de sobreposição, foram considerados,

conforme indicado na Figura 5, dois tipos de disposição dos aspersores no campo: retangular e triangular.

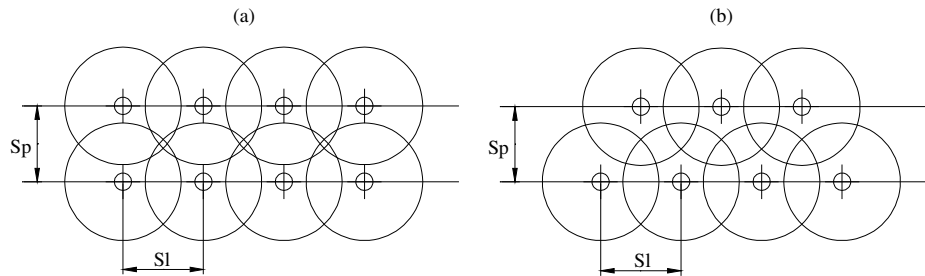


FIGURA 5. Espaçamento entre aspersores na linha lateral (Sl) e principal (Sp) para os arranjos retangulares (a) e triangulares (b).

Os valores simulados de coeficiente de uniformidade foram agrupados em diferentes superfícies de respostas, cada uma representando um dos perfis radiais típicos do aspersor PLONA-RL250, que foram identificados pela análise de agrupamento. No caso dos arranjos quadrados, as superfícies de resposta apresentam os valores simulados de CUC em função dos diferentes espaçamentos entre aspersores, expressos como fração do diâmetro molhado pelo aspersor (% DM) e da velocidade do vento em duas direções (perpendicular ou paralelo e 45°). No caso dos arranjos retangulares e triangulares, as superfícies de resposta apresentam os valores simulados de CUC em função dos diferentes espaçamentos entre aspersores na linha lateral (Sl) e principal (Sp), expressos como fração do diâmetro molhado pelo aspersor (% DM).

Nas superfícies de resposta dos arranjos triangulares e retangulares foi traçada a curva que delimita as combinações de espaçamento a partir das quais a sobreposição das áreas molhadas pelos aspersores é incompleta, ou seja, a partir das quais ocorre o aparecimento de áreas secas. As combinações de espaçamentos entre aspersores, que delimitam a região a partir da qual ocorre o

comprometimento da cobertura completa da área irrigada, foram determinadas para os arranjos retangulares e triangulares, por meio das equações 25 e 26, respectivamente (Chen & Wallender, 1984).

$$\frac{Sl}{DM} = \sqrt{1 - \left(\frac{Sp}{DM}\right)^2} \quad (25)$$

$$\frac{Sl}{DM} = \sqrt{1 - 4 \cdot \left(\frac{Sp}{DM} - 0,5\right)^2} \quad (26)$$

em que:

Sl é o espaçamento entre aspersores na linha lateral (em m);

Sp é o espaçamento entre aspersores na linha principal (em m);

DM é o diâmetro molhado pelo aspersor (em m).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perfis típicos de distribuição de água

A variação do erro médio (E_k) na estimativa da intensidade de precipitação adimensional em função do número de “K” de grupos é apresentada na Figura 6. Nesta figura, observa-se uma alteração substancial no comportamento da curva na região em que o número de grupos (K) é reduzido de seis para quatro.

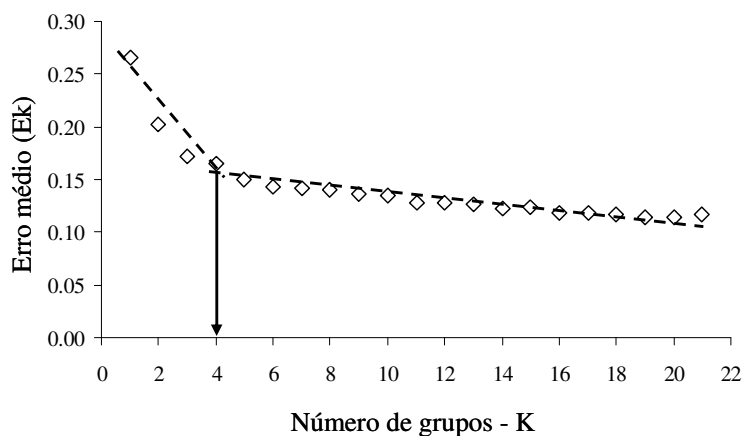


FIGURA 6. Variação do erro médio (E_k) na estimativa da intensidade adimensional da aplicação de água em função do número de grupos considerados na análise de agrupamento.

Observa-se que quando os 160 perfis são agrupados em torno de quatro grupos distintos, o erro médio observado (0,165) é um pouco superior aos valores 0,116 e 0,147, relatados por Solomon & Bezedek (1980) e Prado (2004), respectivamente. No entanto, conforme recomendado por Solomon & Bezedek

(1980), com quatro grupos, é possível estabelecer uma relação bastante racional entre as condições operacionais do aspersor PLONA-RL250 e a ocorrência de cada grupo, que representa uma determinada forma geométrica assumida pelo perfil radial adimensional de aplicação de água do aspersor. Este fato é mais bem ilustrado na Figura 7, que mostra, para as 160 combinações de diâmetro dos bocais e pressão de serviço do aspersor PLONA-RL250, o diâmetro molhado pelo aspersor (em metros) e a identificação (I, II, III ou IV) do grupo de ocorrência (perfil adimensional típico) que lhe foi atribuído pela análise de agrupamento, quando se considerou $K=4$ (Tabela 1A do ANEXO).

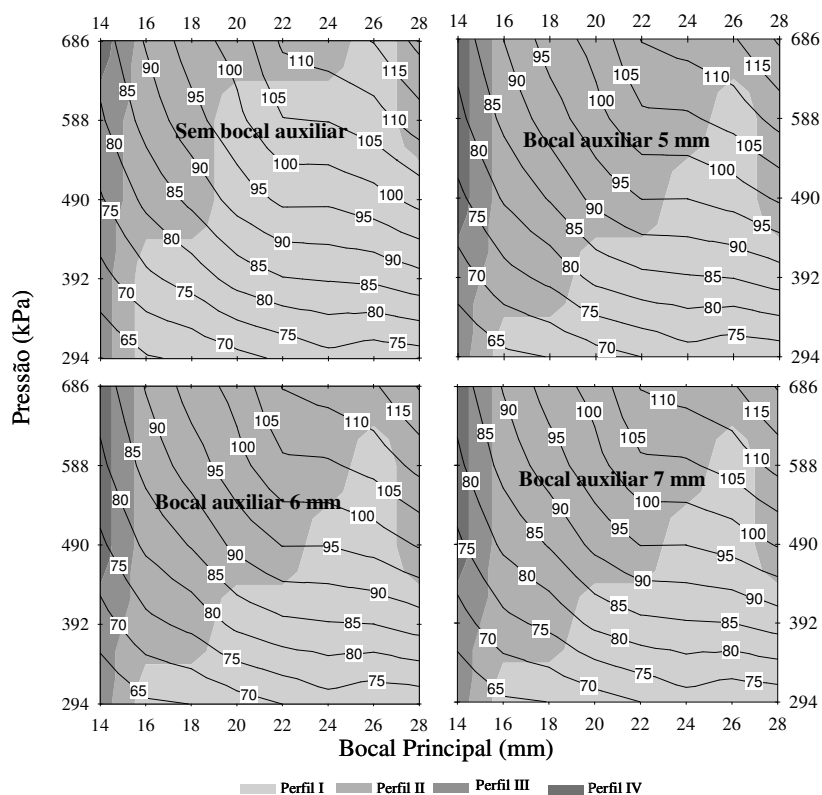


FIGURA 7. Diâmetro molhado (m) e grupo característico (I, II, III ou IV) correspondente às diferentes combinações entre pressão e diâmetro dos bocais do aspersor PLONA-RL250.

Na Figura 7, a região de ocorrência de cada um dos quatro grupos pode ser associada à ocorrência de condições operacionais que determinam diferentes níveis de pulverização do jato de água do aspersor. A parte inferior da direita das quatro superfícies de resposta mostradas na Figuras 7, onde predomina a ocorrência do grupo I, corresponde à combinação dos maiores bocais com as menores pressões. O grupo II tem sua ocorrência concentrada na mesma faixa de valores de bocais do grupo I, mas com pressões de serviço superiores à do grupo I. A região do canto superior esquerdo destas superfícies, 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 adimensionais representativos de cada um dos quatro grupos (Tabela 3A do ANEXO), que é mostrada na Figura 8, confirma esta associação entre agrupamento e grau de pulverização do jato de água do aspersor.

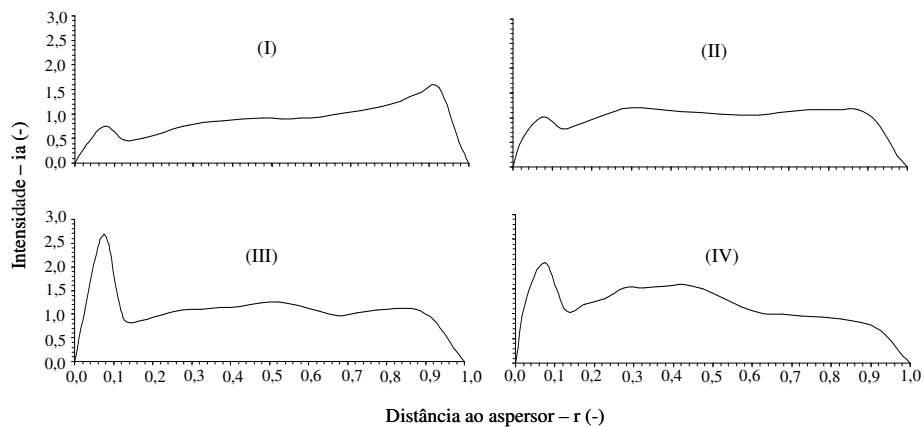


FIGURA 8. Representação dos perfis adimensionais I, II, III e IV do aspersor PLONA-RL250.

Nota-se na Figura 8 que existe um acúmulo de aplicação de água na extremidade final do perfil adimensional correspondente ao grupo I, que se dissipa à medida que passamos para os Grupos II, III e IV. Este comportamento do perfil radial de aplicação de água em função do aumento da pressão está de acordo com o comportamento previsto por Christiansen (1942), Keller & Bliesner (1990), Tarjuelo (2005) e Bernardo et al, 2006.

