



**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA  
SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA  
PELO ASPERSOR PLONA-RL300 EM  
SISTEMAS AUTOPROPULIDOS DE  
IRRIGAÇÃO**

**GIULIANI DO PRADO**

**2004**

58457  
049993

**GIULIANI DO PRADO**

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DA  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PELO ASPERSOR PLONA-RL300 EM  
SISTEMAS AUTOPROPELIDOS DE IRRIGAÇÃO**

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

Orientadores

Dr. Luis Artur Alvarenga Vilela  
(*in memorian*)

M.Sc. Alberto Colombo

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRA  
2004

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

Prado, Giuliani do

Aplicativo computacional para simulação da distribuição de água pelo  
aspersor PLONA-RL300 em sistemas autopropelidos de irrigação / Giuliani  
do Prado. -- Lavras : UFLA, 2004.

86 p. : il.

Orientadores: Luis Artur Alvarenga Vilela e Alberto Colombo

Dissertação (Mestrado) - UFLA.

Bibliografia.

1. Simulação. 2. Autopropelido. 3. Distribuição de água. 4. Uniformidade. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.587

**GIULIANI DO PRADO**

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DA  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PELO ASPERSOR PLONA-RL300 EM  
SISTEMAS AUTOPROPELIDOS DE IRRIGAÇÃO**

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

**APROVADA em 23 de julho de 2004**

**Prof. Dr. Eli Ferreira**

**UFLA**

**Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho**

**UFLA**

**Prof. Dr. Luis Artur Alvarenga Vilela e Prof. M.Sc. Alberto Colombo**  
*(in memorian)*

**UFLA**  
**(Orientadores)**

**LAVRAS**  
**MINAS GERAIS - BRASIL**

Aos meus pais, Eraldo e Adelina,

pela educação e ensinamentos recebidos;

Aos meus irmãos, João César, Eraldo Jr. e Angélica,

pelo companheirismo e amizade;

### **OFEREÇO**

Ao prof. e Amigo Mario Nestor Ullmann, que pelo seu profissionalismo e dedicação ao ramo da Hidráulica, Irrigação e Drenagem, estimulou-me a trabalhar nesta área.

### **DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras por oferecer a oportunidade de realização do curso.

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

Aos professores Alberto Colombo e Luis Artur Alvarenga Vilela pelas orientações e auxílio na realização deste trabalho.

Aos professores Eli Ferreira e Jacinto de Assunção Carvalho, membros da banca examinadora, pelas sugestões e observações.

Aos professores do Departamento de Engenharia pelos ensinamentos.

Aos professores Mario Nestor Ullmann e Olívio José Soccol, da Universidade do Estado de Santa Catarina, pelo incentivo.

À Empresa PLONA Equipamento de Curitiba - PR, na pessoa de Arno Bernert, por disponibilizar o aspersor RL300 para os ensaios técnicos.

À Empresa Metal Lavras de Lavras - MG, na pessoa de Werner Ederer, por disponibilizar o aspersor Big River para a validação do aplicativo computacional.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica.

Aos colegas do curso de pós-graduação pela amizade.

Aos meus colegas de república, Cassiano, Ricardo, Leandro, Geraldo e Pedro, com os quais convivi durante a realização do curso.

## **BIOGRAFIA**

Giuliani do Prado, filho de Adelina Krainski do Prado e Eraldo do Prado, nasceu em 08 de novembro de 1976, em Rio Negrinho - SC.

Em 1995 concluiu o segundo grau no Colégio Estadual Marta Tavares, em Rio Negrinho - SC. Ingressou no curso de Agronomia da Universidade do Estado de Santa Catarina, em Lages - SC, em agosto de 1996.

Durante a graduação foi monitor de Botânica Agrícola, bolsista de Iniciação Científica na área de Fitopatologia Agrícola e estagiário do Laboratório de Hidráulica e Irrigação. Também participou de estágios extracurriculares na área de irrigação nas Empresas IRRIGABRASIL e PLONA Equipamentos, situadas em Curitiba - PR. Graduou-se Engenheiro Agrônomo em julho de 2001.

Trabalhou como professor colaborador nas disciplinas de Hidráulica I e II, Topografia I e Física Geral no curso de Agronomia da Universidade do Estado de Santa Catarina, em Lages - SC, durante o período de agosto de 2001 a dezembro de 2002.

No mês de março de 2003 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras - MG, área de concentração em Irrigação e Drenagem, concluindo-o em julho de 2004.

## SUMÁRIO

|  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| RESUMO .....   | i             |
| ABSTRACT .....   | iii           |
| 1 INTRODUÇÃO .....   | 1             |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO.....   | 3             |
| 2.1 Irrigação por aspersão do tipo autopropelido .....                     | 3             |
| 2.2 Ensaio e tratamento de perfis de distribuição de água .....            | 4             |
| 2.3 Uniformidade de aplicação de água .....                                | 7             |
| 2.3.1 Importância e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)..... | 7             |
| 2.3.2 Fatores que influenciam a uniformidade de autopropelidos.....        | 9             |
| 2.4 Simulação da uniformidade de aplicação de água.....                    | 11            |
| 2.5 Validação dos modelos de simulação da uniformidade .....               | 14            |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS.....  | 16            |
| 3.1 Caracterização técnica do aspersor.....                                | 16            |
| 3.1.1 Aspersor avaliado.....   | 16            |
| 3.1.2 Bancada de ensaios.....  | 16            |
| 3.1.3 Ensaio de avaliação.....   | 17            |
| 3.1.4 Processamento dos resultados de ensaio .....                         | 19            |
| 3.2 Aplicativo computacional para simulação da uniformidade .....          | 22            |
| 3.2.1 Caracterização do aplicativo.....                                    | 22            |
| 3.2.2 Uniformidade de aplicação de água com trajetória infinita.....       | 24            |
| 3.2.2.1 Perfil móvel de aplicação de água com trajetória infinita .....    | 24            |
| 3.2.2.2 Perfil sobreposto e uniformidade de aplicação de água .....        | 27            |
| 3.2.3 Uniformidade de aplicação de água com trajetória finita.....         | 29            |
| 3.2.3.1 Perfis móveis de aplicação de água com trajetória finita .....     | 29            |
| 3.2.3.2 Perfis sobrepostos e uniformidade de aplicação de água .....       | 34            |
| 3.3 Validação do aplicativo computacional.....                             | 36            |

|   |    |
|---|----|
| 3.3.1 Validação analítica do aplicativo computacional.....          | 36 |
| 3.3.2 Validação experimental do aplicativo computacional.....       | 38 |
| 3.4 Simulações para recomendações do aspersor PLONA-RL300 .....     | 40 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                      | 41 |
| 4.1 Caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300 .....            | 41 |
| 4.1.1 Vazão e raio de alcance .....                                 | 41 |
| 4.1.2 Perfis radiais de distribuição de água típicos .....          | 42 |
| 4.2 Aplicativo computacional para simulação da uniformidade .....   | 46 |
| 4.2.1 Instalação do aplicativo .....                                | 46 |
| 4.2.2 Janela principal.....   | 47 |
| 4.2.3 Simulações da uniformidade de aplicação de água .....         | 47 |
| 4.2.3.1 Características técnicas do aspersor .....                  | 47 |
| 4.2.3.2 Perfil móvel de aplicação de água.....                      | 48 |
| 4.2.3.3 Uniformidade na região central da faixa irrigada.....       | 49 |
| 4.2.3.4 Uniformidade nas extremidades e em toda faixa irrigada..... | 50 |
| 4.2.4 Ajuda do programa.....  | 51 |
| 4.3 Validação do aplicativo computacional.....                      | 52 |
| 4.3.1 Validação analítica do aplicativo computacional .....         | 52 |
| 4.3.2 Validação experimental do aplicativo computacional.....       | 54 |
| 4.4 Recomendações de uso do aspersor PLONA-RL300.....               | 58 |
| 4.4.1 Ângulo de giro e espaçamento entre carregadores .....         | 58 |
| 4.4.2 Estratégias para as extremidades da faixa irrigada.....       | 60 |
| 5 CONCLUSÕES.....   | 65 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                    | 66 |
| ANEXOS A.....   | 72 |
| ANEXOS B .....  | 84 |

## RESUMO

PRADO, Giuliani. **Aplicativo computacional para simulação da distribuição de água pelo aspersor PLONA-RL300 em sistemas autopropelidos de irrigação.** LAVRAS: UFLA, 2004. 86p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem) \*

O objetivo principal deste trabalho foi demonstrar a utilização de resultados de ensaio do aspersor PLONA-RL300 e simulações em computador para projetar sistemas autopropelidos de irrigação. As determinações de vazão, raio de alcance e perfil radial de distribuição de água do aspersor foram realizadas para quarenta e cinco combinações diferentes de diâmetros do bocal principal e pressões de serviço. Os valores de vazão ( $Q$  em  $m^3 \cdot h^{-1}$ ) e raio de alcance ( $R$  em m) foram relacionados ao diâmetro do bocal ( $b$  em mm) e à pressão de serviço ( $p$  em kPa) através das equações:  $Q = 0,00145 \cdot b^{2,189} \cdot p^{0,504}$  ( $r^2 = 0,9963$ ) e  $R = 0,553 \cdot b^{0,533} \cdot p^{0,436}$  ( $r^2 = 0,9525$ ). Os perfis radiais foram adimensionalizados e submetidos à análise de agrupamento (método “K-Means”), que indicou a ocorrência de perfis radiais com três formatos geométricos distintos. O aplicativo computacional escrito, em *Visual Basic 6*, e validado simula a uniformidade de aplicação de água, na condição de ausência de ventos, em sistemas autopropelidos de irrigação equipados com o aspersor PLONA-RL300. O aplicativo permite fazer de forma rápida uma análise das diferentes combinações de diâmetro de bocal, pressão de serviço, ângulo de giro do aspersor, espaçamento de carreadores (entre  $R$  e  $1,8R$ ) comprimento do carreador, tempos de parada nas extremidades do carreador e comprimento efetivamente irrigado de faixa. Valores de lâminas aplicadas, simuladas pelo aplicativo, foram comparados analiticamente e experimentalmente. Os valores de lâminas aplicadas, computadas analiticamente, foram gerados para o aspersor em deslocamento linear, com velocidade constante, operando com ângulos de giro de  $270^\circ$  e  $360^\circ$  e produzindo um perfil radial teórico triangular. As lâminas aplicadas, geradas analiticamente e pelo aplicativo, foram iguais. As lâminas de irrigação produzidas pelo aplicativo e observadas nos testes de campo apresentaram um coeficiente de determinação médio de 91,27%. Nas comparações entre os valores de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), simulados e observados, verificou-se um erro relativo médio de 3,57%. As simulações da uniformidade de aplicação de água foram analisadas com três grupos de perfis radiais, com as condições operacionais que determinam a ocorrência de uma mesma forma geométrica do perfil radial adimensional de distribuição de água do aspersor PLONA-RL300. Nos três grupos considerados, observou-se que espaçamentos entre carreadores em torno de 80% do diâmetro

molhado proporcionaram os maiores valores de CUC e que o ângulo de giro de 240° apresenta valores de CUC mais adequados que o ângulo de 270°, recomendado pelos projetistas. Nas simulações, verificou-se que tempos de paradas nas extremidades do carreador são necessários para melhorar a uniformidade de aplicação na faixa irrigada.

---

\* Comitê Orientador: Luis Artur Alvarenga Vilela - UFLA e Alberto Colombo - UFLA (Orientadores).

## ABSTRACT

PRADO, Giuliani. **Computer application for simulation of water distribution from the PLONA-RL300 sprinkler in traveler irrigation systems.** LAVRAS: UFLA, 2004. 86p. (Dissertation - Master of Science in Agricultural Engineering, Irrigation and Drainage)

The main objective of this work was to demonstrate the use of gun-type sprinkler, PLONA RL300, evaluation data and computer simulations on the design of traveler irrigation systems. Sprinkler flow rate, radius of throw and water distribution curve were evaluated at forty-five different combinations of sprinkler nozzle diameter and operating pressure. Sprinkler flow rate ( $Q$  in  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) and sprinkler radius of throw ( $R$  in m), observed at different combinations of nozzle size ( $b$  in mm) and operating pressure ( $p$  in kPa), were used to fit the following equations:  $Q = 0.00145 \cdot b^{2.189} \cdot p^{0.504}$  ( $r^2 = 0.9963$ ) and  $R = 0.553 \cdot b^{0.533} \cdot p^{0.436}$  ( $r^2 = 0.9525$ ). Water distribution curves were normalized and submitted to clustering analysis (K-Means algorithm), identifying the occurrence of normalized distribution curves with three different geometric shapes. A *Visual Basic 6* computer program was developed and tested to simulate application water uniformity, under no wind conditions, from traveler irrigation machines equipped with the PLONA RL300 sprinkler. The program was developed to provide a rapid method to analyze many design alternatives involving different combinations of main nozzle diameter, operating pressure, sprinkler angle of operation, towpath spacing (from  $R$  to  $1.8R$ ), towpath length, standing times at the towpath ends, and total length of the effectively irrigated strip. Computer simulations were compared with both analytical and actual field test data. Analytical data were generated considering a sprinkler with a theoretical triangular radial water distribution profile moving along a linear trajectory with a constant velocity and two different operating angles ( $270^\circ$  and  $360^\circ$ ). Analytical and computer simulated values showed a perfect match. Irrigation depth values predicted by the program and observed at field trials showed a 91.27% coefficient of determination. Comparisons between Christiansen Coefficient of Uniformity (CUC) values simulated by the program and observed at field trials showed a mean relative error of 3.57%. The performance of the PLONA RL300 gun-type sprinkler in traveler irrigation machines was evaluated based on computer simulations. Simulated values of water application uniformity were divided in three different groups, according to the geometric shape assumed by the sprinkler distribution curve as determined by operating conditions. For all three groups, it was observed that the highest values of CUC were obtained with towpath spacings around 80% of sprinkler's

wetted diameter and that CUC values obtained with the PLONA RL300 sprinkler operating with a 240° angle are well above the ones obtained with usually recommended 270° angle. The simulations also showed that standing times at the towpath ends improve water application uniformity at the borders of the irrigated strip.

- 
- \* Guidance Committee: Luis Artur Alvarenga Vilela - UFLA and Alberto Colombo - UFLA (Major Professor).

# 1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola vem se tornando cada vez mais uma atividade empresarial, forçando produtores rurais a alcançarem altos índices produtivos, com máxima eficiência técnica e econômica.

A irrigação é uma técnica que propicia um aumento da produtividade agrícola em regiões onde ocorre déficit hídrico em determinadas épocas do ano, como é o caso das regiões sul e sudeste, ou em regiões onde a falta de água para as culturas é freqüente, como na região nordeste do país.

O método de irrigação por aspersão é o segundo mais empregado em nosso país devido à facilidade de operação, à boa uniformidade de aplicação de água e à elevada eficiência de irrigação. A evolução da aspersão convencional permitiu, além da sua melhoria, o desenvolvimento da irrigação por aspersão mecanizada, que oferece as vantagens de reduzir o custo com mão-de-obra e aumentar a jornada de trabalho dos equipamentos.

A irrigação mecanizada tipo autopropelido constitui-se basicamente de um aspersor, tipo canhão hidráulico ou barra irrigadora, uma mangueira de polietileno de média densidade e um carretel enrolador, sendo normalmente acionado por um mecanismo de propulsão tipo turbina hidráulica. Este sistema de irrigação apresenta alto consumo de energia, devido à grande perda de carga no mecanismo de propulsão e mangueira, bem como elevada pressão de serviço exigida pelo aspersor. Apesar disto, este sistema ainda é muito empregado por produtores rurais, na irrigação de culturas de grande porte e capineiras, bem como na aplicação de subprodutos da indústria canavieira, tal como a vinhaça.

Para os sistemas de irrigação de modo geral, um dos fatores que refletem sua qualidade é a uniformidade de aplicação de água na área irrigada, sendo este parâmetro normalmente representado por um coeficiente de uniformidade

estatístico, ao qual é atribuído um valor aceitável para cada sistema de irrigação. Também para a irrigação, a uniformidade de aplicação de água deve ser entendida como um elemento decisório, principalmente no processo de planejamento e operação do sistema de irrigação, sendo que este elemento muitas vezes tem reflexo na produção da área cultivada.

A determinação, em campo, dos coeficientes de uniformidade de aplicação de água para os sistemas de irrigação é um procedimento que exige grande dispêndio de tempo e mão-de-obra, bem como é difícil abranger toda área irrigada. Frente a estas dificuldades, a obtenção dos índices da uniformidade de aplicação de água pode ser feita para diferentes condições de trabalho do equipamento e antecedendo a implantação do projeto, a partir de simulações digitais em computador, tomando como base o perfil radial de distribuição de água do aspersor a ser utilizado. Esta prática auxilia na tomada de decisão de qual será a melhor disposição do sistema de irrigação no campo e qual deverá ser a melhor condição operacional do sistema de irrigação.

Tendo em vista estes aspectos, os objetivos deste trabalho foram: (i) avaliar as características técnicas de vazão, raio de alcance e perfil radial de distribuição de água para os diferentes diâmetros de orifícios (anéis) e pressões de serviço do aspersor tipo canhão hidráulico setorial da marca PLONA, modelo RL300; (ii) desenvolver e escrever, em linguagem de programação *Visual Basic 6*, um aplicativo computacional para simular a uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão do tipo autopropelido, trabalhando em diferentes condições operacionais; (iii) validar analiticamente e experimentalmente o aplicativo computacional desenvolvido; (iv) simular a uniformidade de aplicação de água do aspersor PLONA-RL300 trabalhando em sistemas de irrigação por aspersão tipo autopropelido.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Irrigação por aspersão do tipo autopropelido

A aspersão é o método de irrigação que se caracteriza pela aplicação da água por intermédio de um jato d'água sob pressão, que se fraciona em gotas menores, quando em contato com o ar, distribuindo a água de maneira uniforme sobre a superfície do terreno (Azevedo Netto et al., 1998).

Segundo Olitta (1978), a grande aceitação da irrigação por aspersão é decorrente da boa uniformidade de aplicação que o método oferece, da facilidade de controle do volume de água a ser aplicado, da elevada eficiência, da redução dos perigos de erosão e da potencialidade de seu emprego nos mais diversos tipos de solos e condições de topografia. De acordo com Christofídis (2002), a aspersão apresenta-se como um dos métodos de irrigação mais difundidos no Brasil, ficando atrás apenas da irrigação por superfície.

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

Dentro da aspersão mecanizada, os sistemas autopropelidos de irrigação disponíveis atualmente, no mercado nacional, são do tipo carretel enrolador. Segundo Follegatti (1997), este conjunto é composto por um aspersor, de médio ou grande alcance, uma mangueira de polietileno de média densidade, um carretel enrolador e um mecanismo de propulsão tipo turbina hidráulica. Desta forma, a irrigação é feita pelo aspersor, que se desloca em uma trajetória linear ao longo de um carreador, irrigando uma faixa de formato retangular.

Normalmente, o aspersor utilizado nos sistemas autopropelidos de irrigação é do tipo canhão hidráulico, em que a pressão de serviço varia de 50 a 100 m.c.a. e o raio de alcance pode atingir valores entre 40 e 80 m (Bernardo, 1995). Para o autor, a utilização mais adequada deste tipo de aspersor é na irrigação de cana-de-açúcar, pastagens e capineiras.

Rocha (2000) salienta que o sistema autopropelido representa uma etapa importante no processo de automatização dos métodos de irrigação e a utilização deste sistema tem crescido bastante, principalmente por causa da necessidade cada vez maior da redução nos gastos com mão-de-obra. Todavia, o limitante deste sistema de irrigação é o grande consumo de energia, devido à elevada perda de carga no mecanismo de propulsão, tipo turbina, e na mangueira (Rochester et al., 1990 e Prado et al., 2003).

## **2.2 Ensaio e tratamento de perfis de distribuição de água**

Martín-Benito et al. (1992) comentam que é surpreendente a falta de informações técnicas a respeito dos diversos modelos de aspersores disponíveis no mercado, tornando-se difícil uma seleção correta destes. Segundo Olitta (1978), as tabelas dos fabricantes mostram dados de vazão, pressão, diâmetro do bocal e precipitação para vários espaçamentos recomendados, mas sem detalhar o coeficiente de uniformidade de aplicação de água.

Conforme Vilas Boas et al. (2000), um dos processos para avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por aspersão é a obtenção e apresentação dos dados característicos da distribuição de água dos aspersores a serem utilizados no campo. Seginer et al. (1992) salientam que a mensuração do perfil de distribuição de água de um aspersor é requerida para a pesquisa, desenvolvimento de novos protótipos de aspersores, controle de qualidade de fabricação e avaliação dos aspersores por parte do consumidor.