4.2 Determinação dos parâmetros empíricos

4.2.1 Estimativas por meio das dimensões da área molhada

A viabilidade da utilização, no modelo de Richards & Weatherhead (1993), de coeficientes empíricos com valores ponderados pelo raio de alcance sem vento (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R) é demonstrada nas Figuras 9, 10 e 11. Pode-se observar que 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 18, 15c e 14c.

Nas curvas apresentadas nas Figuras 9, 10 e 11 foram considerados 53 valores de distância, determinados em condições de vento, e 26 valores de raio de alcance determinados em condições nulas de vento. De acordo com valores mostrados na Tabela 4A do ANEXO, estes conjuntos de dados cobrem uma variação no valor do raio de alcance sem vento do aspersor PLONA-RL250, que abrange desde 33,7 m (bocais de 14 x 7 mm, pressão de 392 kPa) até 45,68 m (20 x 6 mm, pressão de 490 kPa).

Na Figura 9 observa-se a variação do valor médio [$RP=(RP_D+RP_E)/2$] das distâncias entre o aspersor e a extremidade da área molhada, em função da velocidade do vento, tomada nas direções perpendiculares ao vento.

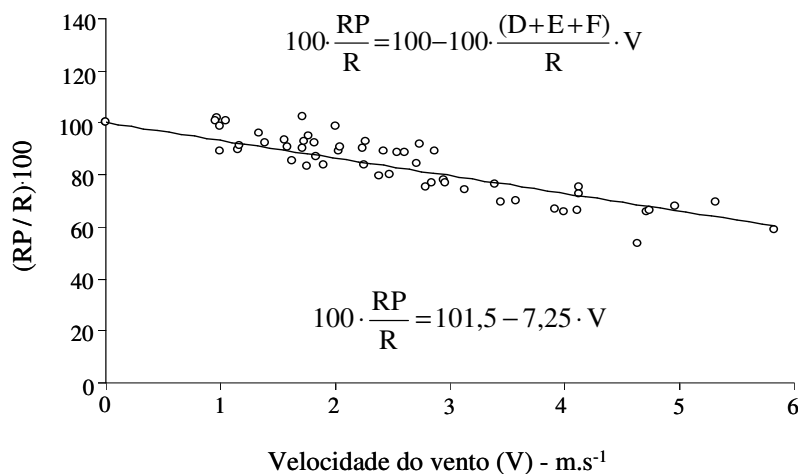


FIGURA 9. Média das distâncias relativas até a extremidade da área molhada (RP/R), tomadas perpendicularmente a direção do vento, sob diferentes velocidades de vento.

O bom ajuste dos dados observados ao modelo linear ($r^2 = 0,85$) e a proximidade entre o valor assumido pelo intercepto da reta (101,5) ajustado ao valor teórico esperado (100) são indicadores da adequação do uso de parâmetros empíricos normalizados. O confronto entre as duas equações, mostradas na Figura 9, fornece uma primeira estimativa do valor da soma dos fatores empíricos normalizados, utilizados no cálculo da redução do raio de alcance devido ao fluxo de ar induzido ($D/R+E/R+F/R = 0,0725 \text{ s.m}^{-1}$).

A variação, em função do valor da velocidade do vento, do valor da distância relativa (RC/R) entre o aspersor e a extremidade da área molhada, tomada no sentido contrário ao vento, é mostrada na Figura 10.

O bom ajuste dos dados observados no modelo linear ($r^2 = 0,737$) e a proximidade entre o valor assumido pelo intercepto da reta (101,7) ajustado ao valor teórico esperado (100) são indicadores da adequação do uso de parâmetros empíricos normalizados. Com base no confronto entre as duas equações, mostradas na Figura 10, e o valor previamente estimado de $D/R+E/R+F/R$,

pode-se estabelecer uma primeira estimativa do valor da soma dos fatores empíricos normalizados, utilizados no cálculo da deriva pelo vento: $(A/R+B/R+C/R = 0,0333 \text{ s.m}^{-1})$.

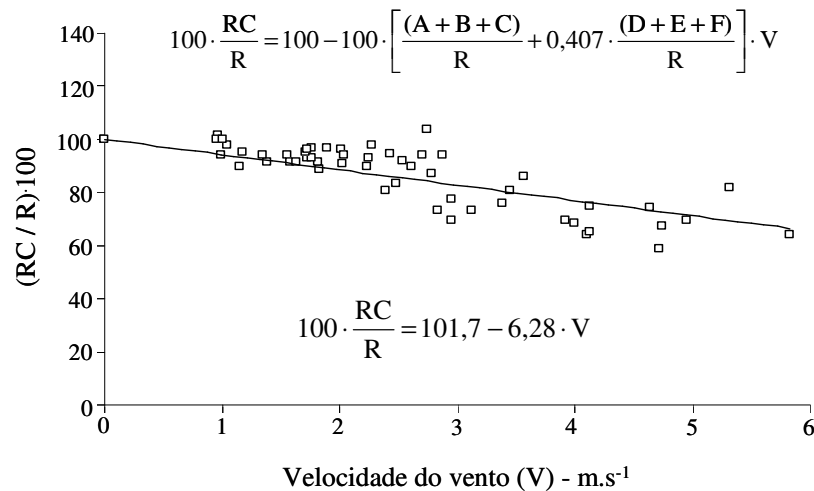


FIGURA 10. Distâncias relativas (RC/R) até a extremidade da área molhada, tomadas no sentido contra o vento, sob diferentes velocidades de vento.

A variação, em função do valor da velocidade do vento, do valor da distância relativa (RA/R) entre o aspersor e a extremidade da área molhada, tomada no sentido a favor ao vento é mostrada na Figura 11.

No caso da Figura 11, 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.

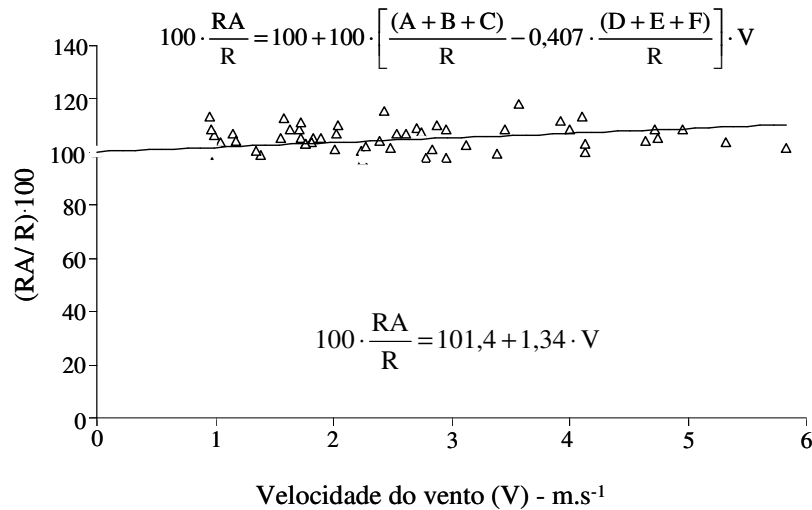


FIGURA 11. Distâncias relativas (RA/R) até a extremidade da área molhada, tomadas no sentido a favor do vento, sob diferentes velocidades de vento.

Com base no confronto entre as duas equações mostradas na Figura 11 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 podemos assumir que ($A/R+B/R+C/R = 0,0381 \text{ s.m}^{-1}$).

Além de inferências quanto à adequação dos parâmetros propostos e quanto ao valor assumido pelos coeficientes empíricos, as Figuras 9, 10 e 11 permitem observar que: (i) na direção perpendicular ao vento, Figura 9, o raio de alcance do aspersor sofre uma redução de 7,25% em relação ao raio sem vento (R), para cada aumento de 1,0 m.s⁻¹ na velocidade do vento; (ii) no sentido contrário ao vento, Figura 10, o raio de alcance é reduzido em 6,28% para cada 1,0 m.s⁻¹ de aumento na velocidade do vento; e (iii) no sentido do vento,

Figura 11, o raio de alcance do aspersor sofre um aumento de 1,34% em relação ao raio sem vento (R) para o aumento de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ na velocidade.

A variação no raio de alcance, devido à velocidade e direção do vento para o aspersor PLONA-RL250, foi próximo ao comportamento previsto por Richards & Weatherhead (1993), que com um canhão Nelson P150 encontraram uma redução no raio de alcance de 6,4% para cada aumento de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ na velocidade do vento na direção perpendicular ao vento e no sentido contrário ao mesmo, e um aumento no raio de alcance de 1,2%, no sentido do vento, para cada aumento de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ na velocidade de vento.

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 (três estimadas *vs.* três observadas), os 53 ensaios de distribuição de água disponíveis permitiam a formação de 23426 conjuntos distintos, contendo três 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 devessem atender às seguintes propriedades: $A/R+B/R+C/R = 0,0381 \text{ s.m}^{-1}$; e $D/R+E/R+F/R = 0,0725 \text{ s.m}^{-1}$.

Dessa forma, diversos conjuntos distintos de três 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 e 490 kPa, com vento de $1,83 \text{ m.s}^{-1}$ na direção de 28°), 26 (16 x 0 mm e 490 kPa, com vento de $2,25 \text{ m.s}^{-1}$ na direção de 353°) e o 42 (18 x 5 mm e 490 kPa, com vento de $4,13 \text{ m.s}^{-1}$ na direção de $107,3^\circ$) da Tabela 2A do ANEXO, forneceram 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: $A/R = 0,0362 \text{ s.m}^{-1}$; $B/R = 0,0131 \text{ s.m}^{-1}$ e $C/R = -0,0097 \text{ s.m}^{-1}$ resultam em: $0,0396/0,0381 = 1,04$; e $D/R = 0,0026 \text{ s.m}^{-1}$; $E/R = 0,4003 \text{ s.m}^{-1}$ e $F/R = -0,3361 \text{ s.m}^{-1}$ resultam em: $0,0667/0,0725 = 0,92$. A adequação dos parâmetros do ajuste obtido pode ser avaliada na Figura 12 que compara mapas de contorno das taxas de aplicação de água (mm.h^{-1}) do aspersor obtidas nos ensaios de campo (29, 26 e 42, Tabela 2A do ANEXO) com mapas gerados pelo programa desenvolvido.