De acordo com Martín-Benito et al. (1992), os aspersores apresentam basicamente três tipos de perfis de distribuição de água: 1) elíptico, obtido geralmente quando se trabalha com apenas um bocal; 2) “donut”, obtido quando se opera o aspersor com baixas pressões de serviço e; 3) triangular, obtido normalmente quando se trabalha com dois bocais. Pereira (1995), ao comparar a uniformidade de aplicação de água de sistemas de irrigação por aspersão convencional, com aspersores que apresentavam estes três tipos de perfis de distribuição de água, concluiu que, na maioria das situações estudadas, o perfil triangular proporcionou os melhores resultados e o “donut”, os piores.

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

Leonce (1978), citado por Vilas Boas (1994), descreve outro método de ensaio de distribuição de água de aspersores rotativos, com amostragem radial, utilizado no CEMAGREF (Centro Nacional de Máquinas Agrícolas, de Extensão e de Florestas) em Le Tholonet, na França, que utiliza para coleta o setor circular descrito por um ângulo de  $1^\circ$  e  $50'$ .

Fischer & Wallender (1988) verificaram que o coeficiente de variação da intensidade de precipitação decresce com o aumento do tempo de ensaio e com o do diâmetro do coletor. De acordo com estes autores, ensaios com 15 minutos de duração, realizados com coletores de 235 mm de diâmetro, produzem o mesmo coeficiente de variação que ensaios com 45 minutos de duração, realizados com coletores de 127 mm de diâmetro.

Vilas Boas et al. (2000) compararam quatro métodos de amostragens de perfis de distribuição de água e verificaram que o método radial CEMAGREF

não diferiu do método de amostragem em malha, porém estes dois métodos diferiram do método radial e do radial modificado proposto pelo autor.

Segundo Li (1996) e Seginer et al (1992), quando o perfil de distribuição de água é radialmente simétrico, a vazão do aspersor pode ser estimada pela expressão:

$$Q_c = 2\pi \int_0^R i(r) \cdot r \cdot dr \quad (1)$$

em que  $Q_c$  é a vazão ( $m^3 \cdot h^{-1}$ ) do aspersor;  $i(r)$  é a intensidade de precipitação ( $m \cdot h^{-1}$ ) em função da distância  $r$  (m) do aspersor; e  $R$  é o raio de alcance do aspersor (m).

Molle & Gat (2000), na validação dos perfis radiais levantados em laboratório, pelo método proposto pelo CEMAGREF, compararam a vazão a aplicada com a vazão calculada, sendo que, se a vazão calculada fosse diferente a 3% da vazão aplicada, os ensaios eram repetidos.

Seginer et al. (1992) salientam que a relação entre a vazão calculada e aplicada pode diferir bastante da unidade, devido a erros nas determinações da vazão aplicada e volumes precipitados nos coletores, à variação na velocidade de rotação do aspersor e ao ângulo de inclinação do tubo de subida do aspersor. De acordo com os referidos autores, o coeficiente de variação na determinação dos valores de vazão coletada e aplicada não deve superar 10%.

Solomon & Bezdek (1980), no tratamento dos perfis radiais de distribuição de água do aspersor canhão hidráulico Rain Bird 103, propuseram uma metodologia em que as distâncias ao aspersor são expressas como fração do raio de alcance e os valores de intensidade de precipitação, como fração da intensidade média de aplicação de água. Os referidos autores, com base nos perfis adimensionais, racionalizaram o número de perfis a partir do algoritmo de agrupamento "K-Means", sendo que, para a reconstituição destes perfis, foi

gerada uma equação para a vazão e outra para o raio de alcance em função do diâmetro do bocal e da pressão de serviço do aspersor.

Colombo et al. (1996), ao utilizarem a metodologia proposta por Solomon & Bezdek (1980) no tratamento dos perfis radiais de distribuição de água do aspersor MEC-21, fabricado pela ASBRASIL, concluíram que a distribuição de água deste aspersor, para fins de simulação da uniformidade de irrigação, pode ser adequadamente representada por apenas dois perfis radiais adimensionais.

## **2.3 Uniformidade de aplicação de água**

### **2.3.1 Importância e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)**

Em um cenário onde a proteção ambiental e a conservação dos recursos hídricos são enfatizadas e os custos da água e energia estão em ascensão, a uniformidade de aplicação de água é uma preocupação crescente para fabricantes de aspersores, projetistas e usuários de sistemas de irrigação (Louie & Selker, 2000). Segundo Mateos (1998), a uniformidade de aplicação de água é fundamental para os sistemas de irrigação por aspersão proporcionarem eficiente uso da água e máxima produtividade.

Frizzone (1997) relata que a uniformidade é o parâmetro que reflete a qualidade da irrigação, em termos de variabilidade da lâmina de irrigação. Segundo o referido autor, a uniformidade é uma grandeza que caracteriza todo o sistema de irrigação e intervém no seu projeto, tanto agrônômico, porque afeta o cálculo da quantidade de água necessária para irrigação, quanto hidráulico, pois, em função dela define-se o espaçamento dos emissores de água, a vazão do sistema e o tempo de irrigação.

Conforme Rodrigues et al. (1997), citados por Souza (2001), uma das etapas básicas quando da implantação ou do manejo da irrigação é a determinação da uniformidade de aplicação de água.

Vários índices têm sido propostos para expressar a uniformidade de aplicação de água de um sistema de irrigação. Segundo Bernardo (1995), o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) é um dos índices mais utilizados, sendo recomendável para irrigação por aspersão um valor mínimo de 80%. No entanto, Matsura & Testezlaf (2003) mencionam que em sistemas de irrigação do tipo autopropelido, um valor de CUC igual a 70% já é aceitável.

Para Merriam & Keller (1978), o valor recomendável de CUC depende de aspectos econômicos ligados ao custo do equipamento, da água, da drenagem e do valor da cultura. De maneira geral, estes autores recomendam, para culturas de alto valor econômico, especialmente aquelas com sistema radicular raso, valores de CUC acima de 87%; para as grandes culturas, com sistema radicular de média profundidade, valores de CUC entre 81 e 87%; para as forrageiras e as culturas com sistema radicular profundo e em condições de irrigação complementar, o valor de CUC pode estar entre 72% a 83%.

Frizzone & Dourado Neto (2003) salientam que muitas críticas são feitas ao CUC, no entanto, nenhum dos outros coeficientes de uniformidade que têm sido apresentados como alternativas ao de Christiansen apresentaram vantagens significativas. A norma ISO 7749-2 (ISO, 1990) recomenda o CUC para o cálculo da uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão.

Rodrigues et al. (1997) testaram a sensibilidade de alguns coeficientes de uniformidade de aplicação de água às mudanças no diâmetro de bocais, na altura da haste do aspersor, no tempo de duração do teste, na pressão de operação do aspersor, nas condições de vento e no espaçamento entre linhas laterais. Deste

modo, os autores verificaram que o CUC foi um dos coeficientes que apresentou a menor sensibilidade aos fatores testados.

Devido ao grande número de variáveis que afetam no valor do CUC, Solomon (1979) recomenda que se apresente o valor do CUC como um número inteiro, ficando implícita uma variação para mais ou para menos de um ponto percentual. Este autor observou um aumento no coeficiente de variação de 2 para 4 e 6% quando o valor de CUC era reduzido de 90 para 80 e 70%, respectivamente.

### **2.3.2 Fatores que influenciam a uniformidade de autopropelidos**

Keller & Bliesner (1990) relatam que vários fatores podem influir na uniformidade de aplicação de água, destacando-se a pressão de serviço, o diâmetro do bocal, o espaçamento entre aspersores e a velocidade e direção do vento. No caso dos autopropelidos, incluem-se também o ângulo de giro (Rocha, 1998) e variações na pressão de operação e na velocidade de deslocamento do aspersor (Colombo, 1991).

Conforme Keller & Bliesner (1990), aspersores acoplados em autopropelidos, trabalhando com ângulos de giro inferiores a 360°, além de evitarem o molhamento do carreador, podem proporcionar maior uniformidade de aplicação de água. Ao mostrarem a influência do ângulo de giro, estes autores citam que ângulo de giro igual a 210° proporciona o perfil de aplicação de água mais uniforme para o aspersor em movimento no carreador. Já perfis de aplicação produzidos pelos ângulos de giro de 240° e 270° podem ser tomados como bons, pois, ao se considerar a sobreposição de perfis de aspersores, deslocando-se em carreadores adjacentes, obtêm-se valores de uniformidade semelhantes ao proporcionado pelo ângulo de 210°.

Charmelo (1990) avaliou a uniformidade de aplicação de água de um sistema de irrigação autopropelido, com três ângulos de giro (330, 345 e 360°) e

três espaçamentos entre carregadores (60, 66 e 72 m), e verificou que para ângulos iguais a 330 e 345°, aumentando o espaçamento houve um incremento no valor do CUC, o que não ocorreu para o ângulo de 360°.

Rocha (1998), trabalhando com autopropelido equipado com aspersor de médio porte, operando com ângulos de giro de 330, 345 e 360° e pressões de serviço de 200 e 250 kPa, observou que com maior pressão e menor ângulo de giro os valores de CUC foram maiores. Já Rocha (2000), avaliando um sistema de irrigação por autopropelido a campo para três pressões (400, 450 e 500 kPa), três velocidades distintas de recolhimento da mangueira e giro setorial do canhão hidráulico igual a 270°, observou que os maiores valores de CUC foram obtidos para larguras de faixas compreendidas entre 70 a 80% do diâmetro molhado do aspersor. Além disto, o autor constatou que pressões de serviço em torno de 400 kPa, a uniformidade não sofreu prejuízos consideráveis, quando comparada com pressões maiores.

Vento é outro fator que tem grande influência na uniformidade de aplicação de água. De acordo com Withers & Vipond (1974), quando o vento varia de zero a  $2,2 \text{ m.s}^{-1}$ , a uniformidade não é influenciada, e velocidades até  $3,6 \text{ m.s}^{-1}$  podem ser toleradas, além desse limite, a uniformidade é muito prejudicada.

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

Grant et al. (1984) comentam que em sistemas autopropelidos de irrigação a uniformidade de aplicação de água é baixa no início e no final da faixa irrigada, sendo que um melhor entendimento da aplicação de água nestas

regiões pode levar a uma maior eficiência na utilização de água e energia. Para melhorar a uniformidade de aplicação de água nestas regiões, recomenda-se reduzir os comprimentos inicial e final da faixa irrigada, sendo estes determinados em função de um valor mínimo de sobreposição dos perfis de distribuição de água, observados na linha divisora entre duas faixas adjacentes (Rochester, 1983a e Scaloppi & Colombo, 1995).

Também devido à baixa uniformidade de aplicação no início da faixa irrigada, Rochester (1983b) recomenda tempo de parada nesta região de modo a melhorar uniformidade de aplicação de água na área irrigada. Segundo Yanagi Júnior et al. (1995), os tempos de paradas, nas extremidades da faixa irrigada, podem ser determinados pela relação entre a distância longitudinal do ponto de início da faixa até o aspersor pela velocidade de deslocamento deste.

## **2.4 Simulação da uniformidade de aplicação de água**

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

Segundo Carrión et al. (2001) e Conceição (2002), a realização de ensaios de campo para avaliação da distribuição de água em sistemas de irrigação é uma tarefa demorada, e na maioria das vezes, não se consegue realizar as avaliações em todas as condições operacionais e ambientais desejadas. Assim, o uso de modelos matemáticos, para simulação computacional, possibilita uma combinação mais diversificada e rápida das diversas análises pretendidas.

Em sistemas de irrigação por aspersão tipo autopropelido, Rolland (1982) relata que a partir de um perfil radial de distribuição de água, obtido na

ausência de vento, um programa de computador pode simular a uniformidade de aplicação de água em qualquer ponto da faixa irrigada. Desta forma, é possível determinar a lâmina aplicada na faixa irrigada para diferentes condições operacionais, caracterizadas pelo tipo de bocal, pressão de serviço, ângulo de giro do aspersor, espaçamento entre carregadores e velocidade de deslocamento.

Conforme a Figura 1, um coletor, caracterizado pelo ponto M, assume diferentes distâncias em relação ao aspersor, deslocando-se com velocidade constante em dois carregadores,  $1'$  e  $2'$ , espaçados por um valor E. A partir destas diferentes distâncias, assumidas pelo coletor, pode-se estabelecer as sucessivas intensidades de precipitação que este coletor está recebendo ao longo do tempo, com base no perfil de distribuição de água deste aspersor. Desta forma, a lâmina aplicada neste coletor é determinada pela integração das intensidades de aplicação de água que este recebeu ao longo do tempo necessário para ocorrer o deslocamento do aspersor de A até A' e de B até B'. Os incrementos de tempo, considerados para efetuar a integração das intensidades de aplicação de água, correspondem ao tempo necessário para o aspersor se deslocar de A até A1; de A1 até A2; de A2 até A3 e assim por diante.

Colombo (1991) e Zaggo et al. (1988) descreveram um programa de simulação baseado no padrão estacionário de aplicação de água do aspersor, assim, este padrão é representado por uma matriz cujos elementos contêm as intensidades de aplicação de água observadas em uma série de coletores em torno do aspersor (método da malha). Este padrão estacionário de aplicação de água foi utilizado para simular a lâmina de água aplicada pelo aspersor e a uniformidade de aplicação de água em sistemas autopropelidos de irrigação.

Yanagi Júnior (1995) desenvolveu um aplicativo computacional que simula a uniformidade de aplicação de água para diferentes condições de trabalho de um equipamento autopropelido, com base nos perfis radiais do aspersor ensaiado. Neste trabalho, as simulações foram efetuadas a partir de dois

perfis radiais adimensionais, que representavam os demais perfis. Para obtenção dos dois perfis, o autor utilizou o algoritmo de agrupamento “K-Means”.

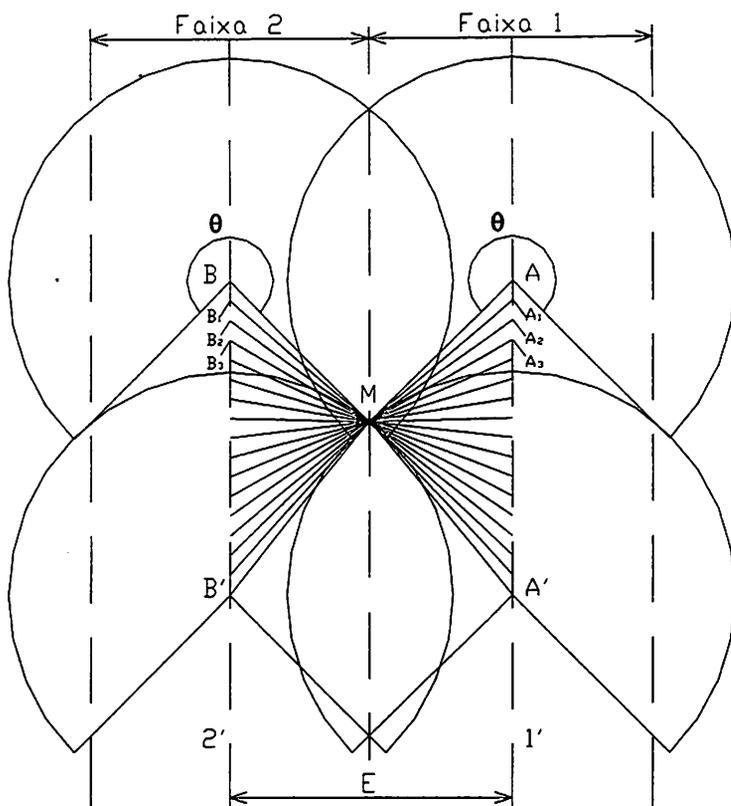


FIGURA 1 - Esquema para estabelecer a lâmina de irrigação aplicada em um coletor, devido à passagem do círculo molhado do aspersor (Rolland, 1982).

Rochester (1983a, b) e Grant et al. (1984) utilizaram modelos de simulação de aplicação de água para autopropelido na avaliação da influência dos tempos de parada, nas extremidades da faixa, sobre a uniformidade de aplicação de água na área irrigada.

Modelos de simulação também podem ser usados para estimar o impacto causado pela irrigação, destacando-se, como exemplo, o programa NIWASAVE, que simula a uniformidade e, a partir desta, a produtividade e a lixiviação de nitrato na área irrigada. Ruelle et al. (2003) utilizaram este modelo para avaliar o impacto da irrigação, por autopropelido, na produtividade e na perda de nitrato em áreas cultivadas com cereais na França.

## **2.5 Validação dos modelos de simulação da uniformidade**

A campo, muitas vezes os modelos de simulação não retratam exatamente os valores obtidos nas simulações. Montero et al. (2001) relatam que enquanto as condições operacionais simuladas são fixas e invariáveis, os testes de campo estão sujeitos a erros no método experimental (mensuração da vazão, pressão e volume coletado) e também as variações induzidas pelas condições climáticas.

Segundo Vories et al. (1987), apesar de a variabilidade do vetor vento afetar nas predições, modelos de simulação da uniformidade de irrigação podem melhorar a disposição dos equipamentos de irrigação por aspersão no campo. Estes autores verificaram que mesmo as lâminas geradas por um programa de simulação não sendo iguais às observadas nos testes de campo, os valores de CUC simulados eram muito próximos aos obtidos no campo.

Colombo (1991), na validação analítica de seu modelo de simulação para autopropelidos, observou que o perfil transversal de aplicação de água, produzido para o aspersor em deslocamento no carreador, foi praticamente idêntico ao simulado. Na confrontação dos dados obtidos em campo com os simulados o referido autor verificou uma diferença maior entre os perfis transversais, de forma que os valores de uniformidade de aplicação de água simulados foram ligeiramente subestimados. Já Osterno (1994) verificou que seu modelo de simulação superestima a lâmina de aplicação de água ao longo da

lateral do pivô. Ambos os autores salientam que estas diferenças são decorrentes das condições de vento, as quais não são as mesmas dos ensaios em laboratório.

Montero et al. (2001), com o intuito de proceder à validação do modelo de simulação SIRIAS, destinado a prever a uniformidade de aplicação de água para sistemas de irrigação por aspersão convencional, obtiveram um erro absoluto médio de 2,7% entre os valores de uniformidade simulados e observados. Omary & Sumner (2001) também verificaram que os valores de CUC observados em campo foram, em média, 98,4% dos valores de CUC preditos pelo programa de simulação para sistemas de irrigação do tipo pivô central.

Victoria (1992) salienta que uma verificação dos trabalhos científicos, realizados sob condição de campo, mostra que algumas análises ficam prejudicadas devido às condições ambientais, estas diferenças climáticas dificultam consideravelmente a comparação de ensaios, tornando proibitiva uma maior generalização dos trabalhos científicos e dos ensaios de fabricantes. Para o autor, a caracterização técnica de componentes, que visa fornecer subsídios técnicos para projetistas, não deve estar atrelada a valores aleatórios do fator vento, pois este é variável e característico de uma dada localidade ou região.

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Caracterização técnica do aspersor**

#### **3.1.1 Aspersor avaliado**

Um aspersor novo, do tipo canhão hidráulico com mecanismo setorial de reversão lenta, da marca PLONA, modelo RL300, foi avaliado neste estudo.

Segundo especificações do fabricante, o aspersor PLONA-RL300 apresenta um ângulo de jato de 24°, com um bocal principal, do tipo anel, disponível em nove diâmetros distintos (22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36 e 38 mm), e um bocal auxiliar, do tipo cônico, com 6 mm de diâmetro, e deve operar com pressões de serviço entre 294 kPa (30 m.c.a.) e 784 kPa (80 m.c.a.).

#### **3.1.2 Bancada de ensaios**

As determinações de vazão, raio de alcance e perfil radial de distribuição de água, foram realizadas na bancada de avaliação de aspersores (Figura 2) do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras, em Lavras - MG, que é constituída de: a) fonte de captação de água; b) conjunto motobomba; c) tubulação de aço dotada de registros de gaveta e medidor de vazão hidromagnético; d) campânula para abrigar o aspersor, com raio de 1,5 m e abertura de 5°; e) manômetro digital, localizado externamente à campânula e acoplado na tomada de pressão instalada na base do aspersor e; f) linha de coletores dispostos em espaçamento variável, menor que 1 m, que se estende até uma distância de 70 metros do centro da campânula, composta de 110 coletores com área de captação de formato retangular, apresentando largura fixa de 20 cm e comprimento variável com a distância ao centro da campânula, de modo a satisfazer um ângulo de 1° 50'.

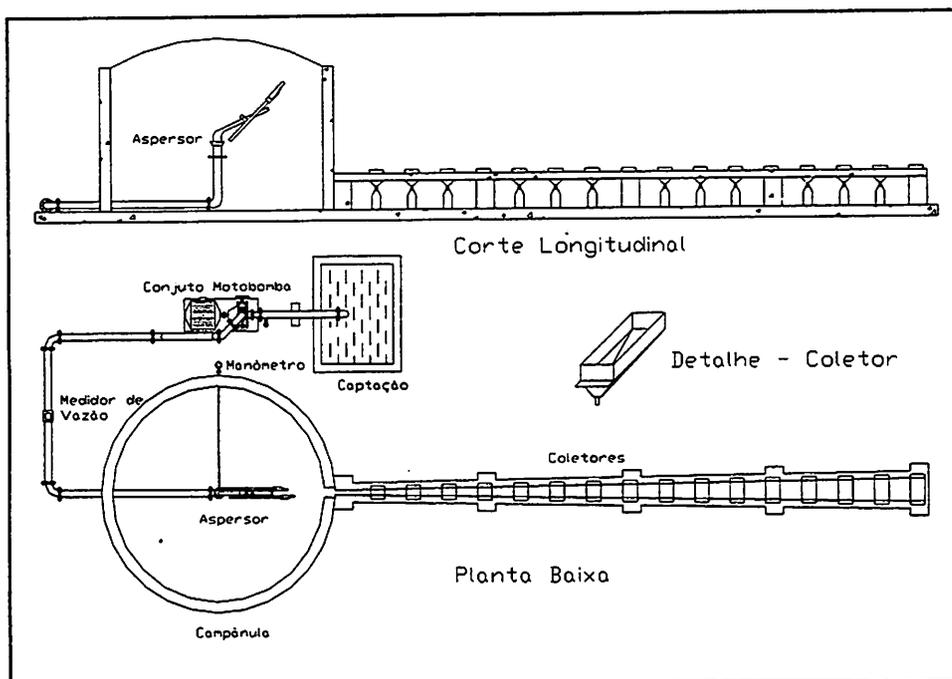


FIGURA 2 - Bancada de ensaios utilizada para determinação das características técnicas do aspersor PLONA-RL300.

### 3.1.3 Ensaios de avaliação

A vazão, o raio de alcance e o perfil radial de distribuição de água (intensidade de precipitação versus distância ao aspersor) do aspersor PLONA-RL300 foram determinados em 45 diferentes condições operacionais, abrangendo os nove diâmetros de anéis do bocal principal e cinco valores de pressão de serviço (294, 392, 490, 588 e 686 kPa).

Nas avaliações, o aspersor foi instalado no centro da campânula, esquematizada na Figura 2, observando-se uma distância vertical de 0,8 m entre o centro do bocal principal e o plano da área de captação dos coletores, o qual, por sua vez, se encontrava a uma altura de 0,4 m da superfície do solo. Antes do início das avaliações, o balancim que causa o giro do aspersor era mantido

parado até que se atingisse a pressão de serviço desejada. Uma vez estabilizada a pressão de serviço, o balancim era liberado, iniciando-se o giro do aspersor. Durante o seu giro no interior da campânula eram registrados, a cada 10 minutos, valores de pressão de serviço, vazão e deslocamento do vento, em um anemômetro totalizador de canecas instalado a 2 m de altura do solo. Este procedimento buscava assegurar uma condição de pressão de serviço constante e velocidade do vento inferior a  $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  durante todo o período de ensaio.

Levando em conta as observações de Fischer & Wallender (1988) de que o uso de coletores de grandes dimensões permite a redução do tempo de ensaio, e contrapondo-as à norma ISO 7749-2 (ISO, 1990), que estabelece o tempo mínimo de 1 hora, encerrava-se a operação do aspersor 40 minutos após o início de seu giro no interior da campânula. Imediatamente após a parada do aspersor, iniciava-se o registro dos volumes de água aplicados em cada um dos coletores da bancada.

Após a determinação de cada perfil radial de distribuição de água, seguindo sugestões de Seginer et al. (1992), Li (1996) e Molle & Gat (2000), o valor da vazão do aspersor determinada pelo hidrômetro era comparado com o valor da vazão correspondente ao giro completo do perfil de distribuição de água ( $QP_{\beta}$  em  $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ), que era computado pela seguinte expressão:

$$QP_{\beta} = 2\pi \cdot \int_0^{r_1} \left( i_{1,\beta} \cdot \frac{r}{r_1} \right) r \cdot dr + \sum_{u=1}^{ND_{\beta}-1} \left[ 2\pi \cdot \int_{r_u}^{r_{u+1}} (a_{u,\beta} + b_{u,\beta}r) \cdot r \cdot dr \right] \quad (2)$$

em que  $\beta$  é o índice de identificação dos ensaios ( $1 \leq \beta \leq 45$ );  $r_u$  é a distância (m) do coletor de índice  $u$  ao aspersor;  $i_{1,\beta}$  é a intensidade de precipitação ( $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ ) no primeiro coletor;  $u$  é o índice de identificação de cada coletor ( $1 \leq u \leq ND_{\beta}$ );  $ND_{\beta}$  é o valor do índice  $u$  do coletor mais próximo ao aspersor em que a intensidade de precipitação é igual a zero; e  $a_{u,\beta}$  e  $b_{u,\beta}$  são, respectivamente, os coeficientes linear ( $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ ) e angular ( $\text{h}^{-1}$ ) da equação que representa, entre dois

coletores sucessivos ( $u$  e  $u + 1$ ), a intensidade de precipitação em função da distância  $r$  ao aspersor.

Nos casos em que a diferença entre os dois valores de vazões diferiu em 10% do valor medido com o hidrômetro, os ensaios foram repetidos até se chegar a uma diferença menor que 10%.

### 3.1.4 Processamento dos resultados de ensaio

Seguindo metodologia de Solomon & Bezdek (1980), os valores de vazão ( $Q$  em  $m^3 \cdot h^{-1}$ ) e raio de alcance ( $R$  em  $m$ ), determinados nas quarenta e cinco combinações do anel principal ( $b$  em  $mm$ ) e pressão de serviço ( $p$  em  $kPa$ ), foram utilizados para ajustar os valores dos coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $m'$  e  $n'$  das seguintes equações:

$$Q = C_1 \cdot b^m \cdot p^n \quad (3)$$

$$R = C_2 \cdot b^{m'} \cdot p^{n'} \quad (4)$$

Ainda de acordo com a metodologia de Solomon & Bezdek (1980), os perfis radiais de distribuição de água foram adimensionalizados por meio das seguintes equações:

$$ra_{u,\beta} = \frac{r_u}{R_\beta} = \frac{r_u}{r_{ND_\beta}} \quad \text{com } 1 \leq u \leq ND_\beta \quad (5)$$

$$ia_{u,\beta} = \frac{i_{u,\beta} \cdot \pi \cdot (R_\beta)^2}{QP_\beta} = \frac{i_{u,\beta}}{im_\beta} \quad \text{com } 1 \leq u \leq ND_\beta \quad (6)$$

em que  $ra_{u,\beta}$  é a fração do raio de alcance (adimensional);  $R_\beta$  ou  $r_{ND_\beta}$  é o raio de alcance ( $m$ ) do aspersor;  $ia_{u,\beta}$  é a fração da intensidade média de aplicação de água (adimensional),  $i_{u,\beta}$  a intensidade de aplicação de água ( $m \cdot h^{-1}$ ) do coletor  $u$  ao aspersor; e  $im_\beta$  é a intensidade média de aplicação de água ( $m \cdot h^{-1}$ ).

Para permitir que as várias condições operacionais disponíveis fossem submetidas à análise de agrupamento (Solomon & Bezdek, 1980), as

informações obtidas em cada perfil radial de distribuição de água foram sintetizadas, registrando apenas os vinte valores de intensidade adimensional de precipitação correspondentes às vinte frações do raio de alcance ( $ra_j$ ) dadas por:

$$ra_j = 0,025 + (j - 1) \cdot 0,05 \quad \text{com } 1 \leq j \leq 20 \quad (7)$$

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

Nos casos em que a fração desejada do raio não coincidiu com a posição exata de um coletor, a intensidade de precipitação considerada foi determinada por interpolação linear entre dois valores observados nos ensaios. Para evitar distorções entre os valores de vazão obtidos pela equação 3 e valores de vazão correspondentes ao giro do perfil radial, os valores de precipitação adimensional foram reajustados de forma a obter:

$$2 \cdot \int_0^{0,025} \left( ia_{1,\beta} \cdot \frac{ra}{0,025} \right) \cdot ra \cdot dra + \sum_{j=1}^{j=19} \left[ 2 \cdot \int_{ra_j}^{ra_{j+1}} (a'_{j,\beta} + b'_{j,\beta} r) \cdot ra \cdot dra \right] + \dots$$

$$\dots 2 \cdot \int_{0,975}^1 \left( ia_{20,\beta} \frac{1-ra}{0,025} \right) \cdot ra \cdot dra = 1 \quad \text{com } 1 \leq \beta \leq 45 \quad (8)$$

em que  $ia_{1,\beta}$  e  $ia_{20,\beta}$  representam frações (adimensional) da intensidade de precipitação média correspondentes, respectivamente, aos valores de índice 1 e 20; e  $a'_{j,\beta}$  e  $b'_{j,\beta}$  são, respectivamente, os coeficientes linear (adimensional) e angular (adimensional) da equação que representa, entre duas distâncias sucessivas  $ra_j$  e  $ra_{j+1}$ , a fração da intensidade média de precipitação em função da fração,  $ra$ , da distância ao aspersor.

Conforme recomendado por Solomon & Bezdek (1980), o número mais adequado de formas geométricas típicas que podem representar as quarenta e cinco condições operacionais, observadas nos ensaios, foi obtido com auxílio do algoritmo “K-Means” de análise de agrupamento (Tou & Gonzales, 1974).

Para aplicação do algoritmo “K-Means”, foi escrito um programa em *Visual Basic* para Aplicativos da planilha do *Excel*, que executa o seguinte procedimento para valores crescentes do número K de forma geométricas típicas a serem considerados ( $K=1, 2, \dots$  até  $K=45$ ):

- (i) o processo tem início assumindo que os vinte valores  $T_{j,g}$  de intensidade de precipitação adimensional de cada um dos K perfis típicos considerados são iguais aos valores dos primeiros K perfis, isto é,  $T_{j,g} = ia_{j,\beta}$  com  $20 \geq j \geq 1$  e  $K \geq \beta = g \geq 1$ ;
- (ii) para cada um dos 45 perfis, são computadas as somas dos quadrados dos desvios,  $SQ_{\beta,g}$ , em relação a cada um dos K perfis típicos, isto é,  $SQ_{\beta,g} = \sum (ia_{j,\beta} - T_{j,g})^2$ , com  $j = 1, 2, \dots$  até 20,  $\beta = 1, 2, \dots$  até 45 e  $g = 1, 2, \dots$  até K;
- (iii) os 45 perfis são distribuídos em K grupos distintos, sendo o agrupamento ao qual um dado perfil pertence identificado pelo índice g do menor  $SQ_{\beta,g}$ , com  $\beta = 1, 2, \dots$  até 45 e  $g = 1, 2, \dots$  até K;
- (iv) para cada um dos K perfis típicos são calculados vinte novos valores,  $N_{j,g}$ , de intensidade de precipitação adimensional, considerando que  $N_{j,g}$  é a média dos valores de  $ia_{j,\beta}$  observados em todos os perfis de um mesmo agrupamento;
- (v) são computadas K somas de desvios,  $S_g$ , entre os perfis típicos considerados nas etapas ii e iv, isto é,  $S_g = \sum (N_{j,g} - T_{j,g})$ , com  $g = 1, 2, \dots$  até K e  $j = 1, 2, \dots$  até 20;
- (vi) No caso em que  $S_1 = S_2 = \dots = S_K = 0$ , o procedimento avança para a etapa vii; em caso contrário, os valores de  $N_{j,g}$  são passados para  $T_{j,g}$  e o procedimento retorna para a etapa ii;
- (vii) O erro médio ( $E_K$ ) na estimativa da intensidade de precipitação adimensional, referente a um número K de perfis típicos, foi calculado por:

$$E_K = \sqrt{\frac{\sum_{\beta=1}^{45} \text{Min}(SQ_{\beta,1}, SQ_{\beta,2} \dots SQ_{\beta,K})}{20 \cdot 45}} \quad (9)$$

em que  $\text{Min}(\lambda_{\beta,1}, \lambda_{\beta,2} \dots \lambda_{\beta,K})$  representa a função matemática que retorna ao valor mínimo de  $(\lambda_{\beta,1}, \lambda_{\beta,2} \dots \lambda_{\beta,K})$ .

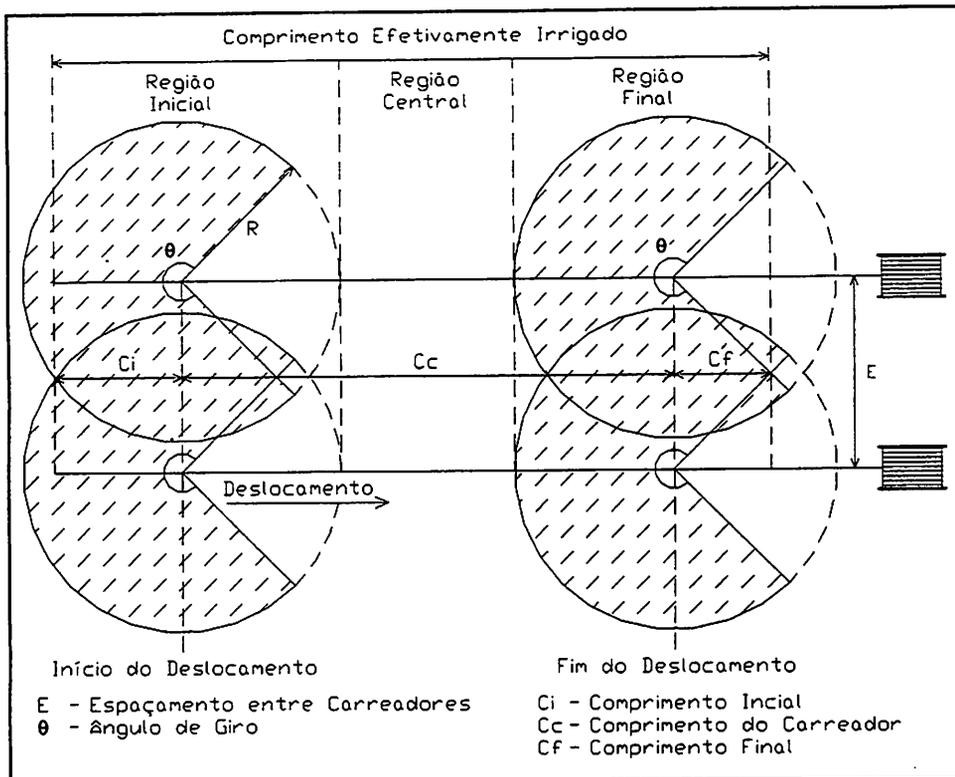
### 3.2 Aplicativo computacional para simulação da uniformidade

#### 3.2.1 Caracterização do aplicativo

O aplicativo computacional desenvolvido, e escrito em linguagem de programação *Visual Basic 6*, simula, para uma condição de ausência de vento, a distribuição espacial da água aplicada na superfície do solo por um sistema de irrigação do tipo autopropelido equipado com aspersor PLONA-RL300.

Os dados de entrada do aplicativo computacional são: pressão de serviço (entre 294 e 686 kPa), diâmetro de bocal principal (22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36 ou 38 mm), ângulo de giro (180, 210, 240, 270, 300, 330 ou 360°) e velocidade de deslocamento do aspersor no carreador (entre 0 e 200 m.h<sup>-1</sup>). A partir da pressão de serviço e do diâmetro de bocal são estabelecidos a vazão, o raio de alcance e o perfil radial de distribuição de água do aspersor. O perfil radial é obtido por interpolação linear de dois perfis radiais adimensionais, observados em ensaios realizados com o aspersor PLONA-RL300 para o mesmo diâmetro de bocal e pressões de serviço intermediárias àquela desejada.

Para uma dada combinação de bocal principal, pressão de serviço e ângulo de giro do aspersor, é analisada a distribuição de água na região central da faixa irrigada (Figura 3) para valores de espaçamento entre carreadores (E em m) variando de R a 1,8R. Neste intervalo, é determinado o espaçamento que resulta no maior valor de CUC.



**FIGURA 3 - Representação das diferentes regiões da faixa irrigada considerando os efeitos de bordas gerados pelo início e fim do deslocamento do aspersor.**

A análise da uniformidade de aplicação de água também é feita nas extremidades da faixa irrigada (Figura 3), considerando os efeitos de bordas gerados pelo início e fim do deslocamento do aspersor.

Na condição operacional de interesse, e para qualquer espaçamento entre carreadores compreendidos entre  $R$  e  $1,8R$ , determina-se a uniformidade de aplicação de água nas regiões inicial, central e final e em toda faixa efetivamente irrigada (Figura 3). No cálculo das uniformidades são consideradas diferentes condições de comprimento inicial ( $C_i$ ) e final ( $C_f$ ), distância percorrida pelo

aspersador entre os pontos de início e fim do deslocamento e tempos de parada no início (Tpi) e fim (Tpf) do carregador.

### 3.2.2 Uniformidade de aplicação de água com trajetória infinita

#### 3.2.2.1 Perfil móvel de aplicação de água com trajetória infinita

Na Figura 4 são apresentados os elementos geométricos considerados na simulação do perfil móvel de aplicação de água de um aspersador, com ângulo de giro  $\theta$ , em graus, em deslocamento ao longo de uma trajetória linear de comprimento infinito. O ângulo de giro  $\theta$  determina um setor seco ( $\alpha$  em graus) acima do eixo de deslocamento do aspersador, que é dado por:

$$\alpha = \frac{360 - \theta}{2} \tag{10}$$

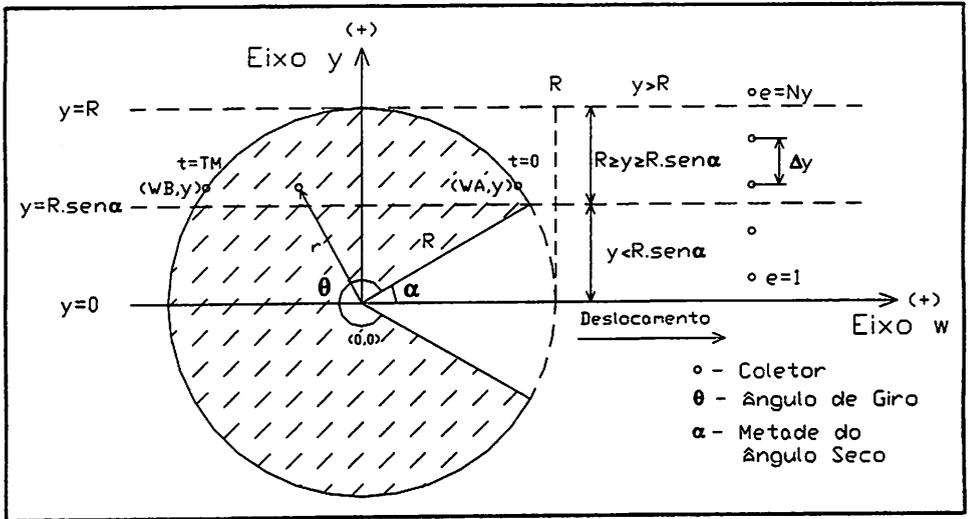


FIGURA 4 - Elementos geométricos considerados na simulação do perfil móvel de aplicação de água do aspersador.

O perfil móvel representa as lâminas de água aplicadas ao longo de uma linha transversal à linha de deslocamento do aspersor. Neste perfil são considerados  $N_y$  pontos de amostragem (coletores de água), identificados pelo índice “e”, dispostos em espaçamento regular ( $\Delta y$  em m), e estando o primeiro ponto de amostragem a uma distância de  $0,5\Delta y$  da linha de deslocamento do aspersor. Deste modo, o número de coletores em um perfil móvel é dado por:

$$N_y = \text{Int}\left(\frac{R}{\Delta y}\right) + 1 \quad (11)$$

em que  $\text{Int}(\delta)$  representa a função matemática que retorna a parte inteira de  $\delta$ .