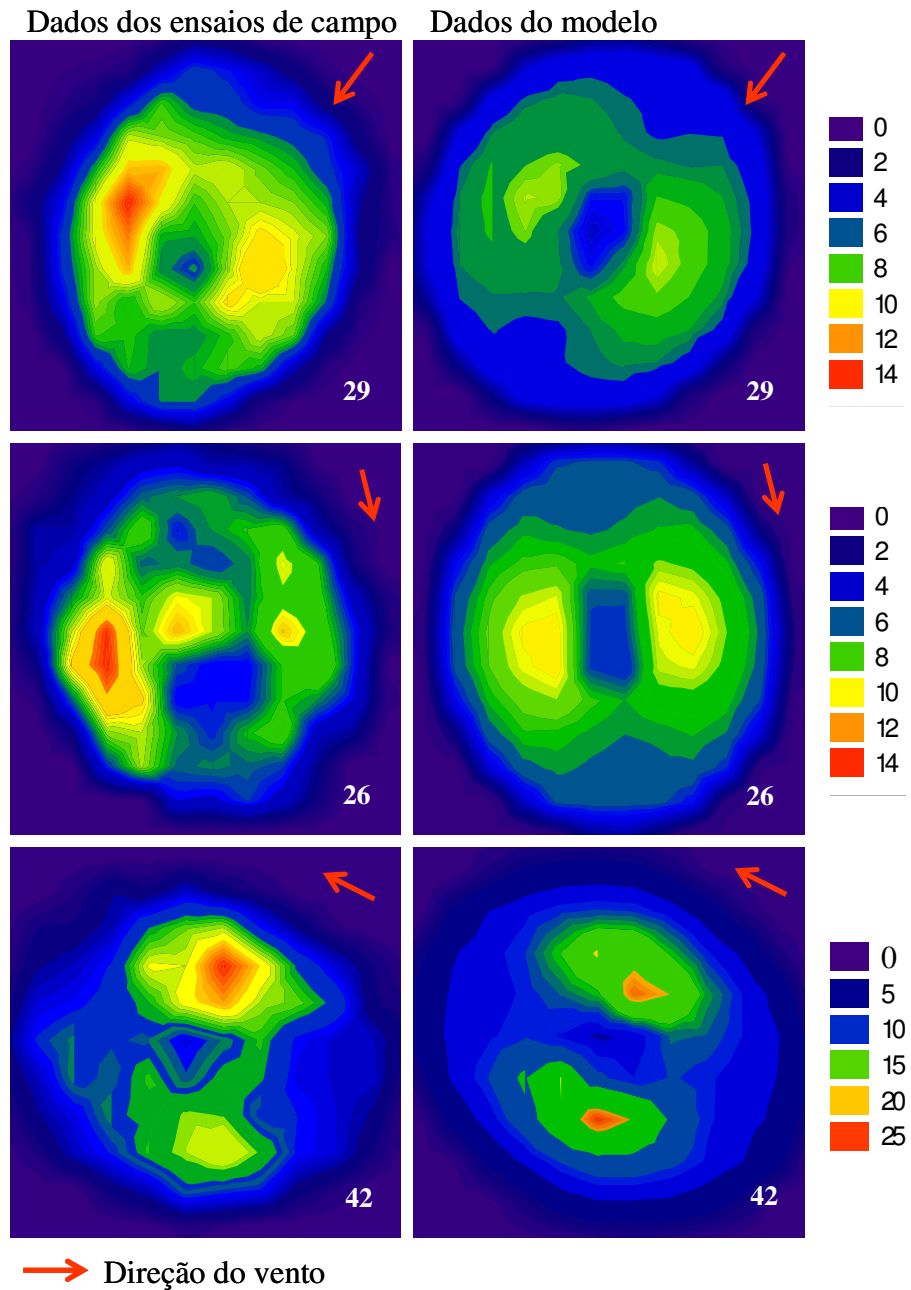


FIGURA 12. Superfícies de contorno das taxas de aplicação de água do aspersor (mm.h^{-1}) nos três ensaios utilizados para o ajuste das constantes.

4.3 Avaliação do modelo ajustado

4.3.1 Análise do comportamento do modelo

Na Figura 13 pode-se observar simulações de distorção do padrão de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250, operando com bocais de 18 x 5 mm e pressão de serviço de 490 kPa (perfil típico II), que foram calculados pelo modelo de Richards & Weatherhead (1993) para diferentes valores de velocidades de vento. Estas simulações demonstram a diminuição na largura da área molhada no sentido perpendicular à ação do vento e à formação de áreas de alta taxa de aplicação em cada lado do aspersor, seguindo o mesmo comportamento descrito por Shull & Dylla (1976) para distribuição de água de um canhão hidráulico operando sob condições de vento.

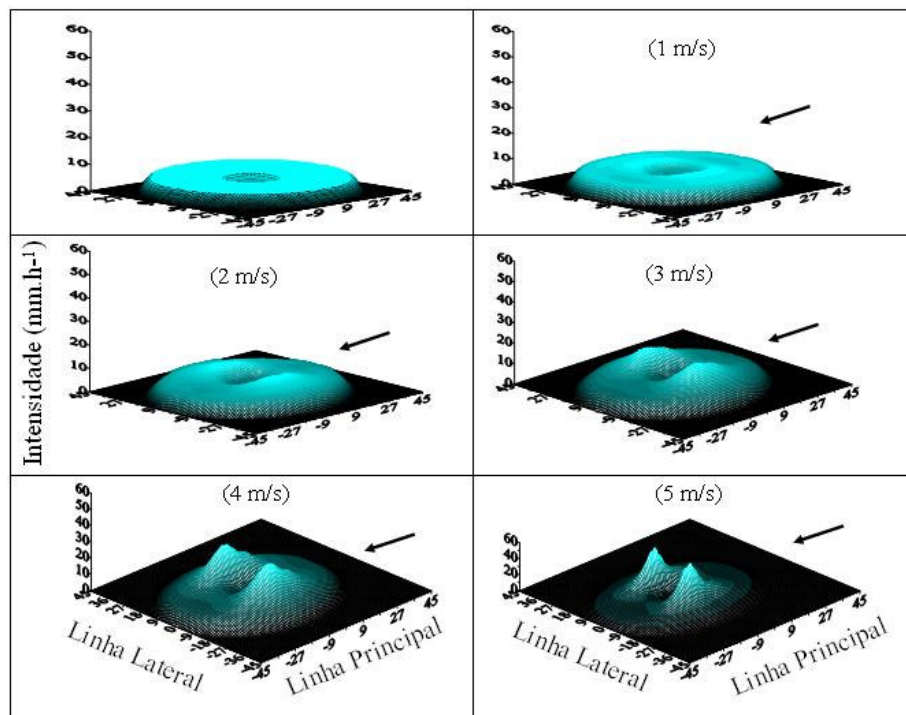


FIGURA 13. Modelagem do efeito da velocidade do vento sobre o padrão de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250.

4.3.2 Análise da uniformidade de aplicação de água em sistemas convencionais de irrigação

Na Figura 14 foram comparados valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %) simulados pelo modelo ajustado com valores de CUC simulados com dados observados nos ensaios de campo. As condições operacionais usadas nesta comparação foram as mesmas utilizadas no ajuste dos parâmetros empíricos, ensaios: 29 (16 x 6 mm e 490 kPa, com vento de $1,83 \text{ m.s}^{-1}$ na direção de 28°), 26 (16 x 0 mm e 490 kPa, com vento de $2,25 \text{ m.s}^{-1}$ na direção de 353°) e o 42 (18 x 5 mm e 490 kPa, com vento de $4,13 \text{ m.s}^{-1}$ na direção de $107,3^\circ$), Tabela 2A do ANEXO.

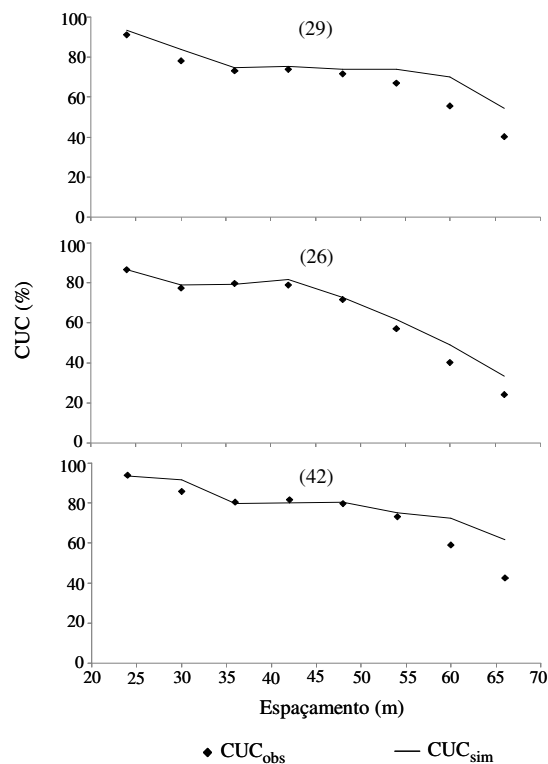


FIGURA 14. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %) simulados com dados gerados pelo modelo e com dados observados nos ensaios de campo.

Pode-se notar na Figura 14 que, independentemente da velocidade do vento ($1,83 \text{ m.s}^{-1}$ no ensaio 29 e $4,13 \text{ m.s}^{-1}$ no ensaio 42), o comportamento dos valores de CUC simulados com dados gerados pelo modelo ajustado segue a mesma tendência dos valores calculados com dados observados nos ensaios de campo.

Na Figura 15 é mostrada a relação linear entre 373 valores de CUC do modelo ajustado e 373 valores de CUC dos ensaios de campo. Estes valores apresentam um coeficiente de determinação igual a 75%, valor este menor ao encontrado por Montero et al. (2001) na validação do modelo SIRIAS (89%), mas que ainda denota uma boa correlação entre valores de CUC gerados pelo modelo ajustado e valores gerados nos ensaios de campo. Os valores apresentados estão bem distribuídos ao longo da reta 1:1, notando-se que a dispersão tende a aumentar com a redução dos valores de CUC, mostrando um comportamento muito parecido com o previsto por Solomon (1979). Comparando-se a reta 1:1 com a linha de ajuste, verifica-se que o modelo ajustado tende a produzir valores de CUC pouco superiores aos observados nos ensaios de campo.