Conforme indicado na Figura 4, a posição de cada coletor, em relação ao aspersor, é dada por um sistema de coordenadas cartesianas ( $w, y$ ) que tem como origem  $(0, 0)$  o aspersor. A coordenada  $y$  de cada ponto de amostragem é calculada pelo seu índice “e” de identificação através da expressão:

$$y = (e - 0,5) \cdot \Delta y \quad (12)$$

Em função do comprimento infinito da trajetória, que elimina os efeitos de bordas introduzidos pelos pontos de início e final do deslocamento do aspersor, os valores assumidos pela coordenada  $w$  no início da aplicação de água ( $w = W_A$ ) e no final da aplicação de água ( $w = W_B$ ), em pontos de amostragem de coordenada  $y$ , são calculados por:

$$W_A = \begin{cases} \text{Para: } \frac{y}{R} \geq 1 \rightarrow W_A = 0 \\ \text{Para: } \text{sen}\alpha \leq \frac{y}{R} < 1 \rightarrow W_A = \sqrt{R^2 - y^2} \\ \text{Para: } \frac{y}{R} < \text{sen}\alpha \rightarrow W_A = y \cdot \cot\alpha \end{cases} \quad (13)$$

$$W_B = \begin{cases} \text{Para: } \frac{y}{R} \geq 1 \rightarrow W_B = 0 \\ \text{Para: } \frac{y}{R} < 1 \rightarrow W_B = -\sqrt{R^2 - y^2} \end{cases} \quad (14)$$

Assumindo que o aspersor se desloca ao longo do eixo  $w$ , com velocidade constante ( $V$  em  $m.h^{-1}$ ), a duração do tempo de molhamento ( $TM$  em  $h$ ), que é o intervalo de tempo transcorrido entre o início e o final da aplicação de água no ponto com coordenada  $y$ , é calculado por:

$$TM = \frac{WA - WB}{V} \quad (15)$$

No intervalo de tempo  $0 \leq t \leq TM$  ( $t$  em  $h$ ), a distância radial ( $r$  em  $m$ ) do aspersor ao coletor de coordenada  $y$  (Figura 4) pode ser obtida pela expressão:

$$r = \sqrt{y^2 + (WA - V \cdot t)^2} \quad (16)$$

A lâmina de irrigação aplicada no coletor de coordenada  $y$  é o resultado da integração das intensidades de precipitação aplicadas neste coletor durante o tempo de molhamento. Esta integração é computada, numericamente, através da primeira regra de Simpson (Campos Filho, 2001), com 40 subintervalos de tempo, pela expressão:

$$IM_{(e)} = \int_0^{TM} i(r) \cdot dt = \frac{\Delta t}{3} \cdot \left\{ \sum_{k=0}^{19} \left[ i \left( \sqrt{y^2 + (WA - 2k \cdot \Delta t \cdot V)^2} \right) + \dots \right. \right. \\ \left. \left. \dots + 4 \cdot i \left( \sqrt{y^2 + [WA - (2k + 1) \cdot \Delta t \cdot V]^2} \right) + \dots \right. \right. \\ \left. \left. \dots + i \left( \sqrt{y^2 + [WA - (2k + 2) \cdot \Delta t \cdot V]^2} \right) \right] \right\} \quad (17)$$

$$\text{com: } \Delta t = \frac{TM}{40}$$

em que  $IM_{(e)}$  é a lâmina de irrigação ( $mm$ ) aplicada no coletor de índice “e”;  $i(r)$  é a intensidade de precipitação ( $mm.h^{-1}$ ) no instante em que a distância radial do coletor ao aspersor é  $r$ , e  $\Delta t$  é a duração do subintervalo de tempo ( $h$ ) utilizado na integração numérica.

De acordo com o perfil radial de distribuição de água do aspersor PLONA-RL300, as intensidades de precipitação,  $i(r)$ , em função da distância radial ao aspersor, são dadas por:

$$i(r) = \begin{cases} \text{Para : } 0 \leq r < 0,025R \rightarrow i(r) = \left( \frac{40000 \cdot Q \cdot ia_1 \cdot r}{\pi \cdot R^3} \right) \cdot \frac{360}{\theta} \\ \text{Para : } 0,025R \leq r \leq 0,975R \\ \rightarrow i(r) = \left\{ 20000 \cdot Q \frac{0,05 \cdot ia_j \cdot R + [r \cdot (ia_{j+1} - ia_j) + \dots + ra_j \cdot R \cdot (ia_j - ia_{j+1})]}{\pi \cdot R^3} \right\} \cdot \frac{360}{\theta} \\ \text{com : } j = \text{Int} \left[ 20 \cdot \left( \frac{r}{R} - 0,025 \right) + 1 \right] \\ \text{Para : } 0,975R < r \leq R \rightarrow i(r) = \left[ \frac{40000 \cdot Q \cdot ia_{20} \cdot (R - r)}{\pi \cdot R^3} \right] \cdot \frac{360}{\theta} \\ \text{Para : } r > R \rightarrow i(r) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

### 3.2.2.2 Perfil sobreposto e uniformidade de aplicação de água

Na Figura 5 são apresentados os elementos geométricos considerados na simulação da sobreposição dos perfis móveis de aplicação de água de aspersores idênticos, movimentando-se com mesma velocidade ao longo de carreadores adjacentes e de comprimento infinito.

Conforme indicado na Figura 5, os pontos de amostragem do perfil móvel sobreposto são identificados pelo índice “e”. Se forem considerados apenas valores de espaçamento que são múltiplos inteiros de  $\Delta y$ , o índice “e” assume valores entre 1 e  $N_s$ , sendo  $N_s$  determinado por:

$$N_s = \frac{E}{\Delta y} \quad (19)$$

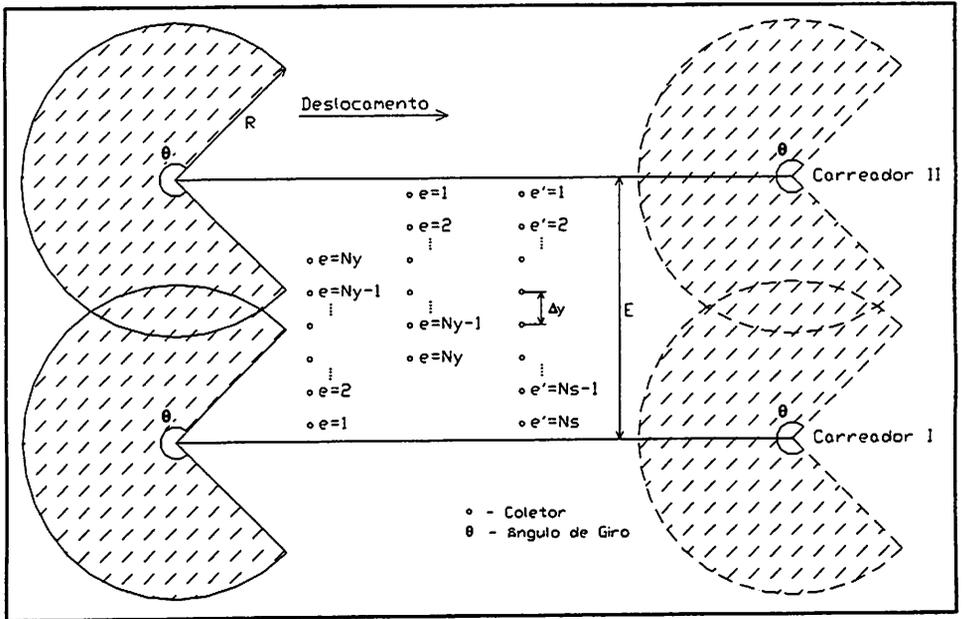


FIGURA 5 - Esquema para efetuar as sobreposições da lâmina de irrigação para um determinado espaçamento entre carreadores.

Considerando apenas valores de espaçamento entre carreadores compreendidos entre  $R$  e  $1,8R$  e assumindo que os perfis móveis são idênticos e simétricos em relação ao eixo de deslocamento do aspersor, a lâmina de água resultante da sobreposição lateral é calculada por:

$$IS_{(e')} = ID + IE$$

com:

$$ID = \begin{cases} \text{Para : } e' \leq Ny \rightarrow ID = IM_{(e')} \\ \text{Para : } e' > Ny \rightarrow ID = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$IE = \begin{cases} \text{Para : } e' > (Ns - Ny) \rightarrow IE = IM_{((Ns - e') + 1)} \\ \text{Para : } e' \leq (Ns - Ny) \rightarrow IE = 0 \end{cases}$$

com:  $1 \leq e \leq Ny$  e  $1 \leq e' \leq Ns$

em que  $IS_{(e')}$  é a lâmina de irrigação (mm) resultante da sobreposição lateral de dois perfis móveis adjacentes.

A uniformidade de aplicação de água, quando avaliada pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), é dada por:

$$CUC = \left( 1 - \frac{\sum_{e'=1}^{N_s} |IS_{(e')} - \bar{IS}|}{N_s \cdot \bar{IS}} \right) \cdot 100 \quad (21)$$

em que CUC é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%); e  $\bar{IS}$  é a lâmina (mm) média do perfil móvel sobreposto  $IS_{(e')}$ .

### 3.2.3 Uniformidade de aplicação de água com trajetória finita

#### 3.2.3.1 Perfis móveis de aplicação de água com trajetória finita

Os elementos geométricos considerados na simulação dos perfis de aplicação de água de um aspersor, com ângulo de giro  $\theta$ , em deslocamento, com velocidade constante, ao longo de uma trajetória linear de comprimento finito são mostrados na Figura 6. Nesta figura, é disposto um sistema cartesiano de coordenadas  $(x, y)$  que tem como origem  $(0, 0)$  o ponto de início do deslocamento do aspersor, e o eixo  $x$  coincidente com a linha de deslocamento do aspersor. De acordo com este sistema cartesiano, o ponto de término do deslocamento do aspersor possui coordenadas  $x = x_p$  e  $y = 0$ .

Devido aos efeitos provocados pelo início e fim do deslocamento do aspersor, que impedem que a uniformidade de aplicação de água seja representada por um único perfil móvel de aplicação de água, foram considerados diversos perfis móveis com espaçamento longitudinal regular ( $\Delta x$  em m). Desta forma, o número de perfis móveis necessários para representar a região anterior ao ponto de início do deslocamento do aspersor será:

$$N_x' = \text{Int} \left( \frac{R}{\Delta x} + 1,5 \right) \quad (22)$$

em que  $\text{Int}(\delta)$  representa a função matemática que retorna a parte inteira de  $\delta$ .

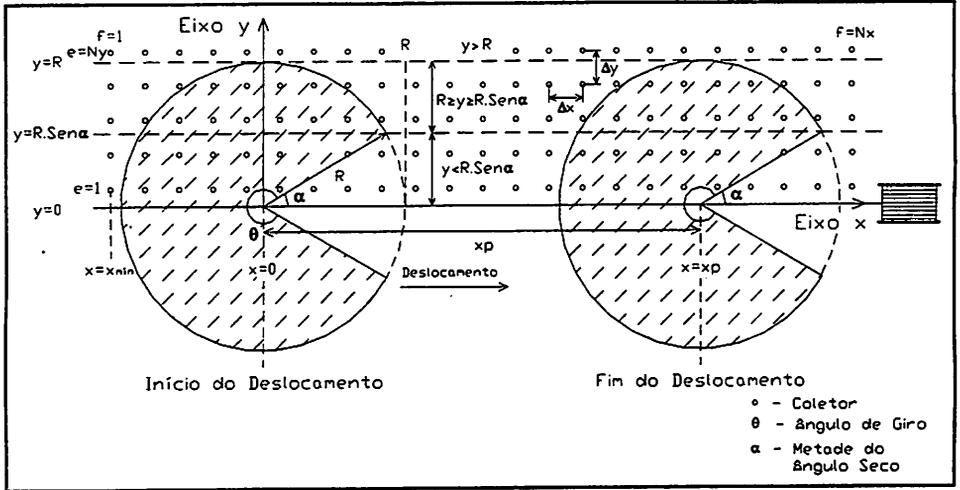


FIGURA 6 - Representação dos pontos de amostragem utilizados para estabelecer os perfis móveis de aplicação de água do aspersor com trajetória finita.

Da mesma forma, o número de perfis móveis a serem considerados ao longo de toda extensão longitudinal da faixa molhada é dado por:

$$N_x = N_x' + \text{Int} \left( \frac{R + x_p}{\Delta x} + 1,5 \right) \quad (23)$$

na qual,  $\text{Int}(\delta)$  representa a função matemática que retorna a parte inteira de  $\delta$ .

Na malha de coletores (Figura 6), cada ponto de amostragem é identificado pelos índices "e" e "f". A coordenada y, dos pontos de amostragem identificado pelo índice "e" ( $1 \leq e \leq N_y$ ), é dada pela equação 12, e a coordenada x, dos pontos de amostragem identificado pelo índice "f" ( $1 \leq f \leq N_x$ ), é dada por:

$$x = [(f - Nx') - 0,5] \cdot \Delta x \quad (24)$$

A lâmina de irrigação aplicada em cada ponto de amostragem corresponde à lâmina aplicada durante o tempo de operação do aspersor estacionado nas extremidades do carreador, somada à lâmina aplicada durante o deslocamento do aspersor ao longo do carreador. Esta soma é determinada por:

$$IM_{(e,f)} = Tpi \cdot i(r1) + \int_0^{TM} i(r) \cdot dt + Tpf \cdot i(r2) \quad (25)$$

em que  $IM_{(e,f)}$  é a lâmina (mm) aplicada em cada coletor de índices “e” e “f”;  $i(r1)$  é a intensidade de precipitação ( $mm.h^{-1}$ ) no coletor de índices “e” e “f” durante o tempo,  $Tpi$  em (h), de operação do aspersor estacionado no início do carreador;  $i(r2)$  é a intensidade de precipitação ( $mm.h^{-1}$ ) no coletor de índices “e” e “f” durante o tempo,  $Tpf$  em (h), de operação do aspersor estacionado no final do carreador;  $r1$  é a distância (m) do coletor de índices “e” e “f” até o início do carreador (0, 0); e  $r2$  é a distância (m) do coletor de índices “e” e “f” até o final do carreador ( $x_p$ , 0).

No aplicativo computacional, os tempos de operação do aspersor estacionado nas extremidades do carreador,  $Tpi$  e  $Tpf$ , são sugeridos em função do comprimento das extremidades, inicial e final, da faixa efetivamente irrigada. Assim, são consideradas quatro opções de comprimentos inicial e final de faixa irrigada: i) igual ao raio de alcance do aspersor; ii) coincidindo com início e o final do deslocamento do aspersor (comprimento igual a zero); iii) calculado; iv) qualquer valor entre zero e o raio de alcance do aspersor.

Conforme a Figura 7a, o comprimento inicial ( $Ci$  em m) de faixa irrigada, calculado pelo aplicativo computacional, é determinado pela expressão de Scaloppi & Colombo (1995):

$$Ci = \sqrt{R^2 - \left(\frac{E}{2}\right)^2} \quad (26)$$

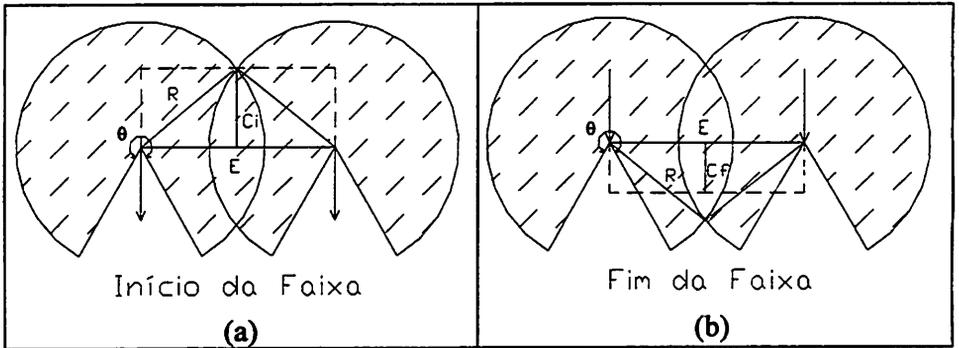


FIGURA 7 - Comprimentos sugeridos pelo aplicativo para as extremidades inicial (a) e final (b) da faixa irrigada.

Para aspersores trabalhando com ângulos setoriais ( $180^\circ < \theta < 360^\circ$ ), Scaloppi & Colombo (1995) sugerem calcular o comprimento da extremidade final ( $C_f$  em m) da faixa irrigada (Figura 7b) por:

$$C_f = C_i \cdot \left( \frac{\theta}{180} - 1 \right) \quad (27)$$

Ainda de acordo com as expressões de Scaloppi & Colombo (1995), os tempos de operação do aspersor estacionado nas extremidades do carreador, ( $T_{pi}$ ) e ( $T_{pf}$ ), sugeridos pelo aplicativo, são dados por:

$$T_{pi} = \frac{C_i}{V} \quad (28)$$

$$T_{pf} = \frac{C_f}{V} \quad (29)$$

Durante os intervalos correspondentes aos tempos de parada nas extremidades do carreador, a intensidade de precipitação em um dado coletor (de coordenadas  $x$  e  $y$ ) é dada em função das distâncias radiais ao aspersor. Os valores das distâncias radiais ao aspersor estacionado, no início ( $r_1$  em m) e no final do carreador ( $r_2$  em m), os quais não possuem correspondência física no campo, foram calculados pelas seguintes expressões:

$$r1 = \begin{cases} \rightarrow r1 = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \text{Para: } \frac{y}{R} < \text{sen}\alpha \begin{cases} \text{se: } y \cdot \text{cotg}\alpha < x < \sqrt{R^2 - y^2} \\ \rightarrow r1 = 2 \cdot R \end{cases} \end{cases} \quad (30)$$

$$r2 = \begin{cases} \rightarrow r2 = \sqrt{(x - xp)^2 + y^2} \\ \text{Para: } \frac{y}{R} < \text{sen}\alpha \begin{cases} \text{se: } xp + y \cdot \text{cotg}\alpha < x < xp + \sqrt{R^2 - y^2} \\ \rightarrow r2 = 2 \cdot R \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

De acordo com as coordenadas (x, y) de cada coletor, o tempo de molhamento à que se refere a integral da equação 25 é calculado pela equação 15, atribuindo-se às variáveis WA e WB, da Figura 4, os valores dados por:

$$WA = \begin{cases} \text{Para: } \frac{y}{R} \geq 1 \rightarrow WA = 0 \\ \text{Para: } \frac{y}{R} < 1 \begin{cases} \rightarrow LC = \sqrt{R^2 - y^2} \\ \text{se: } \text{sen}\alpha \leq \frac{y}{R} < 1 \rightarrow LS = \sqrt{R^2 - y^2} \\ \text{se: } \frac{y}{R} < \text{sen}\alpha \rightarrow LS = y \cdot \text{cotg}\alpha \\ \text{se: } x \leq -LC \text{ ou } x > xp + LS \rightarrow WA = 0 \\ \text{se: } -LC < x \leq LS \rightarrow WA = x \\ \text{se: } LS < x \leq xp + LS \rightarrow WA = LS \end{cases} \end{cases} \quad (32)$$

$$WB = \begin{cases} \text{Para: } \frac{y}{R} \geq 1 \rightarrow WB = 0 \\ \text{Para: } \frac{y}{R} < 1 \begin{cases} \rightarrow LC = \sqrt{R^2 - y^2} \\ \text{se: } \text{sen}\alpha \leq \frac{y}{R} < 1 \rightarrow LS = \sqrt{R^2 - y^2} \\ \text{se: } \frac{y}{R} < \text{sen}\alpha \rightarrow LS = y \cdot \text{cotg}\alpha \\ \text{se: } x \leq -LC \text{ ou } x > xp + LS \rightarrow WB = 0 \\ \text{se: } xp - LC < x \leq xp + LS \rightarrow WB = x - xp \\ \text{se: } -LC < x \leq xp - LC \rightarrow WB = -LC \end{cases} \end{cases} \quad (33)$$

A integral da equação 25 é calculada pelo mesmo processo numérico da expressão 17, sendo as distâncias radiais do ponto de amostragem ao aspersor e as intensidades de precipitação do aspersor PLONA-RL300 calculadas, respectivamente, através das expressões 16 e 18.

### 3.2.3.2 Perfis sobrepostos e uniformidade de aplicação de água

Na Figura 8 são apresentados os elementos geométricos considerados na simulação da sobreposição dos perfis móveis de aplicação de água de aspersores idênticos, movimentando-se com mesma velocidade ao longo de carreadores adjacentes e de comprimento finito.

Conforme indicado na Figura 8, os pontos de amostragem do perfil móvel sobreposto são identificados pelos índices “e” e “f”. Se forem considerados apenas valores de espaçamento que são múltiplos inteiros de  $\Delta y$ , o índice “e” assume valores entre 1 e  $N_s$ , sendo  $N_s$  determinado pela equação 18. O índice “f” assume valores entre 1 e  $N_x$ , sendo  $N_x$  determinado pela equação 23.