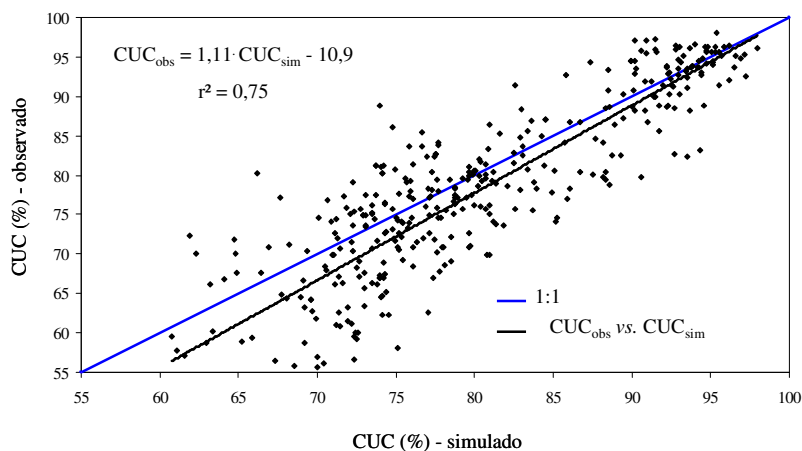


FIGURA 15. Relação dos valores de CUC observados nos ensaios de campo e simulados pelo modelo ajustado.

Na Figura 16 são mostrados os mesmos pares de valores da Figura 15, separados pelo agrupamento, correspondentes às diferentes condições operacionais, perfis adimensionais I, II, III e IV. Nota-se que, de maneira geral, o comportamento observado na Figura 15 se repete em cada um dos quatro perfis considerados. No entanto, o perfil IV apresentou valores de CUC mais dispersos em relação à reta 1:1, indicando que talvez fosse mais adequado ajustar separadamente os parâmetros do modelo com base em cada perfil.

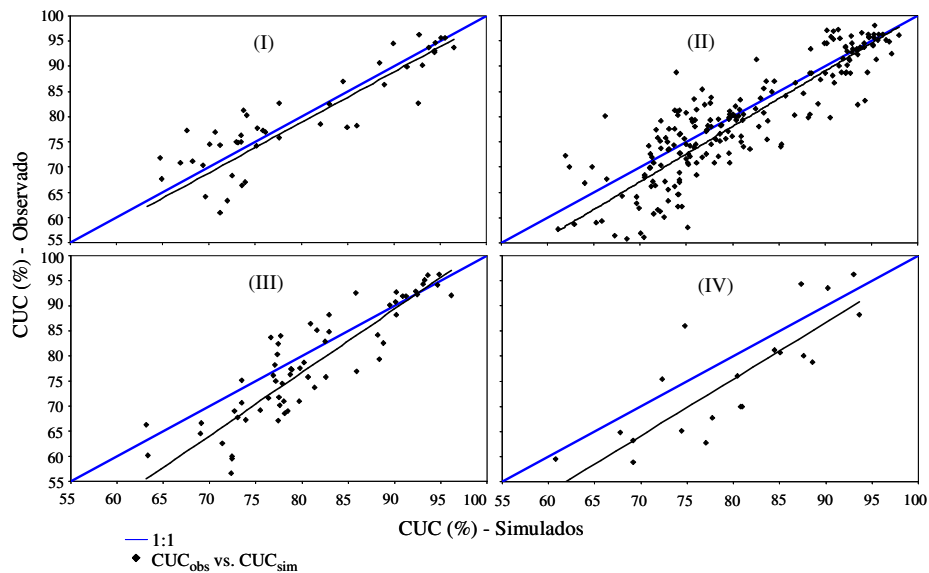


FIGURA 16. Relação dos valores de CUC observados nos ensaios de campo e simulados pelo modelo ajustado para os perfis adimensionais I, II, III e IV.

Na Figura 17, são apresentados, para os quatro perfis típicos de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250, os valores dos desvios absolutos (%) entre os valores de CUC (%) do modelo ajustado e o dos ensaios de campo em função do valores de CUC (%) do modelo ajustado.

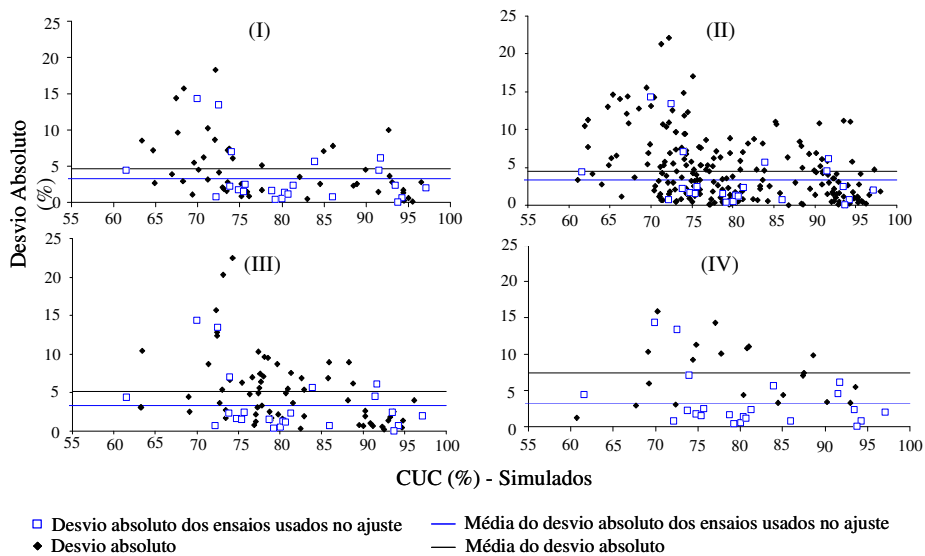


FIGURA 17. Relação do desvio absoluto (%) em função CUC (%) simulado com dados gerados pelo modelo ajustado (%).

O desvio médio absoluto para os três ensaios, agrupados no perfil II, que foram utilizados para ajuste dos parâmetros empíricos do modelo foi de 3,33%. O valor encontrado de desvio absoluto médio para os perfis I, II, III e IV foram, respectivamente, 4,62%, 4,55%, 5,15% e 7,35%, sendo o desvio absoluto médio para todas as simulações realizadas igual 4,75%, valor este superior a 2,7% encontrado por Montero et al. (2001), e 2% encontrado por de Vories et al. (1987). A análise dos desvios absolutos também indica que, com exceção do perfil IV, não houve um aumento expressivo no desvio absoluto em função do agrupamento.

4.4 Espaçamento e disposição do aspersor PLONA-RL250

4.4.1 Aspersores dispostos em arranjos quadrados

Na Figura 18 são mostrados, para os perfis típicos I, II, III e IV do aspersor PLONA-RL250, os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC em %), simulados para sistemas convencionais de irrigação, em função do espaçamento entre aspersores (% DM), quando sujeito a velocidades de vento variando desde 0 a 6 m.s⁻¹ e direções, perpendicular ou paralela, e 45° em relação à linha lateral de aspersores.

A comparação entre as superfícies de resposta localizadas à esquerda e a direita da Figura 18 indica que, na disposição quadrada, o posicionamento da linha lateral em relação à direção predominante do vento tem pouca influência sobre os valores de CUC, confirmando as observações de Azevedo et al. (2000), e Ptacek (1972).

A comparação entre as superfícies de respostas correspondentes a diferentes perfis típicos do aspersor PLONA-RL250 (diferentes linhas da Figura 18) mostra que a inclinação da linha de resposta correspondente ao CUC de 80% é menor nos perfis I e II, confirmando o menor grau de pulverização do jato de água propiciado pelas condições operacionais (Figura 7) que determinam a ocorrência destes perfis.

Exceto para o perfil I, a recomendação de espaçamento de 50% do diâmetro molhado, para disposição quadrada de aspersores (Keller & Bliesner, 1990 e Merkley & Allen, 2004), resultou em valores de CUC entre 75% e 80% para ventos de até, aproximadamente, 3 m.s⁻¹. Este valor de vento é inferior ao valor de até 4 m.s⁻¹, estabelecido por Bernardo et al. (2006) para uma disposição quadrada de aspersores no campo com espaçamentos entre 45% a 55% do diâmetro molhado. Estes resultados indicam que as recomendações de espaçamentos entre aspersores devem levar em conta a velocidade e o ângulo de

incidência do vento em relação à linha lateral e o grau de pulverização do jato de água, que está extremamente relacionado com o diâmetro de bocal e pressão de serviço.

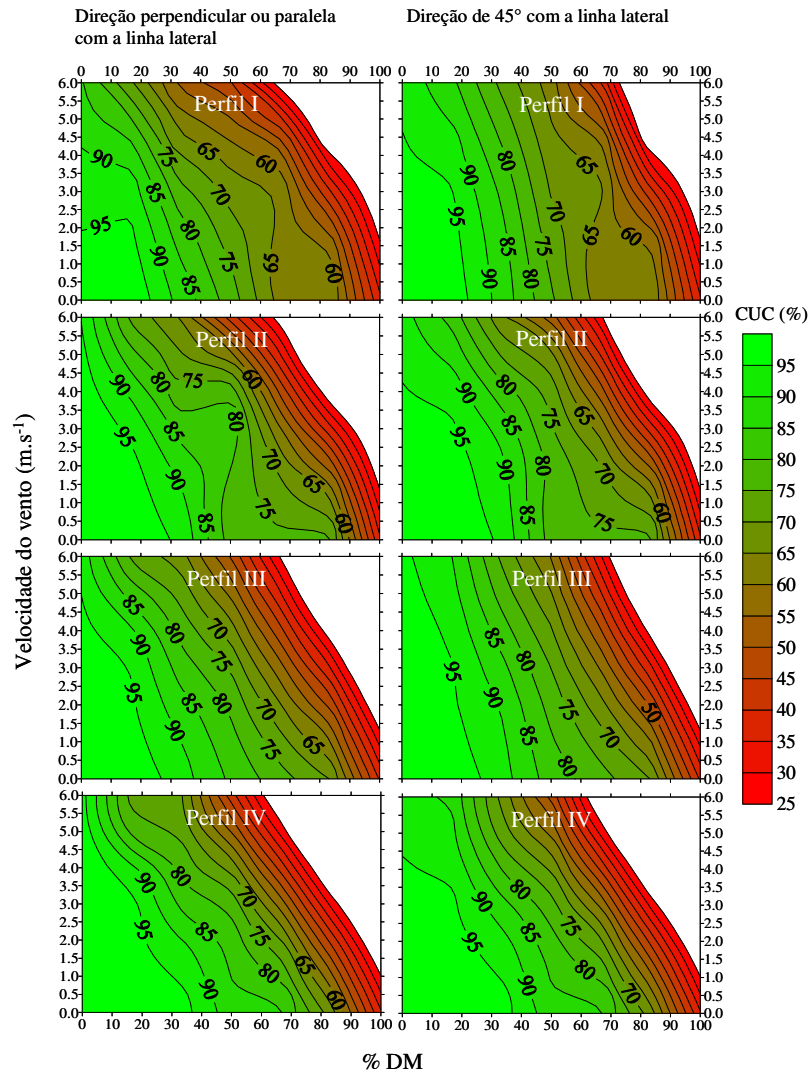


FIGURA 18. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), para arranjos quadrados, em função da velocidade do vento (m.s⁻¹) e do espaçamento entre aspersores (% DM).