Considerando apenas valores de espaçamento entre carreadores compreendidos entre  $R$  e  $1,8R$  e assumindo que os perfis móveis de aplicação de água são idênticos e simétricos em relação ao eixo de deslocamento dos aspersores, a lâmina resultante da sobreposição lateral de dois perfis móveis adjacentes é calculada por:

$$IS_{(e',f)} = ID + IE$$

com:

$$ID = \begin{cases} \text{Para : } e' \leq Ny \rightarrow ID = IM_{(e',f)} \\ \text{Para : } e' > Ny \rightarrow ID = 0 \end{cases} \quad (34)$$

$$IE = \begin{cases} \text{Para : } e' > (N_s - Ny) \rightarrow IE = IM_{((N_s - e') + 1, f)} \\ \text{Para : } e' \leq (N_s - Ny) \rightarrow IE = 0 \end{cases}$$

com:  $1 \leq e \leq Ny$ ,  $1 \leq f \leq Nx$  e  $1 \leq e' \leq Ns$

em que  $IS_{(e',f)}$  é a lâmina de irrigação (mm) resultante da sobreposição lateral de dois perfis móveis adjacentes.

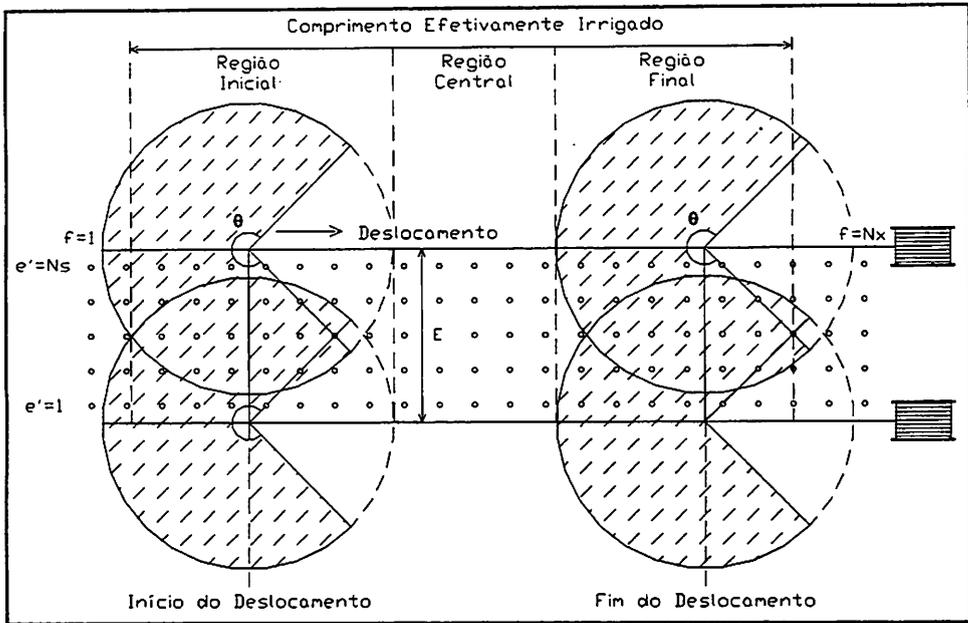


FIGURA 8 - Representação dos pontos de amostragem utilizadas no cálculo da uniformidade de aplicação de água nas diferentes regiões da faixa.

Na determinação da uniformidade das lâminas aplicadas são definidos os limites inferior ( $L_i$ ) e superior ( $L_s$ ), que representam o índice  $f$ , dos perfis móveis sobrepostos. Estes limites indicam o início e o fim da linha de coletores utilizados no cálculo da uniformidade para toda faixa efetivamente irrigada e para as regiões inicial, central e final da faixa irrigada e são dados por:

$$L_i = \begin{cases} Nx' - \text{Int} \left( \frac{|x|}{\Delta x} + 0,5 \right) + 1 & \text{com } x \leq 0 \\ Nx' + \text{Int} \left( \frac{x}{\Delta x} + 0,5 \right) + 1 & \text{com } x > 0 \end{cases} \quad (35)$$

$$Ls = Nx' + \text{Int}\left(\frac{x}{\Delta x} + 0,5\right) + 1 \quad \text{com } x > 0 \quad (36)$$

em que  $\text{Int}(\delta)$  representa a função matemática que retorna a parte inteira de  $\delta$ .

A uniformidade de aplicação de água, quando avaliada pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), é dada por:

$$\text{CUC} = \left( 1 - \frac{\sum_{e'=1}^{Ns} \sum_{f=Li}^{Ls} |IS_{(e',f)} - \bar{IS}'|}{Ns \cdot [(Ls - Li) + 1] \cdot \bar{IS}'} \right) \cdot 100 \quad (37)$$

em que  $\bar{IS}'$  é a lâmina (mm) média de precipitação dos perfis móveis sobrepostos  $IS_{(e',f)}$ .

### 3.3 Validação do aplicativo computacional

#### 3.3.1 Validação analítica do aplicativo computacional

Para validação do aplicativo computacional foi considerado um aspersor com perfil radial de distribuição de água com formato triangular. De acordo com Bittinger & Longenbaugh (1962), as intensidades de precipitação,  $i(r)$ , em função da distância radial,  $r$ , ao aspersor são dadas por:

$$i(r) = \begin{cases} \text{Para } : 0 \leq r \leq R \rightarrow i(r) = \frac{im \cdot 360 \cdot (R - r)}{R \cdot \theta} \\ \text{Para } : r > R \rightarrow i(r) = 0 \end{cases} \quad (38)$$

em que  $im$  é a intensidade de precipitação máxima ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

No perfil radial teórico triangular, o valor da intensidade de precipitação máxima equivale a 3 vezes o valor da intensidade de precipitação média do aspersor:

$$im = \frac{3000 \cdot Q}{\pi \cdot R^2} \quad (39)$$

As lâminas de irrigação aplicadas em coletores localizados transversalmente à linha de deslocamento de um aspersor com perfil de distribuição de água, descrito pela equação 38, são dadas por:

$$\begin{aligned}
 IM_{(e,f)} = \frac{im \cdot 360}{\theta} \int_{t1}^{t2} 1 - \frac{y \cdot a}{R} \cdot \sqrt{(tp - t)^2 + a^2} \cdot dt = \frac{im \cdot 360}{\theta} & \left\{ (t2 - t1) - \dots \right. \\
 - \frac{y \cdot a}{2 \cdot R} \cdot \left[ (t2 - tp) \cdot \sqrt{(tp - t2)^2 + a^2} - (t1 - tp) \cdot \sqrt{(tp - t2)^2 + a^2} + \right. & \\
 \left. \dots + a^2 \cdot \ln \left( \frac{(t2 - tp) + \sqrt{(tp - t2)^2 + a^2}}{(t1 - tp) + \sqrt{(tp - t1)^2 + a^2}} \right) \right] & \left. \right\} \quad (40) \\
 \text{com: } a = \frac{y \cdot tp}{\sqrt{R^2 - y^2}} \text{ e } tp = \frac{\sqrt{R^2 - y^2}}{V} &
 \end{aligned}$$

em que t1 é o tempo (h) que inicia a aplicação de água no coletor, e t2 é o tempo (h) que termina a aplicação de água no coletor.

O tempo que define o início, t1, e o término, t2, da aplicação de água nos coletores, a partir da velocidade de deslocamento do aspersor e das coordenadas x e y dos coletores, é calculado por:

$$t1 = \begin{cases} \text{Para: } \frac{y}{R} \geq 1 \rightarrow t1 = 0 \\ \\ \text{Para: } \frac{y}{R} < 1 \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow LC = \sqrt{R^2 - y^2} \\ \text{se: } \text{sen} \alpha \leq \frac{y}{R} < 1 \rightarrow LS = \sqrt{R^2 - y^2} \\ \text{se: } \frac{y}{R} < \text{sen} \alpha \rightarrow LS = y \cdot \cot \alpha \\ \text{se: } x \leq -LC \text{ ou } x > xp + LS \rightarrow t1 = 0 \\ \text{se: } -LC < x \leq LS \rightarrow t1 = \frac{LC - x}{V} \\ \text{se: } LS < x \leq xp + LS \rightarrow t1 = \frac{LC - LS}{V} \end{array} \right. \end{cases} \quad (41)$$

$$t_2 = \begin{cases} \text{Para: } \frac{y}{R} \geq 1 \rightarrow t_2 = 0 \\ \\ \text{Para: } \frac{y}{R} < 1 \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow LC = \sqrt{R^2 - y^2} \\ \text{se: } \text{sen} \alpha \leq \frac{y}{R} < 1 \rightarrow LS = \sqrt{R^2 - y^2} \\ \text{se: } \frac{y}{R} < \text{sen} \alpha \rightarrow LS = y \cdot \cot \alpha \\ \text{se: } x < -LC \text{ ou } x > xp + LS \rightarrow t_2 = 0 \\ \text{se: } -LC \leq x \leq xp - LC \rightarrow t_2 = \frac{2 \cdot LC}{V} \\ \text{se: } xp - LC < x \leq xp + LS \rightarrow t_2 = \frac{LC + (xp - x)}{V} \end{array} \right. \end{cases} \quad (42)$$

Na validação do aplicativo, foram comparadas as lâminas de irrigação aplicadas nos perfis móveis, da região central da faixa irrigada, e as lâminas médias aplicadas nos perfis longitudinais, geradas pelo aplicativo computacional e pelo processo analítico de integração do perfil triangular de distribuição de água, a partir do coeficiente de determinação. Os valores de lâminas aplicadas foram estabelecidas para o aspersor em deslocamento linear, com velocidade constante de  $50 \text{ m.h}^{-1}$ , ângulos de giro de  $270^\circ$  e  $360^\circ$ , bocais  $30 \times 6 \text{ mm}$ , vazão de  $56,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  e raio de alcance de  $50,6 \text{ m}$ .

### 3.3.2 Validação experimental do aplicativo computacional

Na validação experimental não foi possível ensaiar o aspersor PLONA-RL300 em sistemas autopropelidos de irrigação. Deste modo, foram utilizados os valores de ensaios de campo, obtidos por Rocha (2000), de um sistema autopropelido de irrigação com aspersor do tipo canhão hidráulico setorial, de reversão lenta, da marca Sime, modelo Big River, com inclinação do jato d'água de  $25^\circ$ . Estes ensaios foram realizados em uma área com declividade inferior a  $1\%$ , tanto no sentido transversal como no longitudinal, e nas condições climáticas de velocidade do vento inferiores a  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ .

Os perfis móveis de aplicação de água, obtidos nos ensaios de campo e utilizados na validação, foram para o aspersor Big River trabalhando com ângulo de giro de 270° e com bocais principal com diâmetros de 22 mm sob as pressões de serviço de 392 kPa (velocidade de 40 e 70 m.h<sup>-1</sup>) e 490 kPa (velocidade de 40 m.h<sup>-1</sup>) e 24 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa (velocidade de 70 m.h<sup>-1</sup>). Neste trabalho foram utilizadas três linhas de pontos de amostragem espaçadas em 3 metros e com espaçamento entre coletores igual a 1 metro. Na validação do aplicativo, a média das três linhas de coletores foi comparada com os valores previstos de lâminas coletadas a cada 2 m entre pontos de amostragem.

Para possibilitar a entrada dos dados referente às características técnicas do aspersor Big River no aplicativo computacional foram avaliados, na bancada de ensaios do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras, a vazão, o raio de alcance e o perfil radial de distribuição de água para o aspersor operando com ângulo de giro de 270°, bocais principal de 22 e 24 mm e pressões de serviço de 392 e 490 kPa.

As lâminas de irrigação dos perfis móveis de aplicação de água, observadas no campo e geradas pelo aplicativo computacional, foram comparadas pelo coeficiente de determinação. Os valores de CUC, observados e simulados para espaçamentos de carregadores compreendidos entre R e 1,8R, também foram comparados pelo coeficiente de determinação, sendo ajustada uma equação linear para predição dos valores de CUC observados em função dos simulados. Também foi calculado o erro relativo, entre os valores de CUC simulados e observados, pela expressão:

$$Er = \frac{\text{Abs}(CUC_{\text{obs}} - CUC_{\text{sim}})}{CUC_{\text{obs}}} \cdot 100 \quad (43)$$

em que Er é o erro relativo (%) entre os valores simulados e observados;  $CUC_{\text{obs}}$  é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%) observado; e  $CUC_{\text{sim}}$  é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%) simulado.

### **3.4 Simulações para recomendações do aspersor PLONA-RL300**

As simulações da uniformidade de aplicação das lâminas de irrigação do aspersor PLONA-RL300 foram realizadas a partir dos perfis adimensionais típicos, que representam cada grupo de perfil.

Na simulação da uniformidade de aplicação das lâminas de irrigação para a região central da faixa irrigada, cada perfil típico do aspersor foi reconstituído, considerando todas as condições de pressões de serviço e diâmetros de bocal principal, para sua forma dimensional. As simulações foram realizadas com o aspersor operando com ângulos de giro compreendidos entre 180 e 360° e regularmente espaçados em 30°, velocidade de deslocamento no carreador de 50 m.h<sup>-1</sup> e espaçamentos entre carreadores de 50 a 110% do diâmetro molhado do aspersor. Os valores de ângulos de giro do aspersor, espaçamentos entre carreadores e CUC foram plotados em gráficos de contornos e, a partir destes, foram avaliadas as condições operacionais do aspersor PLONA-RL300 que geram maiores valores de CUC.

Nas simulações da uniformidade da aplicação das lâminas de irrigação, para toda extensão da faixa irrigada e para as regiões inicial e final da faixa irrigada, foi considerado o aspersor PLONA-RL300 deslocando-se em uma trajetória linear no carreador, com velocidade constante de 50 m.h<sup>-1</sup>, diâmetro de bocais de 30 x 6 mm, pressão de serviço de 490 kPa, ângulo de giro igual a 360° e respectivo perfil radial típico. As simulações foram realizadas para diferentes pontos de início (igual ao raio de alcance, coincidindo com o início do deslocamento e um valor calculado) e fim (igual ao raio de alcance, coincidindo com o fim do deslocamento e um valor calculado) de faixa irrigada, respectivamente, em relação ao início e ao final do deslocamento do aspersor. Também foram realizadas simulações da uniformidade de aplicação de água considerando tempos de operação do aspersor estacionado nas extremidades do carreador.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300

#### 4.1.1 Vazão e raio de alcance

As equações 44 e 45 foram geradas, respectivamente, a partir dos valores observados de vazão e raio de alcance do aspersor. Na Figura 9 é apresentada a representação gráfica das equações geradas.

$$Q = 0,00145 \cdot b^{2,189} \cdot p^{0,504} \quad (44)$$

$$R = 0,553 \cdot b^{0,533} \cdot p^{0,435} \quad (45)$$

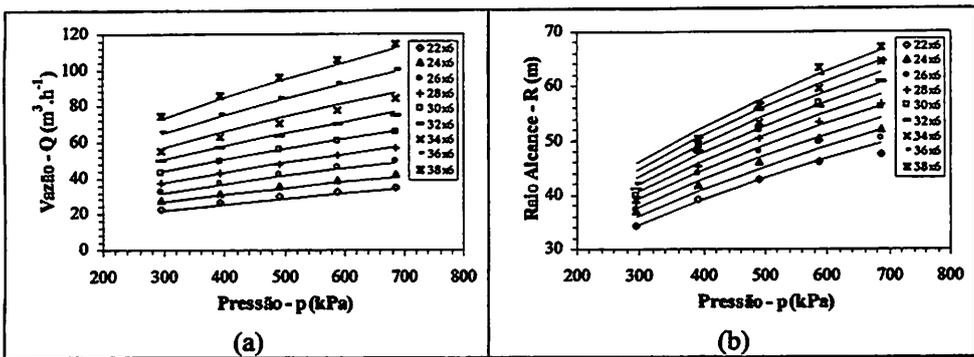


FIGURA 9 - Representação das curvas de vazão (a) e raio de alcance (b), geradas em função da pressão de serviço e diâmetro do bocal principal.

Os altos coeficientes de determinação obtidos no ajuste para a equação da vazão ( $r^2 = 0,9963$ ) e para a equação do raio de alcance ( $r^2 = 0,9525$ ) indicam a adequação do modelo proposto.

#### 4.1.2 Perfis radiais de distribuição de água típicos

Na Figura 10 é demonstrada a variação do erro médio ( $E_K$ ) na estimativa da intensidade de precipitação adimensional ( $ia_{j,\beta}$ ) em função do número  $K$  de perfis típicos considerados. Nota-se que quando os perfis observados são agrupados em torno de três perfis típicos ( $K = 3$ ), o erro médio na intensidade adimensional de precipitação é 0,147 e, a partir deste ponto, o aumento no número de perfis típicos,  $K$ , causa uma redução gradual no erro médio, justificando-se, portanto, a adoção de apenas três perfis típicos.

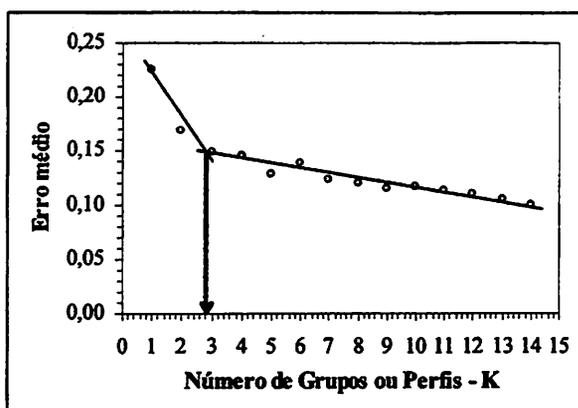


FIGURA 10 - Variação do erro médio ( $E_K$ ) na estimativa da intensidade adimensional ( $ia_{j,\beta}$ ) da aplicação de água em função do número ( $K$ ) de perfis típicos adotados.

O erro médio observado é pouco superior ao encontrado por Colombo et al. (1996), que obtiveram um erro médio igual a 0,119 ao utilizarem 2 perfis típicos para representar 18 perfis adimensionais, e também superior ao valor de 0,116, encontrado por Solomon & Bezdek (1980), ao agruparem 42 perfis adimensionais em 3 perfis típicos. Para as diferentes combinações de bocais e pressão de serviço do aspersor PLONA-RL300, que resultam em valores de



intensidade média de aplicação de água entre 4 e 11 mm.h<sup>-1</sup>, o erro médio obtido tem um valor dimensional que varia entre 0,6 e 1,6 mm.h<sup>-1</sup>

Na Figura 11 são apresentadas as três formas geométricas típicas assumidas pelos 45 perfis adimensionais levantados. Nas curvas apresentadas, as barras verticais delimitam vinte faixas de variação com comprimento equivalente a  $\pm 1$  desvio padrão de cada agrupamento. Na Tabela 1 são mostrados os valores numéricos dos vinte pares adimensionais de distância e intensidade aplicação de água ( $ra_j$ ,  $ia_j$ ) característicos dos perfis típicos I, II e III mostrados na Figura 11. Na Tabela 2, apresentam-se as condições operacionais (bocal versus pressão de serviço) que determinam a ocorrência de cada um dos três perfis típicos.

Observa-se, na Tabela 2, que o perfil típico I ocorre com maior frequência quando os menores bocais (22 x 6 e 24 x 6 mm) são utilizados e que a ocorrência dos perfis típicos II e III é limitada a bocais maiores que 24 x 6 mm. Para os bocais maiores que 24 x 6 mm, o perfil II está associado às menores pressões de serviço, enquanto o perfil III está associado às maiores pressões de serviço.

Duas exceções ao comportamento geral, descrito anteriormente, são encontradas na Tabela 2: a ocorrência do perfil III com bocais de 22 x 6 mm na pressão de 294 kPa e a ocorrência do perfil I com bocais de 28 x 6 mm na pressão de 686 kPa. Seguindo recomendações de Solomon & Bezdek (1980), o autor assinalou sugestões para estes dois casos que levam em consideração o conjunto dos resultados e não apenas os resultados individuais.

Analisando a forma dos três perfis típicos, verifica-se que o perfil II (Figura 11b) é característico de um perfil “doughnut”, derivado de condições operacionais com baixa pressão de serviço, o que é confirmado na Tabela 2, que limita sua ocorrência a condições operacionais de baixa pressão de serviço. Já o formato irregular dos perfis I e III (Figura 11a e 11c) difere dos perfis clássicos

(triangular, elíptico ou doughnut) descritos por Kincaid (1991) e Keller & Bliesner (1990).