4.4.2 Aspersores dispostos em arranjos retangulares

Na Figura 19 são mostrados, para os perfis I, II, III e IV, os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC em %), simulados para sistemas convencionais de irrigação, operando na ausência de vento, sob diferentes espaçamentos entre aspersores (% DM). Nesta figura, a linha pontilhada delimita as combinações de espaçamentos a partir das quais a sobreposição das áreas molhadas pelos aspersores adjacentes é incompleta, ou seja, as combinações de espaçamentos abaixo da linha pontilhada garantem um mínimo de sobreposição.

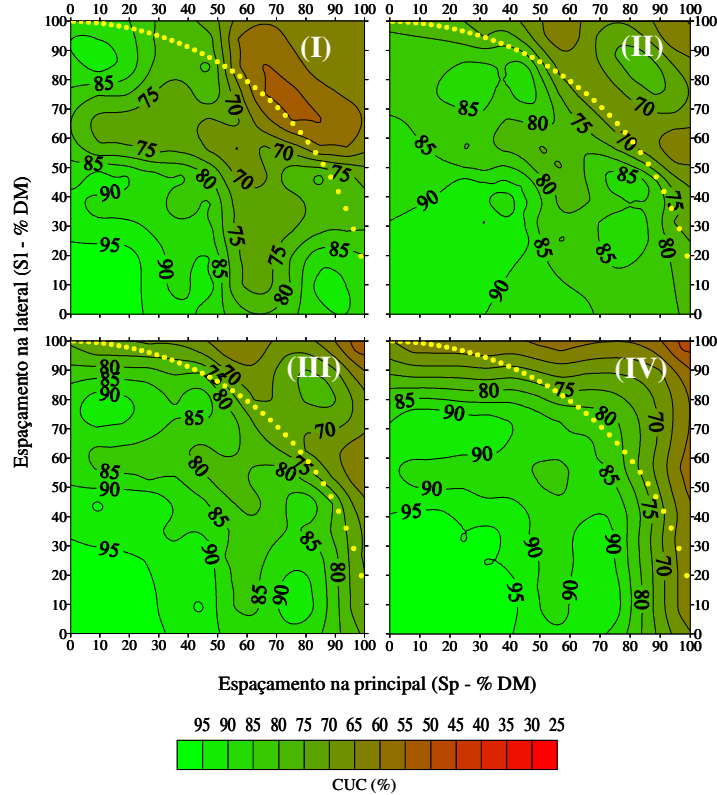


FIGURA 19. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), para arranjos retangulares, em função do espaçamento entre aspersores (% DM), para os perfis I, II, III e IV, em condições nulas de vento.

As superfícies de resposta da Figura 19 são semelhantes às apresentadas por Chen & Wallender (1984) para os perfis D e E descritos por Christiansen (1942). Justificando-se esta proximidade em função das semelhanças entre as formas geométricas dos perfis I, II, III e IV do aspersor PLONA-RL250 com os perfis teóricos D e E de Christiansen. Estas superfícies de respostas guardam simetria ao longo de uma linha imaginária de 45° (linha que determina os espaçamentos quadrados, $S_l = S_p$), que serve para mostrar a exatidão da rotina computacional utilizada na sobreposição dos padrões de aplicação de água dos aspersores adjacentes.

As superfícies de respostas da Figura 19 mostram que, exceto para o perfil I, a recomendação de Keller & Bliesner (1990) no sentido de se utilizar um arranjo retangular de aspersores que apresentam perfis teóricos do tipo D e E de Christiansen, um espaçamento de 40% x 80% do diâmetro molhado resultou em valores de CUC iguais ou superiores a 80%.

Coefficientes de uniformidade de Christiansen (CUC em %) simulados sob diferentes combinações de três velocidades (1,4 m.s⁻¹ (5 km.h⁻¹), 2,8 m.s⁻¹ (10 km.h⁻¹), e 4,2 m.s⁻¹ (15 km.h⁻¹)) e três direções de vento (perpendicular, 45° e paralelo à linha lateral de aspersores), em função do espaçamento (% DM) entre aspersores PLONA-RL250 com perfis radiais do tipo I, II, III e IV são apresentados, respectivamente, nas Figuras 20, 21, 22 e 23.

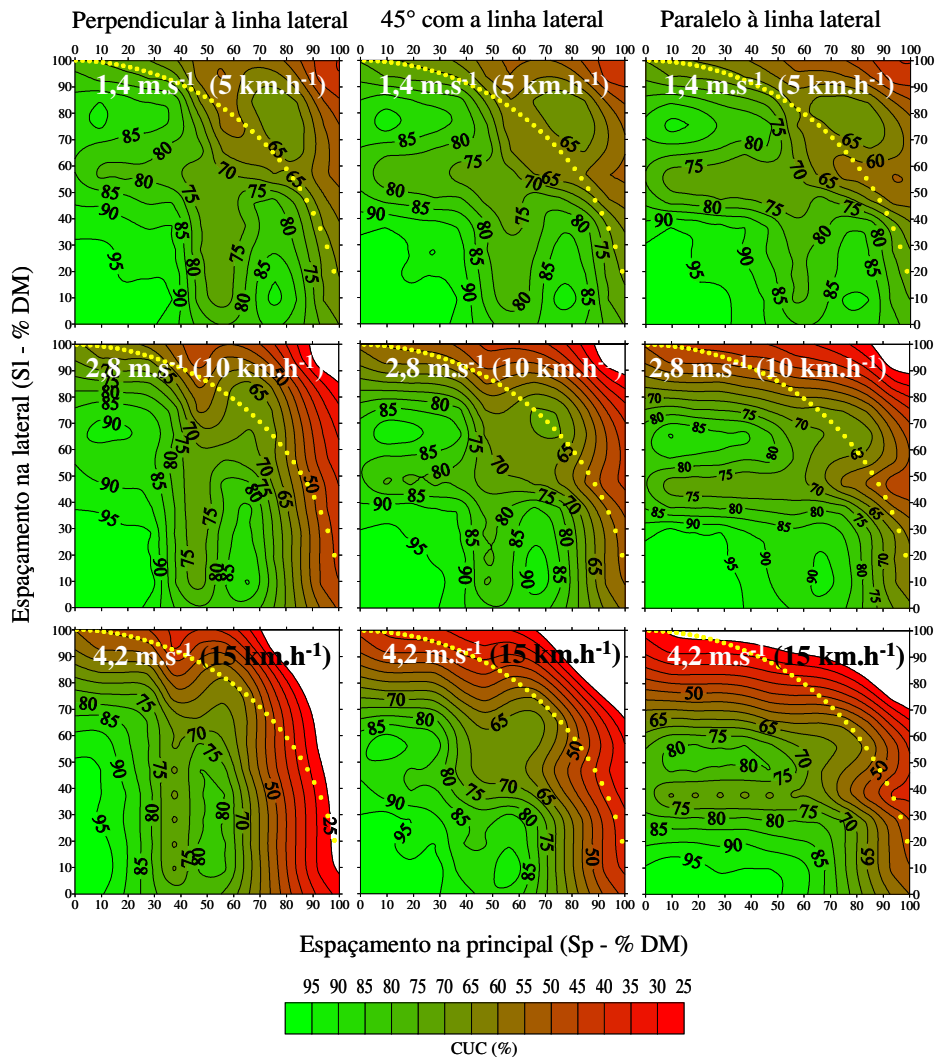


FIGURA 20. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), para arranjos retangulares, em função do espaçamento entre aspersores (% DM), para o perfil típico I do aspersor PLONA-RL250.