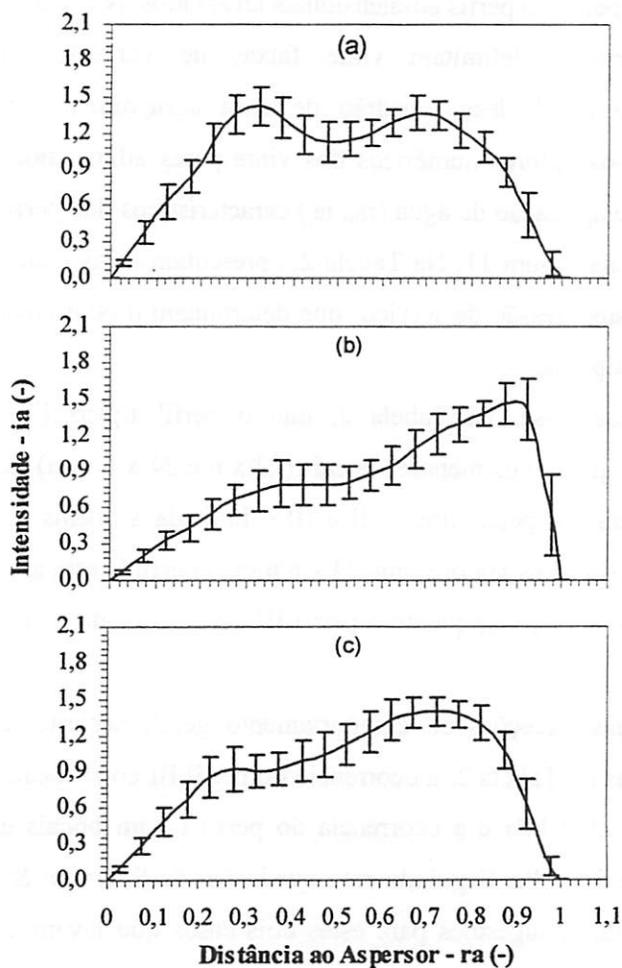


FIGURA 11 - Representação dos perfis adimensionais I (a), II (b) e III (c) do aspersor PLONA-RL300.

TABELA 1 - Fração da intensidade média de aplicação de água ( $ia_j$ ) em função da fração ( $ra_j$ ) do raio de alcance para os três perfis típicos do aspersor PLONA-RL300.

| Fração do raio de alcance - $ra_j$ (-) | Fração da intensidade média - $ia_j$ (-) |           |            |
|--|--|-----------|------------|
|  | Perfil I                                 | Perfil II | Perfil III |
| 0,025                                  | 0,128                                    | 0,067     | 0,098      |
| 0,075                                  | 0,383                                    | 0,202     | 0,293      |
| 0,125                                  | 0,632                                    | 0,331     | 0,488      |
| 0,175                                  | 0,841                                    | 0,430     | 0,679      |
| 0,225                                  | 1,118                                    | 0,552     | 0,855      |
| 0,275                                  | 1,353                                    | 0,664     | 0,924      |
| 0,325                                  | 1,423                                    | 0,735     | 0,912      |
| 0,375                                  | 1,324                                    | 0,794     | 0,927      |
| 0,425                                  | 1,186                                    | 0,794     | 0,989      |
| 0,475                                  | 1,126                                    | 0,782     | 1,041      |
| 0,525                                  | 1,148                                    | 0,804     | 1,122      |
| 0,575                                  | 1,196                                    | 0,869     | 1,226      |
| 0,625                                  | 1,286                                    | 0,947     | 1,324      |
| 0,675                                  | 1,369                                    | 1,089     | 1,384      |
| 0,725                                  | 1,345                                    | 1,210     | 1,402      |
| 0,775                                  | 1,224                                    | 1,289     | 1,374      |
| 0,825                                  | 1,083                                    | 1,375     | 1,299      |
| 0,875                                  | 0,870                                    | 1,466     | 1,072      |
| 0,925                                  | 0,525                                    | 1,411     | 0,638      |
| 0,975                                  | 0,116                                    | 0,535     | 0,107      |

Com base nas equações 44 e 45, e seguindo as orientações das Tabelas 1 e 2, os perfis adimensionais podem ser convertidos na sua forma dimensional para reproduzir as características de distribuição de água do aspersor PLONA-

RL300 operando em diferentes combinações de diâmetro de bocal e pressão de serviço desejada.

TABELA 2 - Ocorrência dos perfis adimensionais típicos (I, II ou III) em função das condições operacionais do aspersor PLONA-RL300.

| Pressão<br>(kPa) | Diâmetro dos Bocais (mm) |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  | 22 x 6                   | 24 x 6 | 26 x 6 | 28 x 6 | 30 x 6 | 32 x 6 | 34 x 6 | 36 x 6 | 38 x 6 |
| 294              | III*                     | II     |
| 392              | I                        | I      | III    | III    | III    | III    | II     | II     | II     |
| 490              | I                        | I      | III    | III    | III    | III    | II     | III    | II     |
| 588              | I                        | I      | III    |
| 686              | I                        | III    | III    | I**    | III    | III    | III    | III    | III    |

(\*) Recomenda-se utilizar o perfil I, (\*\*) recomenda-se utilizar o perfil III.

## 4.2 Aplicativo computacional para simulação da uniformidade

### 4.2.1 Instalação do aplicativo

O aplicativo computacional desenvolvido e denominado *SimulaSoft - Versão 1.0.0* é compatível a computadores que trabalham com ambiente operacional Windows. Os arquivos de instalação foram gerados pelo recurso *Package & Deployment Wizard* do *Microsoft Visual Basic 6*. O arquivo de instalação, ajudas, figuras e demais utilitários para as configurações do programa ocupam um espaço de aproximadamente 13 Megabytes.

A instalação do programa é realizada a partir do *Setup* do Cd de instalação. O programa executável *SimulaSoft* e os arquivos de ajuda são gravados no subdiretório *SimulaSoft*, criado pelo programa de instalação, localizado no diretório *Arquivos de Programas*.

## 4.2.2 Janela principal

Na abertura do programa (Figura 12) são demonstrados o título, os autores, a versão e a observação para configurar o separador de casas decimais do computador para ponto (“.”).

O programa consta de dois menus, um para proceder às simulações da uniformidade de aplicação de água com base nas características técnicas do aspersor PLONA-RL300 e outro com os tópicos de ajuda (Figura 12).



FIGURA 12 - Entrada e janela principal com menus do programa.

## 4.2.3 Simulações da uniformidade de aplicação de água

### 4.2.3.1 Características técnicas do aspersor

Clicando no menu Simulações-RL300, a janela aberta é a das características técnicas do aspersor PLONA-RL300. Nesta janela, o usuário seleciona a pressão de serviço ( $\text{kgf.cm}^{-2}$ , m.c.a. ou kPa) a partir da barra de

deslocamento horizontal e escolhe os diâmetros de bocais do aspersor. Em função dos parâmetros selecionados, o programa determina a vazão, o raio de alcance e o perfil radial de distribuição do aspersor (Figura 13).

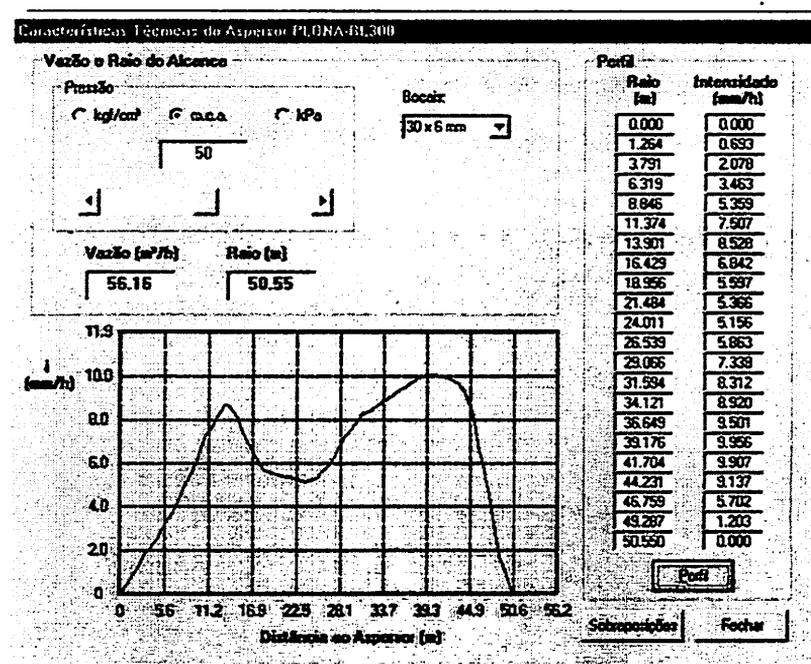


FIGURA 13 - Janela do aplicativo que apresenta vazão, raio de alcance e perfil radial do aspersor PLONA-RL300 em função das características operacionais (bocal principal versus pressão de serviço).

#### 4.2.3.2 Perfil móvel de aplicação de água

Seqüencialmente à janela com as características técnicas do aspersor é estabelecido o perfil móvel de aplicação de água do aspersor para a região central da faixa irrigada. Para tanto, o usuário deve informar o ângulo de giro e a velocidade de recolhimento da mangueira do autopropelido (Figura 14).

O programa apresenta os valores das lâminas de irrigação aplicadas no perfil móvel de forma gráfica e numérica (Figura 14).

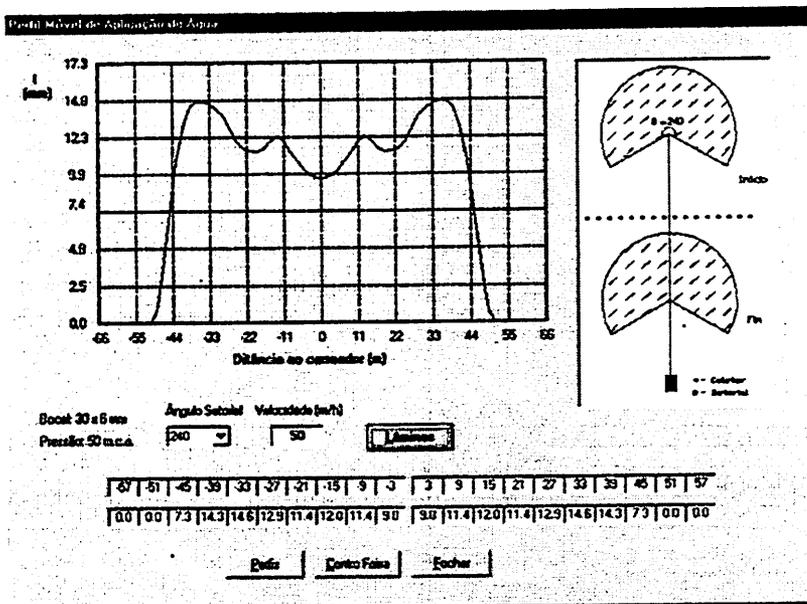


FIGURA 14 - Janela do aplicativo para determinação do perfil móvel de aplicação de água do aspersor.

#### 4.2.3.3 Uniformidade na região central da faixa irrigada

A partir do perfil móvel de aplicação de água do aspersor é calculada a uniformidade de distribuição das lâminas de irrigação para diversos espaçamentos entre carregadores. Estes valores são apresentados em termos gráficos e numéricos; posteriormente, o programa informa o valor de espaçamento entre carregadores que proporciona o maior valor de CUC (Figura 15).

Selecionando o valor de espaçamento entre carregadores, que proporciona o maior CUC ou outro valor de espaçamento disponível, o usuário pode verificar as sobreposições efetuadas pelo aplicativo, as quais são apresentadas gráfica e numericamente (Figura 15).

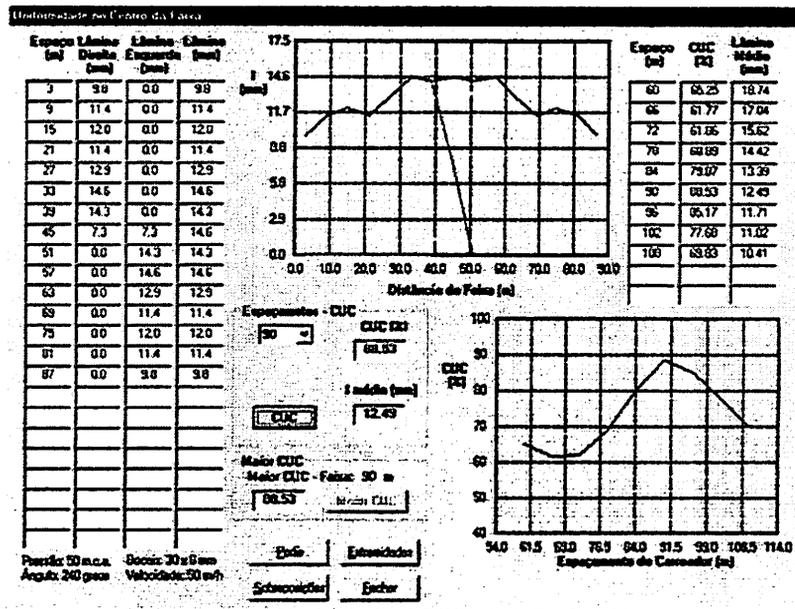


FIGURA 15 - Janela do aplicativo para estabelecer o CUC no centro da faixa irrigada para os diferentes espaçamentos entre carreadores.

#### 4.2.3.4 Uniformidade nas extremidades e em toda faixa irrigada

Escolhido o espaçamento entre carreadores a ser adotado, o programa possui a opção de cálculo do CUC para início, fim e em toda faixa irrigada (Figura 16). Para estas determinações deve ser informado o ponto onde começa e termina a faixa irrigada e a distância a ser percorrida pelo aspersor.

As opções oferecidas de comprimento longitudinal para início da faixa irrigada, em relação ao ponto de partida do aspersor, são: igual ao raio de alcance, coincidindo com o início do deslocamento, calculado e outro valor menor que o raio de alcance (opção do usuário). Para a extremidade final da faixa irrigada as opções de comprimento longitudinal, em relação ao ponto de chegada do aspersor, são: igual ao raio de alcance, coincidindo com o fim do deslocamento, calculado e outro valor menor que o raio de alcance. Com estas informações, o programa calcula e apresenta os valores de uniformidade de

aplicação de água na faixa irrigada; também é apresentado, de forma gráfica, o perfil longitudinal médio de aplicação de água (Figura 16). Caso o usuário deseje, é possível fazer tempos de parada nas extremidades da faixa irrigada, para isto, deve-se entrar com outro valor ou aceitar aquele proposto pelo programa.

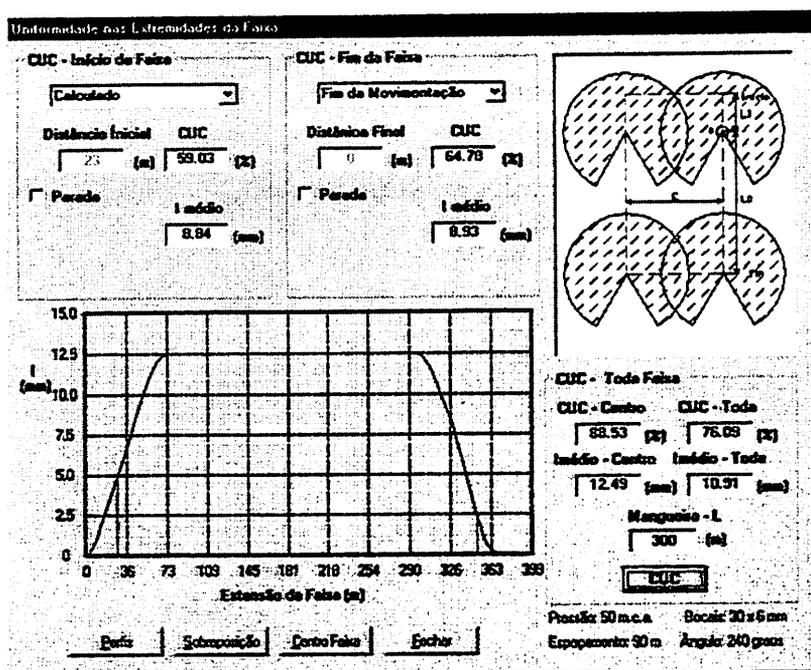


FIGURA 16 - Janela do aplicativo para estabelecer o CUC nas extremidades e em toda faixa irrigada para o espaçamento entre carregadores escolhido.

#### 4.2.4 Ajuda do programa

De modo a esclarecer como foram obtidas as características técnicas do aspersor PLONA-RL300 e a seqüências de cálculos efetuadas nas simulações da uniformidade de aplicação de água, o programa oferece o tópico de ajuda, o qual pode ser acessado a partir da tecla F1 ou pelo menu de ajuda.

Acessando a ajuda do programa, o conteúdo é carregado para uma janela (padrão de ajuda do Windows) em que são apresentados os tópicos de ajuda disponíveis (Figura 17); também é possível fazer a pesquisa a partir de palavras chave.

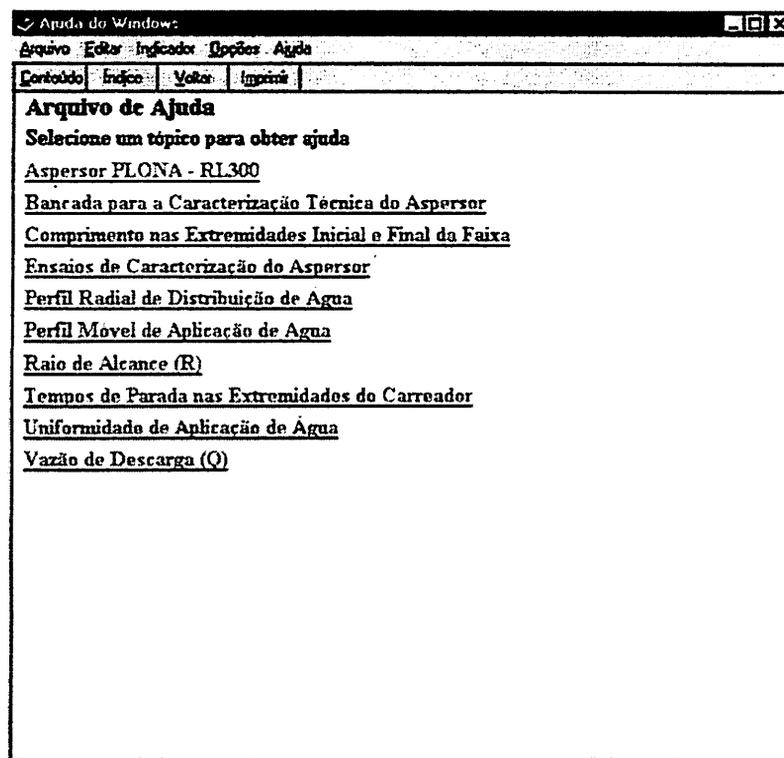


FIGURA 17 - Janela principal do arquivo de ajuda.

## 4.3 Validação do aplicativo computacional

### 4.3.1 Validação analítica do aplicativo computacional

Na Figura 18 é apresentado o perfil radial de distribuição de água, teórico, tipo triangular, que foi utilizado na validação do aplicativo computacional. Com base neste perfil radial foram geradas, a partir do aplicativo

e analiticamente, as lâminas de irrigação aplicadas nos perfis móveis (Figura 19 a e b) e nos perfis longitudinais médios (Figura 20 a e b) de aplicação de água do aspersor PLONA-RL300, deslocando-se linearmente a uma velocidade constante de  $50 \text{ m.h}^{-1}$  e com os ângulos de giro iguais a  $270^\circ$  e  $360^\circ$ .

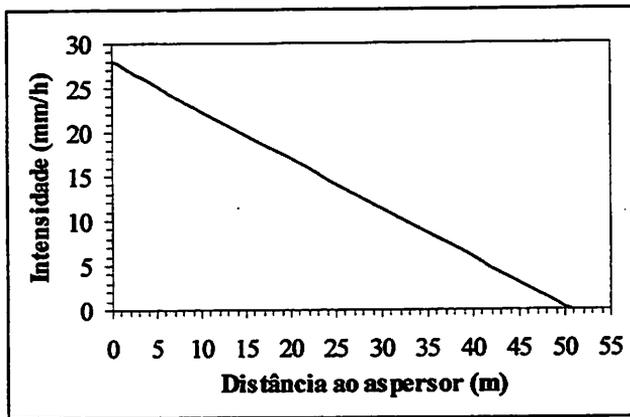


FIGURA 18 - Perfil teórico radial de distribuição de água, tipo triangular, utilizado na validação analítica do aplicativo computacional.

Comparando os perfis móveis de aplicação de água do aspersor operando com ângulos de giro de  $270^\circ$  e  $360^\circ$ , gerados pelo aplicativo, com os perfis móveis computados analiticamente, verifica-se que em ambos os casos os valores são praticamente iguais (Figura 19 a e b), demonstrados pelos valores unitários dos coeficientes de determinação.

Da mesma forma, os valores de perfis longitudinais médios de aplicação de água, obtidos com o aplicativo computacional e analiticamente, para o aspersor deslocando-se linearmente, com velocidade constante ao longo do carreador e operando com os ângulos de giro de  $270^\circ$  e  $360^\circ$ , foram praticamente os mesmos (Figura 20 a e b).