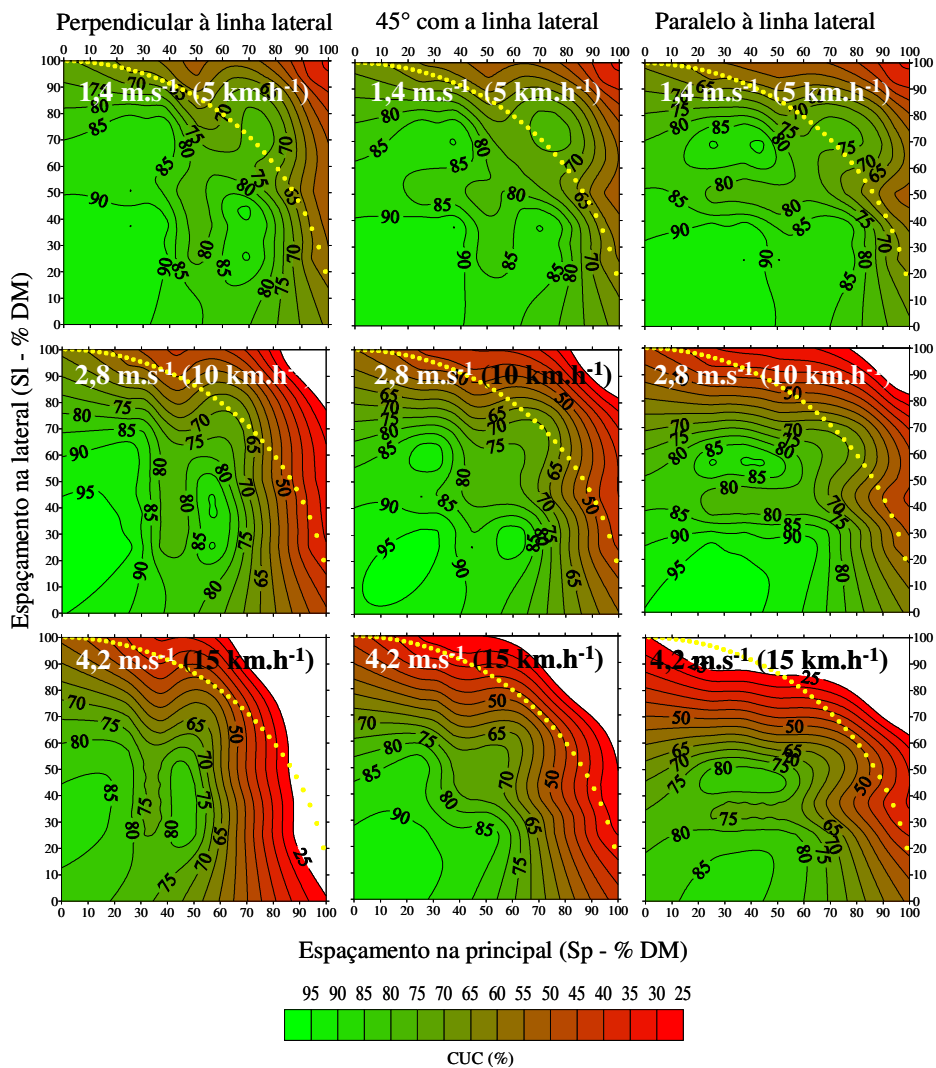


FIGURA 21. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), para arranjos retangulares, em função do espaçamento entre aspersores (% DM), para o perfil típico II do aspersor PLONA-RL250.

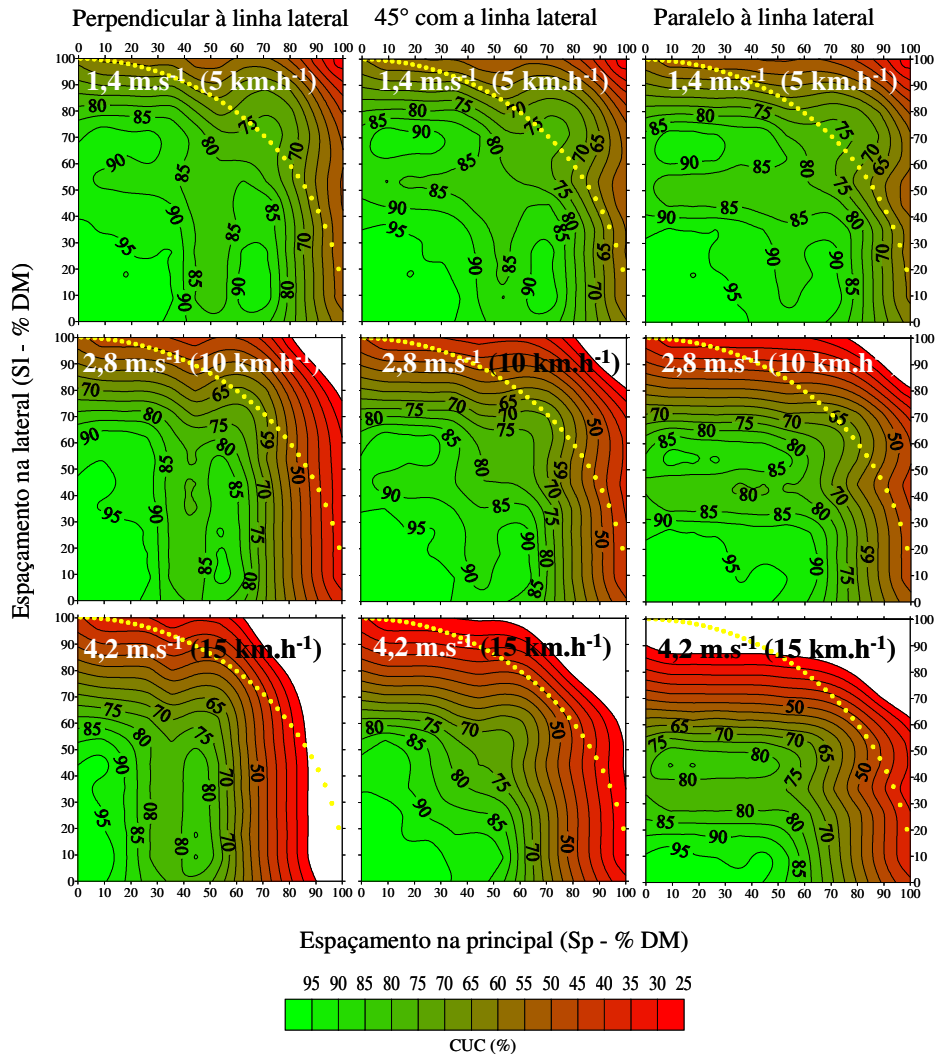


FIGURA 22. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), para arranjos retangulares, em função do espaçamento entre aspersores (% DM), para o perfil típico III do aspersor PLONA-RL250.

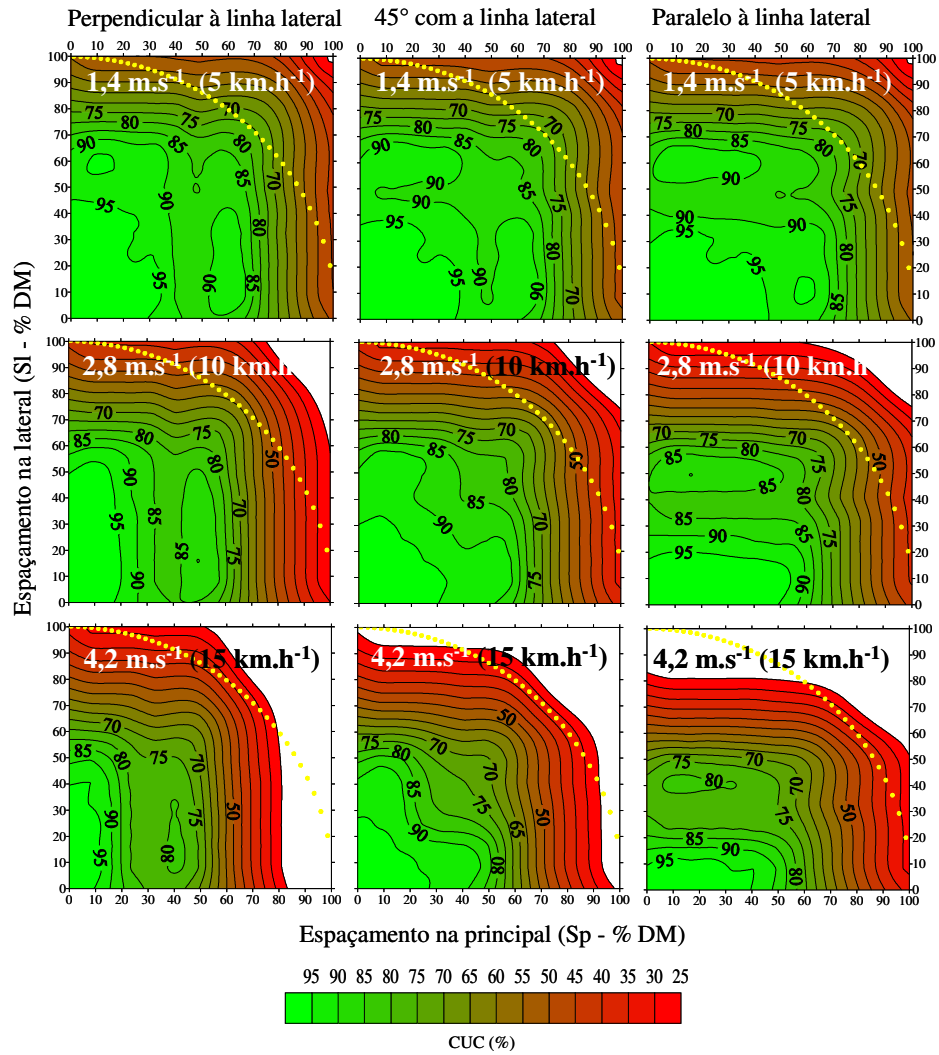


FIGURA 23. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), para arranjos retangulares, em função do espaçamento entre aspersores (% DM), para o perfil típico IV do aspersor PLONA-RL250.

De maneira geral, as comparações entre as três superfícies situadas na mesma linha (mesma velocidade de vento) indicam uma pequena variação dos valores de CUC em relação à direção de incidência do vento. No entanto, as superfícies de respostas situadas na extremidade direita das Figuras 20, 21, 22 e 23, que representam uma condição na qual o vento incide na direção paralela às linhas laterais, tendem a apresentar menores valores de uniformidade. Enquanto as superfícies de respostas situadas na extremidade esquerda das mesmas figuras, que representam uma condição na qual o vento incide na direção perpendicular às linhas laterais, tendem a apresentar maiores valores de uniformidade. Este comportamento está de acordo com o previsto por Shull & Dylla (1976), Azevedo et al. (2000) e Bernardo et al., (2006), os quais relatam que a melhor situação é aquela que permite uma incidência perpendicular do vento em relação às linhas laterais.

Os resultados mostrados nessas figuras demonstram que, para se obter valores de CUC próximo de 80% é necessário reduzir o espaçamento entre aspersores à medida em que a velocidade do vento aumenta.

Para velocidades moderadas de vento ($V < 1,4 \text{ m.s}^{-1}$) observa-se valores de CUC próximos de 80% com espaçamento entre aspersores de 40% x 80% do diâmetro molhado, confirmando os limites recomendados por Keller & Bliesner (1990) para os perfis D e E de Christiansen. Com velocidades de vento superiores a $1,4 \text{ m.s}^{-1}$ (5 km.h^{-1}) as simulações obtidas neste estudo mostram que, para manter o mesmo nível de uniformidade (CUC = 80%) e o mesmo espaçamento na lateral (40% DM), é necessário reduzir o espaçamento na linha principal (Sp) em aproximadamente 10% ou 15% para cada incremento de $1,4 \text{ m.s}^{-1}$ (5 km.h^{-1}) na velocidade do vento.

4.4.3 Aspersores dispostos em arranjos triangulares

Na Figura 24 são mostrados, para o perfil II, os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC em %), simulados para sistemas convencionais de irrigação, operando na ausência de vento, sob diferentes espaçamentos entre aspersores (% DM), com arranjos triangulares entre aspersores no campo.

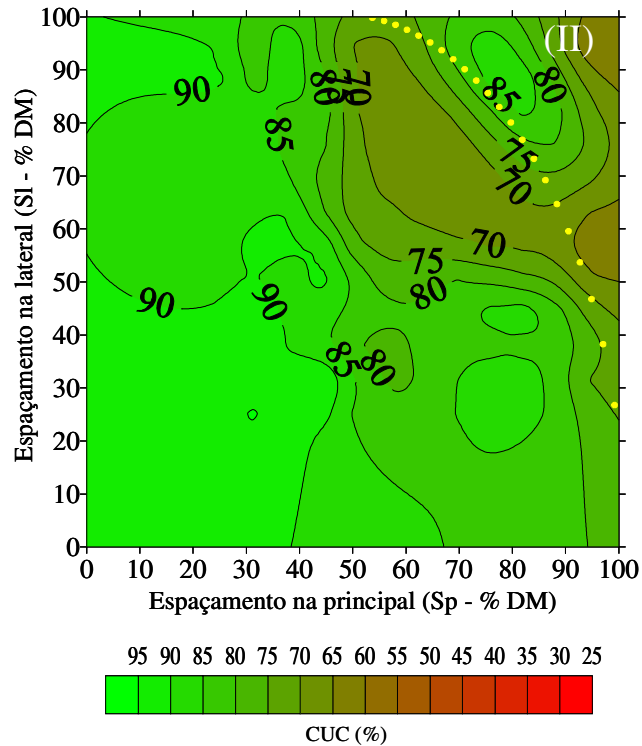


FIGURA 24. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), para arranjos triangulares, em função do espaçamento entre aspersores (% DM), para o perfil II, em condições nulas de vento.

As superfícies de resposta da Figura 24 são semelhantes às apresentadas por Chen & Wallender (1984) para o perfil E descrito por Christiansen (1942), confirmando-se mais uma vez as semelhanças entre o perfil teórico E de Christiansen e o perfil típico II do aspersor PLONA-RL250. Os bons resultados que se esperava obter no arranjo triangular com espaçamentos de 62% x 54% do diâmetro molhado, conforme recomendado por Merkley & Allen (2004), foram também confirmados pela superfície de resposta mostrada na Figura 24.

Conforme demonstrado na Figura 24, o arranjo triangular entre aspersores não resulta em uma superfície de resposta simétrica, indicando que, em termos de uniformidade, ao contrário do que foi observado no arranjo retangular, o espaçamento entre as linhas laterais (S_p) não é equivalente ao espaçamento entre aspersores na linha lateral (S_l). No caso do arranjo triangular os vazios abertos em função do aumento do espaçamento entre aspersores na lateral (S_l) podem ser cobertos quando o espaçamento entre linhas laterais é reduzido ($S_p < 40\%$). No arranjo triangular os vazios criados por um aumento no espaçamento entre laterais não podem ser compensados pela redução do espaçamento entre aspersores na linha lateral (S_l).

Na Figura 25 são mostradas superfícies de resposta dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC em %), correspondente ao perfil típico II do aspersor PLONA-RL250 (perfil utilizado na calibração das constantes do modelo de Richards & Weatherhead, 1993), em arranjo triangular, sob as mesmas condições de velocidade e direção do vento estudadas para os espaçamentos retangulares.

Com a incidência do vento na direção perpendicular à linha lateral de aspersores (coluna da esquerda), valores de CUC próximos de 80% são obtidos quando os espaçamentos na principal (S_p) não excedem 75%, 60% e 40% do diâmetro molhado para as velocidades de 1,4 m.s^{-1} , 2,8 m.s^{-1} e 4,2 m.s^{-1} respectivamente. Com a incidência da direção do vento de 45° em relação à

linha lateral, esses limites passam a ser 75%, 50% e 30% do diâmetro molhado para as mesmas velocidades de vento. Com a incidência do vento na direção paralela à linha lateral de aspersores (coluna da direita), para velocidades superiores a $2,8 \text{ m.s}^{-1}$, a região de CUC maior que 80% depende tanto de S_p quanto do S_l .

A comparação entre valores de CUC, para o perfil típico II, dos arranjos triangulares (Figura 25) com valores dos arranjos retangulares (Figura 21), indica que, para as mesmas condições de vento, quando $S_l > S_p$, os valores de CUC obtidos em arranjos triangulares são superiores àqueles obtidos em arranjos retangulares. No entanto, para as mesmas condições de vento, quando $S_p > S_l$ (situação prática mais desejada), não existem diferenças sensíveis entre valores de CUC obtidos com os arranjos triangulares e retangulares.

Usando os espaçamentos (S_l e S_p) inferior a 40% do diâmetro molhado, níveis bons de uniformidades são atingidos para todas as velocidades de vento estudadas, independente do posicionamento da linha lateral em relação à direção do vento, e da disposição dos aspersores no campo, estando de acordo com Keller & Bliesner (1990).

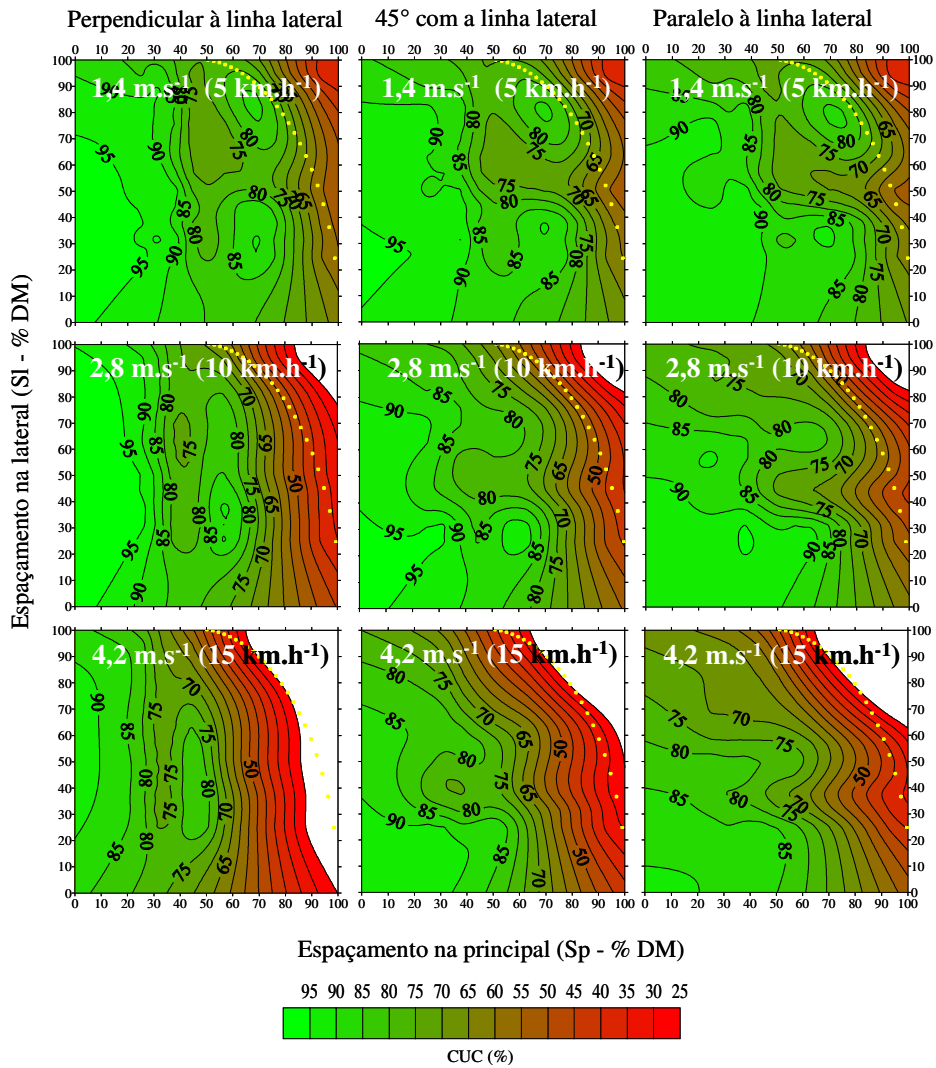
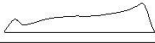


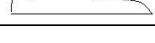


FIGURA 25. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC em %), para arranjos triangulares, em função do espaçamento entre aspersores (% DM), para o perfil típico II do aspersor PLONA-RL250.

4.5 Recomendações de uso do aspersor PLONA-RL250 em sistemas convencionais de irrigação

Com base nas simulações realizadas pode-se estabelecer as recomendações gerais de uso do aspersor PLONA-RL250 mostradas na Tabela 3. Tendo em vista a pouca influência do posicionamento da linha lateral em relação à direção do vento, este dado não consta na mesma, mas fatores importantes como o tipo do perfil e velocidade de vento foram considerados.

TABELA 3. Recomendações de espaçamentos, em função da porcentagem do diâmetro molhado, com arranjos em quadrado, retângulo e triângulo do aspersor PLONA-RL250.

Perfil	Forma geométrica	Recomendações de espaçamento (% do diâmetro molhado)									
		Quadrado				Retângulo			Triângulo		
		Vento (m.s ⁻¹)				Vento (m.s ⁻¹)			Vento (m.s ⁻¹)		
0 a 1,4	1,4 a 2,8	2,8 a 4,2	> 4,2	0 a 1,4	1,4 a 2,8	2,8 a 4,2	0 a 1,4	1,4 a 2,8	2,8 a 4,2		
I		45	40	<40	< 40	40 x 80	40 x 65	40 x 50	-	-	-
II		50	50	40	< 40	40 x 80	40 x 65	40 x 50	80 x 70	80 x 60	55 x 45
III		55	50	40	< 40	40 x 75	40 x 65	40 x 50	-	-	-
IV		60	50	40	< 40	40 x 75	40 x 60	< 40	-	-	-
Recomendações gerais PLONA-RL250		55	50	40	< 40	40 x 78	40 x 65	40 x 50	80 x 70	80 x 60	55 x 45

5 CONCLUSÕES

Os valores ajustados dos parâmetros empíricos do modelo de Richards & Weatherhead (1993) permitiram reproduzir de forma bastante satisfatória a distorção do padrão de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250 operado sob diferentes condições de vento.