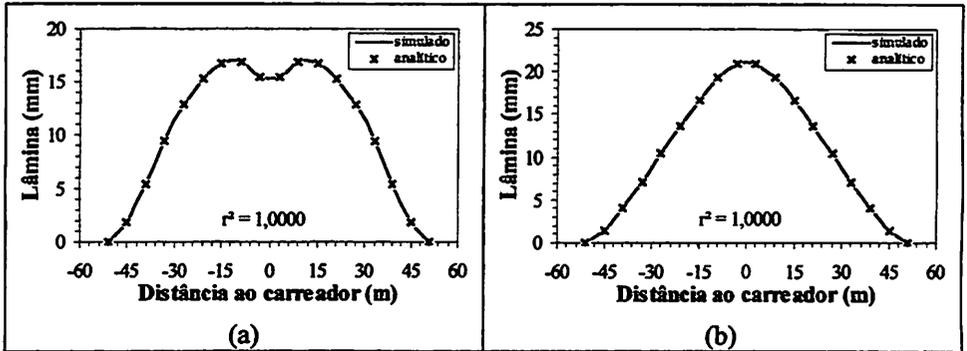


FIGURA 19 - Perfis móveis de aplicação de água gerados pelo aspersor PLONA-RL300 em deslocamento linear, com velocidade constante de  $50 \text{ m.h}^{-1}$ , operando com ângulos de giro de  $270^\circ$  (a) e  $360^\circ$  (b) e apresentando perfil radial do tipo triangular.

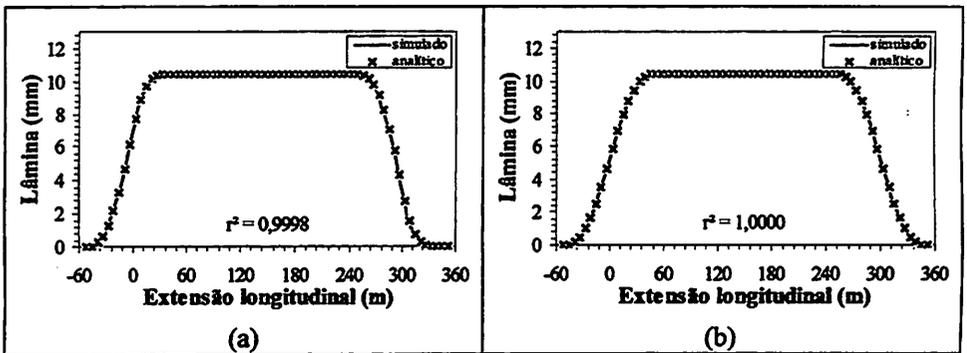


FIGURA 20 - Perfis longitudinais médios de aplicação de água gerados pelo aspersor PLONA-RL300 em deslocamento linear, com velocidade constante de  $50 \text{ m.h}^{-1}$ , operando com ângulos de giro de  $270^\circ$  (a) e  $360^\circ$  (b) e apresentando perfil radial do tipo triangular.

#### 4.3.2 Validação experimental do aplicativo computacional

Comparando os valores dos perfis móveis de aplicação de água do aspersor e os valores de CUC observados em campo com os valores simulados (Figuras 21 e 22), verifica-se uma dispersão maior entre estes valores, em relação aos perfis móveis de aplicação de água obtidos na validação analítica.

Estas variações decorreram principalmente das condições climáticas de vento (direção e velocidade) no momento da realização dos ensaios de campo.

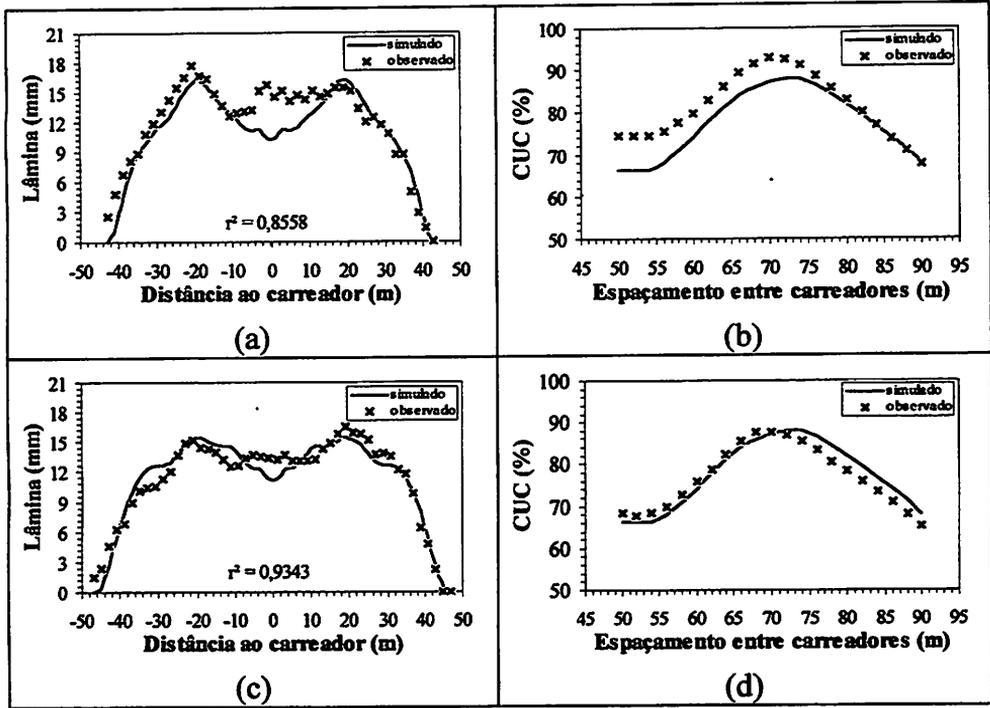


FIGURA 21 - Perfis móveis de aplicação de água e CUC simulados e observados com o aspersor Big River para bocal principal de 22 mm, ângulo de giro de 270°, velocidade constante de 40 m.h<sup>-1</sup> e pressões de serviço de 392 kPa (a) e (b) e 490 kPa (c) e (d).

Embora o aplicativo não considere as variações climáticas de vento, verifica-se que os coeficientes de determinação, entre os valores observados e simulados (Figuras 21 e 22), das lâminas foram todos superiores a 0,85. Molle & Gat (2000) consideram este valor como mínimo para estabelecer um modelo de simulação como válido. Nas Figuras 21 e 22 observa-se que, apesar das diferenças entre as lâminas aplicadas, os valores observados e simulados de

CUC são próximos, demonstrados pela mesma tendência destes valores em relação ao espaçamento entre carregadores.

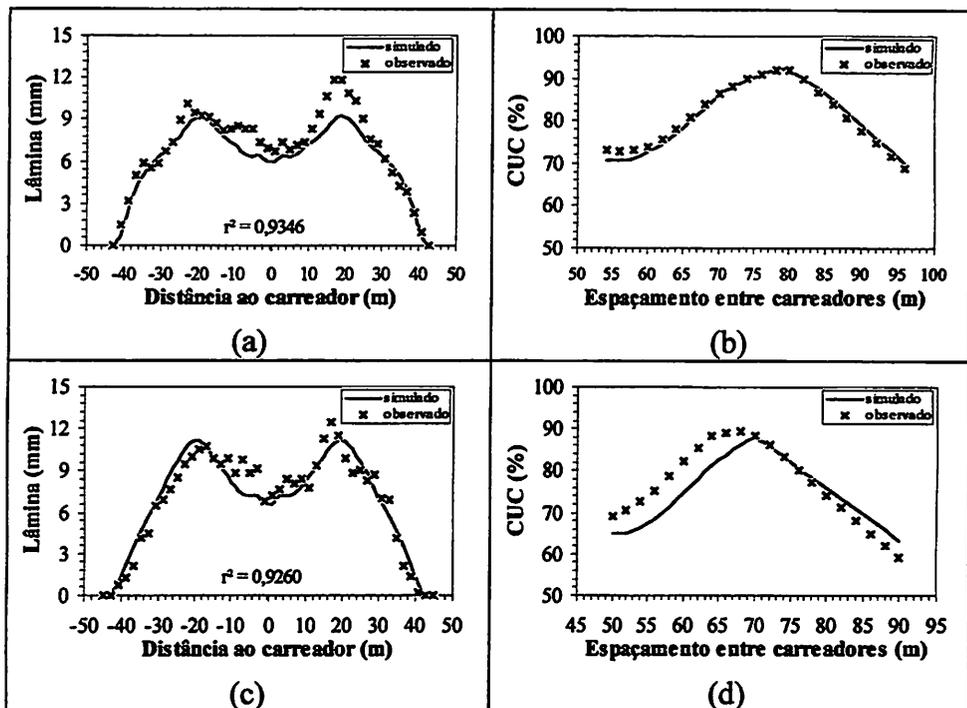


FIGURA 22 - Perfis móveis de aplicação de água e CUC simulados e observados com aspersor Big River, para bocal principal de 22 mm (a) e (b) e 24 mm (c) e (d), ângulo de giro de 270°, velocidade constante de 70 m.h<sup>-1</sup> e pressão de serviço de 392 kPa.

Na Figura 23 (a) é demonstrada a relação linear entre os valores de CUC simulados e observados; estes valores apresentaram um coeficiente de determinação igual a 83,24% e um coeficiente angular da reta igual a 42° 43', denotando boa correlação entre os valores simulados e observados. Montero et al. (2001), na validação de seu modelo de simulação para aspersão convencional, encontraram um coeficiente de determinação de 89% e um coeficiente angular

da reta igual a  $48^{\circ} 29'$  entre os valores de CUC simulados e observados, com respectivos erros absoluto e relativo iguais a 2,7% e 3,4%.

Na Figura 23 (b) é apresentado o erro relativo percentual entre os valores de CUC simulados e observados nas 85 simulações de espaçamento entre carreadores, sendo o erro relativo médio igual a 3,57%. O maior valor de erro relativo foi de 11%, gerado por um erro absoluto de  $(CUC_{obs} - CUC_{sim})$  8,17%, e o menor erro relativo foi de 0,04%, gerado por um erro absoluto de 0,03%. Colombo (1991), na validação de seu modelo de simulação para autopropelidos, verificou um erro absoluto máximo de 7% em 28 comparações de CUC efetuadas (simulado versus observado) para diferentes espaçamentos entre carreadores e tendo o aspersor trabalhado com ângulo de giro igual a  $360^{\circ}$ . Também Vories et al. (1987) encontraram valores de erro absoluto, máximo e mínimo, respectivamente, de 13 e 1% entre os valores simulados e observados para um sistema de irrigação por aspersão convencional.

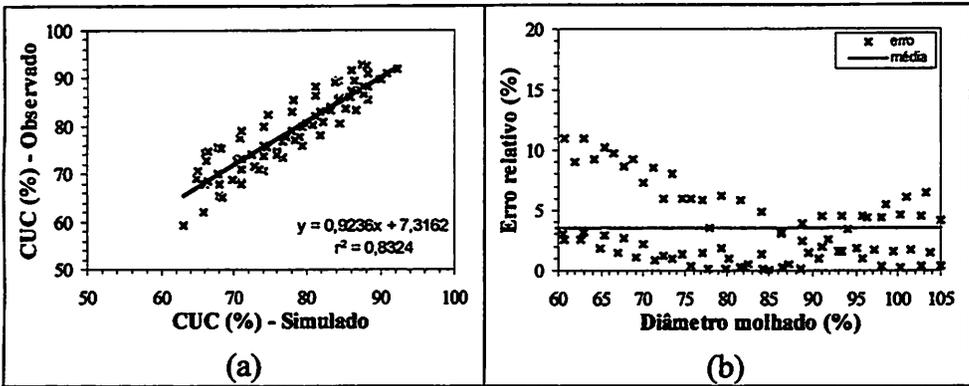


FIGURA 23 - Relação dos valores, observados e simulados, de CUC (a) e erro relativo (b), em função do espaçamento entre carreadores, obtido nos ensaios de campo e pelo aplicativo computacional.

## 4.4 Recomendações de uso do aspersor PLONA-RL300

### 4.4.1 Ângulo de giro e espaçamento entre carregadores

Na Figura 24 é simulada a influência do ângulo de giro no perfil de aplicação de água em um plano perpendicular à trajetória linear de deslocamento do aspersor. Os perfis apresentados nesta figura simulam aqueles que seriam determinados a campo com o auxílio de coletores dispostos perpendicularmente à trajetória de deslocamento do aspersor, em uma condição de ausência de ventos. Analisando a Figura 24, verifica-se que um dos perfis mais uniformes é o gerado pelo ângulo de giro de 210°, concordando com Keller & Bliesner (1990). Os perfis mais desuniformes (Figura 24) foram os apresentados pelos ângulos de giro iguais a 300 e 330°.

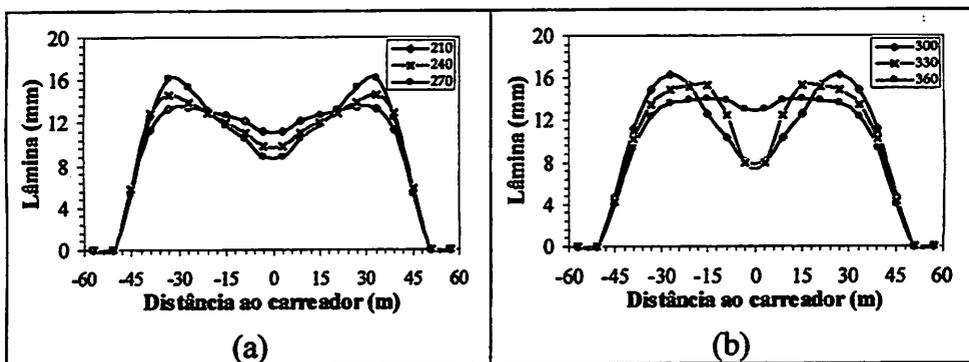


FIGURA 24 - Simulações dos perfis móveis de aplicação de água do aspersor PLONA-RL300 em deslocamento linear, com velocidade constante de  $50 \text{ m.h}^{-1}$  e operando com bocais de  $30 \times 6 \text{ mm}$  na pressão de serviço de 490 kPa e ângulos de giro de 210, 240, 270, 300, 330 e 360°.

Na Figura 25 são apresentados os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) simulados para equipamentos autopropelidos com o aspersor PLONA-RL300, operando com diferentes regulagens do mecanismo

setorial e em diferentes espaçamentos entre carregadores, que foram expressos em porcentagem do diâmetro molhado do aspersor. Os valores de CUC obtidos com as diferentes combinações de pressão e diâmetro de bocais foram agrupados conforme o tipo do perfil típico (Tabela 2).

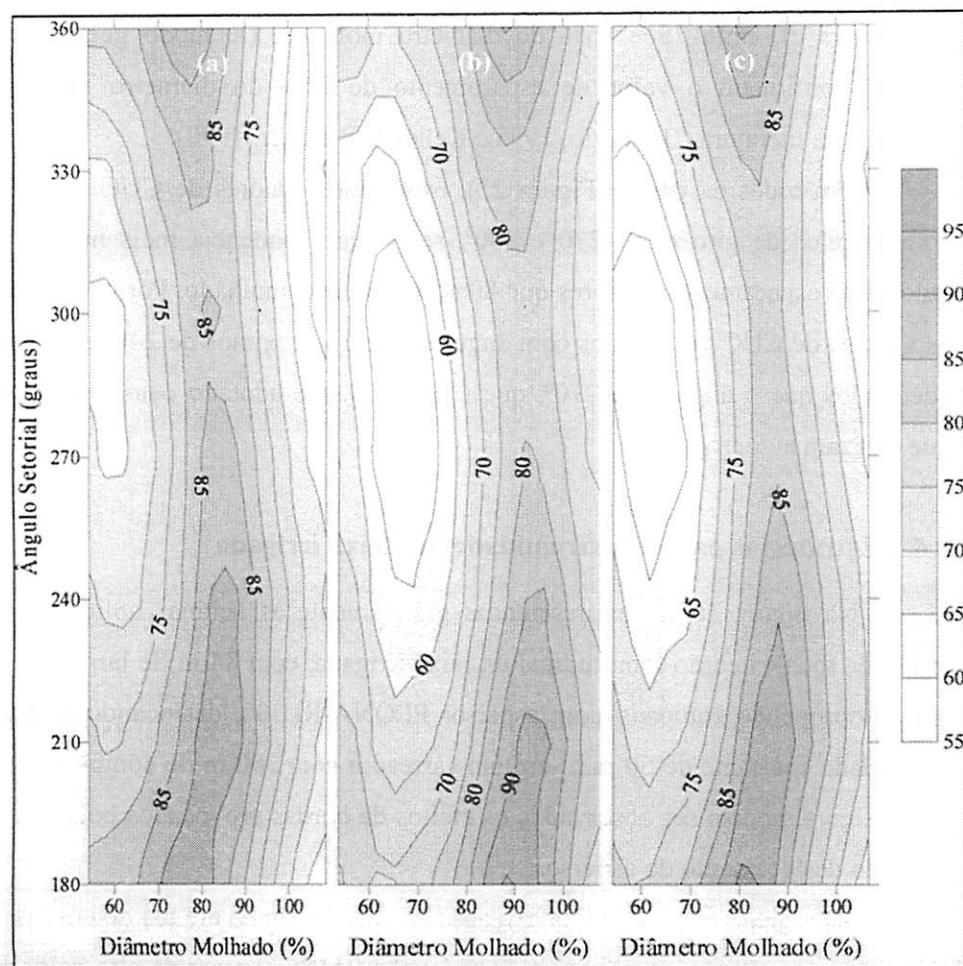


FIGURA 25 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen (%) em função do ângulo de giro e do espaçamento entre carregadores para as três diferentes formas assumidas I (a), II (b) e III (c) pelo perfil radial adimensional do aspersor PLONA-RL300.

Para o perfil típico I (Figura 25 a) verifica-se que, na ausência de ventos e independentemente do ângulo de giro, espaçamentos entre carreadores situados na faixa de 70 a 80% do diâmetro molhado do aspersor tendem a apresentar melhores valores de CUC. No caso do perfil típico II (Figura 25 b), estes valores encontram-se entre 80 a 90% do diâmetro molhado, e para o perfil típico III (Figura 25 c), entre 75 e 85% do diâmetro molhado. De modo geral, estes valores confirmam o valor de espaçamento de 80% do diâmetro molhado sugerido na literatura (Bernardo, 1995 e Keller & Bliesner, 1990).

Em todos os perfis (Figura 25), os menores valores de CUC ocorrem com ângulos de giro entre 270 e 300°, sendo esta tendência mais nítida em valores de espaçamento menores que 80% do diâmetro molhado. Por outro lado, os valores de CUC observados com ângulos de giro próximos de 240° são mais adequados que o ângulo de 270°, que é normalmente adotado pelos irrigantes que utilizam autopropelidos.

#### **4.4.2 Estratégias para as extremidades da faixa irrigada**

Na Figura 26 são representadas graficamente as lâminas aplicadas ao longo de toda extensão longitudinal da faixa irrigada, com 84 m de largura, por um autopropelido equipado com aspersor PLONA-RL300, deslocando-se com velocidade constante de 50 m.h<sup>1</sup> em um carreador com 300 m de comprimento. Nesta figura, podem ser observados os efeitos de bordas provocados pelo início e fim do deslocamento do aspersor.

Na região central da faixa irrigada, local onde não há efeitos de bordas, é obtido, a partir das simulações, um CUC igual a 94,9%. Apesar do alto valor de CUC obtido nesta região, se o irrigante desejar irrigar toda a extensão longitudinal da faixa, o CUC cairá para 57,7%, devido à baixa uniformidade de aplicação das lâminas de irrigação no início e no final da faixa irrigada (Figura

26), geradas, respectivamente, por valores de CUC no início e no final da faixa irrigada iguais a 39,7% (Tabela 3).

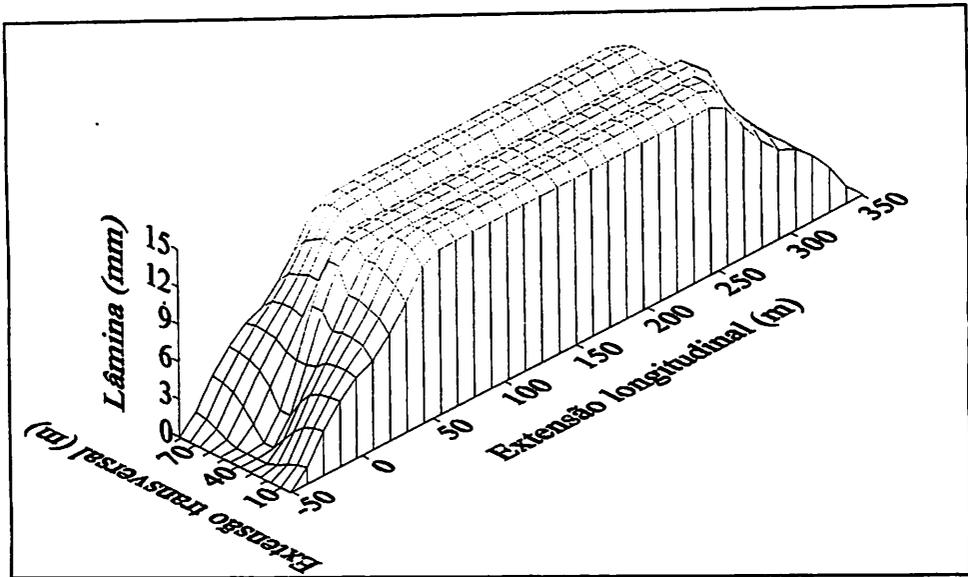


FIGURA 26 - Lâminas aplicadas por um equipamento autopropelido, sem tempo de parada, operando com aspersor PLONA-RL300 com bocais de 30 x 6 mm na pressão de 490 kPa, com ângulo de giro de 360° e se deslocando com velocidade constante de 50 m.h<sup>-1</sup> em carregadores adjacentes de 300 m de comprimento e com espaçamento de 84 m.