As simulações de uniformidade, de sistemas convencionais de irrigação por aspersão operando sob diferentes condições de vento, fornecidas pelo modelo ajustado foram bastante precisas. Valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen gerados pelo modelo ajustado apresentaram um desvio absoluto médio de 4,75% em relação a valores de ensaios de campo.

As superfícies de repostas da uniformidade de aplicação de água obtidas nas simulações permitiram identificar as melhores estratégias para atingir níveis adequados de uniformidade, mesmo em condições de vento. De maneira geral, observou-se que: (i) a direção do vento exerce pouca influência sobre os valores de CUC; (ii) quanto maior a velocidade de vento, menor a uniformidade de aplicação de água e, portanto, menor deve ser o espaçamento entre aspersores no campo; (iii) comparando arranjos retangulares e triangulares de aspersores, observou-se uma melhora na uniformidade de distribuição somente quando o espaçamento entre aspersores na linha lateral (Sl) é maior que o espaçamento entre linhas laterais ao longo da linha principal (Sp).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Standard S398.1, ASAE**: procedure for sprinkler testing and performance reporting. St Joseph, 1998.

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

ALLEN, R.G. **Catch-3D sprinkler pattern analysis software**: user's manual. Logan, Utah: Department of Biological and Irrigation Engineering, Utah State University, 1992. 14 p.

AZEVEDO, H. J.; BERNARDO, S.; RAMOS, M. M.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R. Influência de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p.152-158, maio/ago. 2000.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BERNUTH, R. D. von. Uniformity design criteria under limited water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 26, n. 5, p. 1418-1421, Sept./Oct.1983.

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.

CHEN, D.; WALLENDER, W. W. Economic sprinkler selection, spacing and orientation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 27, n. 3, p. 737-743, May/June 1984.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by Sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942. 124 p. (Bulletin 670).

CRIDDLE W. D., DAVIS, S., PAIR, C. H., SHOCKLEY, D. G. **Methods for evaluating irrigation systems**. Washington: SCS-USDA, 1956. 24 p. (Agricultural Handbook, 82).

FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. Avaliação de sistemas de irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, 703 p.

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, Sep. 2003.

HART, W. E. Overhead irrigation pattern parameters. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 42, n.7, p. 354-355, July 1961.

HILL, R. W.; KELLER, J. Irrigation system selection for maximum profit. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 23, n. 2, p. 366-372, Mar./Apr. 1980.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7749-2. **Irrigation equipment - Rotating sprinklers** – part 2: Uniformity of distribution and test methods. Switzerland, 1990. 6 p.

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

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

MERKLEY, G. P. **Catch-3D sprinkler pattern analysis software: user's guide**. Logan, Utah: BIED/Utah State University, 2004. 48 p.

MERKLEY, G. P.; ALLEN, R. G. **Sprinkle & Trickle Irrigation: lecture notes**. Logan: BIED/Utah State University, 2004. 286 p.

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.

NAANDANJAIN (2007). **NaanDan/NaanCAT Irrigation Irrigation Software**: version 9.5. 2007. Disponível em: <http://www.naan.co.il/e/Knowledge_Desk/Field_Crop_Knowledge/Sprinkler_Irrigation___Can_its_efficiency_be_improved.htm>. Acesso em: 21 nov. 2007.

OLIPHANT, J. C. **SpacePro installation and operation manual**. Fresno, CA: Center for Irrigation Technology (CTI)/California State University, 2003. Disponível em: <<http://cati.csufresno.edu/CIT/software/>>. Acesso em: 21 nov. 2007.

ORTEGA, J. F.; JUAN, J. A.; TARJUELO, J. M. Evaluation of the water cost effect on water resource management: application to typical crops in a semiarid region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 125-144, Apr. 2004.

PEREIRA, G. M. Aspersão Convencional. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, 703 p.

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 técnica do aspersor PLONA-RL300. **Irriga**, Botucatu, v.10, n.1, p. 53 -63, jan/abr. 2005.

PTACEK, L. R. **Evaluation of wind effects as sprinkler pattern stability and spacing criteria**. 1972. 100 p. Master of Science – Utah State University, Logan.

RICHARDS, P. J.; WEATHERHEADT, E. K. Prediction of Raingun Application Patterns in Windy Conditions. **Journal Agricultural Engineering Research**, London, v. 54, n. 4, p. 281-291, Apr. 1993.

ROCHA, E. M. de M.; COSTA, R. N. T.; MAPURUNGA, S. M. da S.; CASTRO, P. T. de. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície e no perfil do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p.154-160, maio/ago. 1999.

SEGINER, I.; KANTZ, D.; NIR, D.; VON BERNUTH, R. D. Indoor measurement of single-radius sprinkler patterns. **Transactions of the American society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 35, n. 2, p. 523-533, Mar./Apr. 1992.

SENNINGER Irrigation's WinSIPP Software. Disponível em: <<http://www.senninger.com/pages/software.html>>. Acesso em: 21 nov. 2007.

SOCCOL, O. J.; ULLMANN, M. N.; RODRIGUES, L. N.; SAVIAN, M. Uniformidade de aplicação de água de irrigação com canhão hidráulico sob diferentes disposições e espaçamentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004, São Pedro. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2004.

SOLOMON, K. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test result. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 22, n. 5, p. 1078-80-1086, Sept./Oct. 1979.

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

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**, St. Joseph, v. 19, n. 3, p. 501-504, may/June 1976.

TARJUELO, J. M. **El Riego por Aspersión y su Tecnología**. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. 581 p.

TARJUELO, J. M.; MONTEIRO, J.; CARRIÓN, P. A.; HONRUBIA, F. T.; CALVO, M. A. Irrigation uniformity with medium size sprinklers part II: Influence of wind and other factors on water distribution. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 42, n. 3, p. 677-689, May/June 1999.

TOMAZELA, C. **Otimização do uso de um aspersor tipo canhão em função das características operacionais e velocidade média do vento**. 1996. 59 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola superior de agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

TOU, J.; GONZALES, R. C. **Pattern recognition principle**. London: Addoson-Wesley, 1974. 377 p.

VORIES, E. D.; BERNUTH, R. D. von. Single nozzle sprinkler performance in wind. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, Michigan, v. 29, n. 5, p. 1325-1330, Sep./Oct.1986.

VORIES, E. D.; ASCE, S. M.; BERNUTH, R. D. von. Simulating sprinkler performance in wind. **Journal of Irrigation and Drainage engineering**, New York, v. 113, n. 1, p. 119-130, Feb. 1987.

WILCOX, J.C.; SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some under tree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, Ottawa, v. 27, n. 11, p. 565-583, Nov. 1947.

WILSON, T. P.; ZOLDOSKE, D. F. **Evaluating Sprinkler irrigation Uniformity**. Fresno, CA: CATI, 1997. Disponível em: <<http://cati.csufresno.edu/CIT/rese/97/970703/>>. Acesso em: 15 Fev. 2008.

ANEXOS

Página

TABELA 1A. Valores de vazão, raio de alcance, e ocorrência dos perfis típicos (I, II, III, IV), em função das combinações de diâmetro de bocal e pressão de serviço para o canhão PLONA-RL250. 69

TABELA 2A. Variação da velocidade e direção do vento para os 53 ensaios de campo, em função das diferentes combinações entre pressão de serviço e diâmetro dos bocais do aspersor PLONA-RL250. 71

TABELA 3A. Fração intensidade média de aplicação de água em função da fração do raio de alcance para os quatro perfis típicos do aspersor PLONA-RL250. 73

TABELA 4A. Distâncias relativas entre o aspersor e a extremidade da área molhada tomada nos sentidos a favor (RA), contra (RC) e perpendicular (RP) à direção do vento. 74

TABELA 1A. Valores de vazão, raio de alcance, e ocorrência dos perfis típicos (I, II, III, IV), em função das combinações de diâmetro de bocal e pressão de serviço para o canhão PLONA-RL250.

Pressão	Bocal		Bocal Principal										
	Serviço	Auxiliar	14 mm			16 mm			18 mm			20 mm	
(kPa)	(mm)	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil típico	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil típico	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil típico	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil típico
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 típico	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil típico	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil típico	R (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	Perfil típico
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, em função das diferentes combinações entre pressão de serviço e diâmetro dos bocais do aspersor PLONA-RL250.

Nº do ensaio	Bocal	Pressão	Velocidade	Desvio	Direção	Desvio
	(mm)	(kPa)	do vento (m.s ⁻¹)	Padrão (Velocidade)	do vento (graus)	Padrão (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

...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)
31	16x7	490	3,13	0,94	12,6	17,30
32	18x0	392	2,03	0,98	340,5	21,09
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 intensidade média de aplicação de água em função da fração do raio de alcance 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 nos sentidos a favor (RA), contra (RC) e perpendicular (RP) à direção do vento.

Ensaio	Bocal (mm)	Pressão (kPa)	Velocidade		Distâncias				
			Vento	Direção	RA/R	RC/R	RP _D /R	RP _E /R	RP/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

...continua...

TABELA 4A, Cont.

Ensaio	Bocal (mm)	Pressão (kPa)	Velocidade		Distâncias				
			Vento	Direção	RA/R	RC/R	RP _D /R	RP _E /R	RP/R
			(m.s ⁻¹)	(graus)	%	%	%	%	%
31	16 x 6	392	2,79	2,40	97,91	87,20	71,90	79,55	75,72
32	16 x 6	392	2,61	344,6	107,08	90,26	85,67	91,79	88,73
33	16 x 7	392	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
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

...continua...

TABELA 4A, Cont.

Ensaio	Bocal	Pressão	Velocidade		Distâncias				
			Vento	Direção	RA/R	RC/R	RP _D /R	RP _E /R	RP/R
			(m.s ⁻¹)	(graus)	%	%	%	%	%
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
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
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