Caso a faixa irrigada tivesse início no ponto coincidente com o início do deslocamento do aspersor e seu final, no ponto onde coincide o fim do deslocamento do aspersor, o CUC em toda faixa irrigada seria igual a 88,1% (Tabela 3). De modo a minimizar as perdas de área irrigada e água, os pontos de início e fim das extremidades da faixa irrigada são calculados, pelo aplicativo computacional, a partir das expressões de Scaloppi & Colombo (1995). Desta forma, o valor de CUC simulado em toda faixa irrigada foi igual a 69,2% (Tabela 3), valor este muito próximo a 70%, o que, de acordo com Matsura &

Testezlaf (2003), é aceitável para sistemas de irrigação por aspersão do tipo autopropelido.

TABELA 3 - Coeficientes de uniformidade de Christiansen no início ( $CUC_I$ ), no centro ( $CUC_C$ ), no fim ( $CUC_F$ ) e em toda a faixa irrigada ( $CUC_T$ ), sem tempos de parada nas extremidades do carreador e considerando diferentes pontos de início e término da faixa: Igual ao Raio de Alcance (IR), Início do Deslocamento (ID), Calculado (C) e Fim do Deslocamento (FD).

| Início da Faixa* | Fim da Faixa** | $CUC_I$<br>(%) | $CUC_C$<br>(%) | $CUC_F$<br>(%) | $CUC_T$<br>(%) |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IR - (51 m)      | IR - (51 m)    | 39,7           | 94,9           | 39,7           | 57,7           |
| IR - (51 m)      | C - (28 m)     | 39,7           | 94,9           | 56,5           | 63,2           |
| IR - (51 m)      | FD - (0 m)     | 39,7           | 94,9           | 79,7           | 70,3           |
| C - (28 m)       | IR - (51 m)    | 56,5           | 94,9           | 39,7           | 63,2           |
| C - (28 m)       | C - (28 m)     | 56,5           | 94,9           | 56,5           | 69,2           |
| C - (28 m)       | FD - (0 m)     | 56,5           | 94,9           | 79,7           | 77,4           |
| ID - (0 m)       | IR - (51 m)    | 79,7           | 94,9           | 39,7           | 70,3           |
| ID - (0 m)       | C - (28 m)     | 79,7           | 94,9           | 56,5           | 77,4           |
| ID - (0 m)       | FD - (0 m)     | 79,7           | 94,9           | 79,7           | 88,1           |

\* Em relação ao ponto de partida do aspersor.

\*\* Em relação ao ponto de chegada do aspersor.

Na Figura 27 é mostrado o efeito provocado pela adoção de tempos de operação com o aspersor estacionado nas extremidades do carreador; esta estratégia proporciona elevar as lâminas aplicadas e o CUC (Tabela 4) nas extremidades da faixa irrigada.

Tempos de operação com o aspersor estacionado nas extremidades do carreador de 61 minutos, e irrigando toda extensão longitudinal da faixa irrigada, proporcionam uma aplicação mais uniforme das lâminas de irrigação nas

extremidades inicial e final da faixa (Figura 27), elevando o CUC, nestas regiões, de 39,7% para 64,6% (Tabela 3 e 4). Com o incremento no valor do CUC, nas extremidades da faixa irrigada, o valor de CUC para toda a faixa foi de 79,1%, valor considerado por Bernardo (1995) como bom para sistemas de irrigação por aspersão.

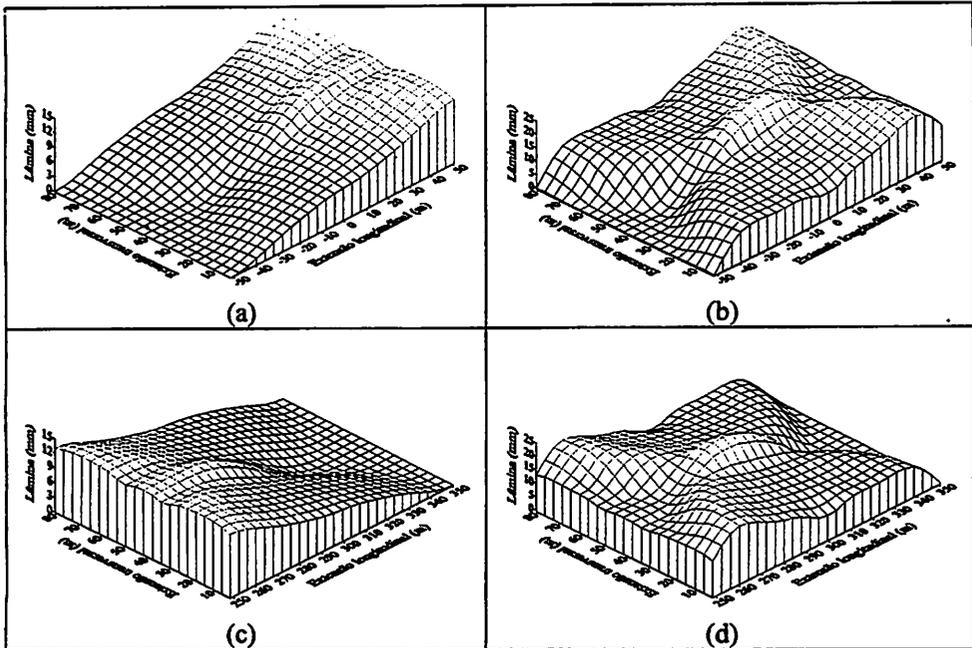


FIGURA 27 - Lâminas aplicadas, sem tempo de parada (a) e (c) e com tempo de parada de 61 min (b) e (d) nas extremidades do carreador, por um autopropelido operando com o aspersor PLONA-RL300 com bocais 30 x 6 mm na pressão de 490 kPa, com ângulo de giro de 360° e se deslocando com velocidade constante de 50 m.h<sup>1</sup> em carreadores adjacentes espaçados em 84 m.

Considerando os valores de início e término da faixa irrigada calculados, o tempo de operação com o aspersor estacionado nas extremidades do carreador, estabelecido pelo aplicativo computacional, foi de 34 minutos. Deste modo, o valor de CUC para toda faixa irrigada foi elevado em 15,2 pontos percentuais

em relação ao valor estabelecido sem tempos de operação com o aspersor estacionado nas extremidades do carreador (Tabela 3 e 4). No caso do início e fim da faixa irrigada coincidindo, respectivamente, com o início e fim do deslocamento do aspersor, não são sugeridos tempos de parada nas extremidades do carreador.

TABELA 4 - Coeficientes de uniformidade de Christiansen no início ( $CUC_I$ ), no centro ( $CUC_C$ ), no fim ( $CUC_F$ ) e em toda a faixa irrigada ( $CUC_T$ ), com tempos de parada nas extremidades do carreador ( $T_p$ ) e considerando diferentes pontos de início e término da faixa: Igual ao Raio de Alcance (IR) -  $T_p = 61$  min, Início do Deslocamento (ID) -  $T_p = 0$  min, Calculado (C) -  $T_p = 34$  min e Fim do Deslocamento (FD) -  $T_p = 0$  min.

| Início da Faixa* | Fim da Faixa** | $CUC_I$<br>(%) | $CUC_C$<br>(%) | $CUC_F$<br>(%) | $CUC_T$<br>(%) |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IR - (51 m)      | IR - (51 m)    | 64,6           | 94,9           | 64,6           | 79,1           |
| IR - (51 m)      | C - (28 m)     | 64,6           | 94,9           | 72,5           | 81,7           |
| IR - (51 m)      | FD - (0 m)     | 64,6           | 94,9           | 79,7           | 83,2           |
| C - (28 m)       | IR - (51 m)    | 72,5           | 94,9           | 64,6           | 81,7           |
| C - (28 m)       | C - (28 m)     | 72,5           | 94,9           | 72,5           | 84,4           |
| C - (28 m)       | FD - (0 m)     | 72,5           | 94,9           | 79,7           | 86,1           |
| ID - (0 m)       | IR - (51 m)    | 79,7           | 94,9           | 64,6           | 83,2           |
| ID - (0 m)       | C - (28 m)     | 79,7           | 94,9           | 72,5           | 86,1           |
| ID - (0 m)       | FD - (0 m)     | 79,7           | 94,9           | 79,7           | 88,1           |

\* Em relação ao ponto de partida do aspersor.

\*\* Em relação ao ponto de chegada do aspersor.

## 5 CONCLUSÕES

Na caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300, uma equação para a vazão, uma para o raio de alcance e três perfis típicos são suficientes para representar as características técnicas do aspersor, trabalhando em diferentes condições operacionais de bocal e pressão de serviço.

O aplicativo computacional permite fazer, de forma rápida, uma análise da uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação do tipo autopropelido e, com base nesta, estabelecer as condições operacionais de ângulo de giro, espaçamento entre carregadores, comprimentos longitudinais de faixa irrigada e tempos de operação com o aspersor estacionado nas extremidades do carregador que proporcionem maiores CUC.

Na validação analítica dos perfis móveis e dos perfis longitudinais médios de aplicação de água do aspersor operando com ângulos de giro de 270° e 360° e produzindo um perfil radial teórico triangular, praticamente não houve diferenças entre os valores obtidos pelo aplicativo e analiticamente. Na validação experimental, a relação entre os valores de CUC, simulados e observados, apresentou um erro relativo médio de 3,57%.

Nas simulações com o aspersor PLONA-RL300, verificou-se que espaçamentos entre carregadores equivalentes a 80% do diâmetro molhado do aspersor resultam em melhores valores de uniformidade de aplicação de água e ângulos de giro próximos de 240° geram maiores valores de CUC em relação ao ângulo de 270°, normalmente recomendado pelos projetistas. Para elevar o CUC nas extremidades da faixa irrigada, devem ser promovidas estratégias de tempos de operação com o aspersor estacionado nas extremidades do carregador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARUAÚJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher. 1998. 669 p.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 6. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 657 p.
- BITTINGER, M. W.; LONGENBAUGH, R. A. Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 5, n. 1, p. 26-30, Jan./Feb. 1962.
- CAMPOS FILHO, F. F. **Algoritmos numéricos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos - LTC, 2001. 383 p.
- CARRIÓN, P.; TARJUELO, J. M.; MONTERO, J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. I Description of model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p.73-84, June 2001.
- CHARMELO, L. **Desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido, sob diferentes condições operacionais**. 1990. 50 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- CHRISTOFIDIS, D. Irrigação a Fronteira hídrica na produção de alimentos. **ITEM**, São Paulo, n. 54, p. 46-55, abr./jun. 2002.
- COLOMBO, A. **Simulação do desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido de irrigação**. 1991. 120 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação de Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.
- COLOMBO, A.; YAMAGI JÚNIOR, T.; GRIMARÃES, K. H. Perfis adimensionais de distribuição de água de aspersores e sua utilização em estudos de equipamentos autopropelidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25.; CONGRESSO LATINO AMERICANO INGENIERIA AGRÍCOLA, 2., 1996, Bauru. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 1996. p. 226.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. **Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento**. 2002. 110 p. Tese (Doutorado em

Irrigação de Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

COSTA, E. F.; VIEIRA, R. F.; VIANA, P. A. **Quimigação**: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 315 p.

FISCHER, G. R.; WALLENDER, W. W. Collector size and test duration effects on sprinkler water distribution measurement. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 31, n. 2, p. 538-542, Mar./Apr. 1988.

FOLEGATTI, M. V.; AZEVEDO, B. M.; PEREIRA, F. A.; PAZ, V. P. S. **Irrigação por aspersão**: autopropelido. Piracicaba, SP: ESALQ. Departamento de Engenharia Rural, 1997. 30p. (Série Didática).

FRIZZONE, J. A. **Planejamento da irrigação: uniformidade e eficiência da irrigação**. Piracicaba, SP: ESALQ. Departamento de Engenharia Rural, 1997. 53 p. (Série Didática, 3).

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

GRANT, T. W.; ANDERSON, W.; ROCHESTER, E. W. Constant and variable-angle sprinklers for traveler irrigators. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 27, n. 4, p. 1106-1110, July/Aug. 1984.

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. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KINCAID, D. C. Impact sprinkler pattern modification. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 34, n. 6, p. 2397-2402, 1991.

- LI, J. Sprinkler performance as function of nozzle geometrical parameters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 4, p. 244-247, July/Aug. 1996.
- LOUIE, M.; 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.
- MARTÍN-BENITO, J. M. T.; GÓMEZ, M. V.; PARDO, J. L. Working conditions of sprinkler to optimize application of water. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 118, n. 6, p. 895-913, Nov./Dec. 1992.
- MATEOS, L. Assessing whole-field uniformity of stationary sprinkler irrigation systems. **Irrigation Science**, New York, v. 18, n. 2, p. 73-81, May 1998.
- MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Autopropelido. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. p. 179-207.
- MERRIAM, J. K.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 271 p.
- MOLLE, B.; GAT, Y. L. Model of water applications under pivot sprinkler. II Calibration and results. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 126, n. 6, p. 348-354, Nov./Dec. 2000.
- MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; CARRIÓN, P. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. II Calibration and validation of the model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p. 85-98, May 2001.
- OLITTA, A. F. T. **Os métodos de irrigação**. São Paulo: Nobel, 1978. 267 p.
- OMARY, M.; SUMNER, H. Water distribution for irrigation machine with small spray nozzles. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 127, n. 3, p. 156-160, May/June 2001.
- OSTERNO, F. M. T. **Avaliação da performance do pivô central usando modelo computacional**. 1994. 112 p. Dissertação (Mestrado Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- PRADO, G; ULLMANN, M. N.; VILELA, L. A. A.; CARVALHO, H. P. Características hidráulicas do conjunto turbina e mangueira de um equipamento

de irrigação autopropelido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2003.

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

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

**ROCHA, W. W. Influência de ângulos setoriais e pressões de serviço na uniformidade de distribuição de água de um equipamento de irrigação autopropelido.** 1998. 46 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação de Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

**ROCHESTER, E. W. Initial delay requirements in traveler irrigation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, v. 26, n. 1, p. 137-140, Jan./Feb. 1983a.**

**ROCHESTER, E. W. Water distributions with initial stationary sets in traveler irrigation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, v. 26, n. 4, p. 1105-1108, July/Aug. 1983b.**

**ROCHESTER, E. W.; FLOOD JR, C. A.; HACKWELL, S. G. Pressure losses from hose coiling on hard-hose travelers. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, v. 33, n. 3, p. 834-838, May/June 1990.**

**RODRIGUES, L. N.; MELLO, J. L. P.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M. Coeficientes de uniformidade: sensibilidade a mudanças nos fatores operacionais. Irriga, Botucatu, v. 2, n. 2, p. 90-99, 1997.**

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

**RUELLE, P.; MALHOL, J. C.; QUINONES, H. GRANIER, J. Using NIWASAVE to simulate impacts of irrigation heterogeneity on yield and nitrate leaching when using a traveling rain gun system in a shallow soil context in**

Charente (France). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 63, n. 1, p. 15-31, Nov. 2003. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/agwat>>. Acesso em: 10 ago. 2003.

SCALOPPI, E. J.; COLOMBO, A. Avaliação de critérios para dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersores autopropelidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 95., 1995, Viçosa. **Anais...** Jaboticabal: FCAVJ/UNESP, 1995. 9 p.

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.

SOLOMON, K. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. **Transactions of the American of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 22, n. 5, p. 1078-1080, 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.

SOUZA R. O. R. M. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação automatizado para áreas experimentais**. 2001. 70 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação de Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

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

VICTORIA, F. R. B. **Avaliação de aspersores para operação em baixa pressão**. 1992. 130 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação de Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

VILAS BOAS, M. A. **Análise de métodos de amostragem da distribuição espacial de água de aspersores rotativos**. 1994. 121 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação de Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

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

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

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

YANAGI JÚNIOR, T.; FERREIRA, E.; COLOMBO, A. Dimensionamento e predição de água em sistemas de irrigação por aspersores autopropelidos. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 302-310, jul./set. 1995.

WITHERS, B.; VIPONDS, S. **Irrigation: design and practice**. London: B. T. Batsford, 1974.  
306 p.

ZAGGO, S. P.; COLOMBO, A.; GIL, O. F.; SCALOPPI, E. J. Simulação de desempenho de sistema de irrigação com aspersor autopropelido. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis. **Anais...** Sorocaba: Centro Nacional de Engenharia Agrícola - Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. p. 283-308.

## ANEXOS A

|           | <b>Página</b>  |
|-----------|--|
| TABELA 1A | Valores de vazão e raio de alcance, em função da pressão de serviço e dos bocais, obtidos nos ensaios de caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300.....74                                     |
| TABELA 2A | Valores de vazão e raio de alcance, em função da pressão de serviço e dos bocais, obtidos nos ensaios de caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300.....74                                     |
| TABELA 3A | Valores de vazão e raio de alcance, em função da pressão de serviço e dos bocais, obtidos nos ensaios de caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300.....74                                     |
| TABELA 4A | Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 22 x 6 mm.....75 |
| TABELA 5A | Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 24 x 6 mm.....76 |
| TABELA 6A | Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 26 x 6 mm.....77 |
| TABELA 7A | Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 28 x 6 mm.....78 |
| TABELA 8A | Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 30 x 6 mm.....79 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| TABELA 9A  | Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 32 x 6 mm..... | 80 |
| TABELA 10A | Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 34 x 6 mm..... | 81 |
| TABELA 11A | Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 36 x 6 mm..... | 82 |
| TABELA 12A | Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 38 x 6 mm..... | 83 |

TABELA 1A - Valores de vazão e raio de alcance, em função da pressão de serviço e dos bocais, obtidos nos ensaios de caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300.

| Pressão (kPa) | Bocais 22 x 6 mm                         |          | Bocais 24 x 6 mm                         |          | Bocais 26 x 6 mm                         |          |
|---------------|--|----------|--|----------|--|----------|
|               | Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) | Raio (m) | Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) | Raio (m) | Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) | Raio (m) |
| 294           | 23,01                                    | 34,22    | 27,42                                    | 36,87    | 32,39                                    | 37,14    |
| 392           | 26,46                                    | 39,08    | 31,80                                    | 41,82    | 37,36                                    | 43,84    |
| 490           | 29,72                                    | 42,83    | 35,35                                    | 46,14    | 41,75                                    | 47,97    |
| 588           | 32,39                                    | 46,14    | 38,82                                    | 50,50    | 45,85                                    | 49,48    |
| 686           | 35,01                                    | 47,45    | 41,86                                    | 52,01    | 49,52                                    | 50,51    |

TABELA 2A - Valores de vazão e raio de alcance, em função da pressão de serviço e dos bocais, obtidos nos ensaios de caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300.

| Pressão (kPa) | Bocal 28 x 6 mm                          |          | Bocal 30 x 6 mm                          |          | Bocal 32 x 6 mm                          |          |
|---------------|--|----------|--|----------|--|----------|
|               | Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) | Raio (m) | Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) | Raio (m) | Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) | Raio (m) |
| 294           | 36,97                                    | 38,58    | 42,97                                    | 39,92    | 49,07                                    | 41,03    |
| 392           | 42,68                                    | 45,37    | 49,74                                    | 47,94    | 56,74                                    | 47,95    |
| 490           | 47,95                                    | 50,51    | 55,73                                    | 52,04    | 63,48                                    | 55,48    |
| 588           | 52,41                                    | 53,45    | 60,73                                    | 56,80    | 69,60                                    | 55,97    |
| 686           | 56,59                                    | 56,63    | 65,95                                    | 56,07    | 74,99                                    | 60,72    |

TABELA 3A - Valores de vazão e raio de alcance, em função da pressão de serviço e dos bocais, obtidos nos ensaios de caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300.

| Pressão (kPa) | Bocal 34 x 6 mm                          |          | Bocal 36 x 6 mm                          |          | Bocal 38 x 6 mm                          |          |
|---------------|--|----------|--|----------|--|----------|
|               | Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) | Raio (m) | Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) | Raio (m) | Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) | Raio (m) |
| 294           | 55,06                                    | 39,00    | 65,34                                    | 41,18    | 74,30                                    | 39,10    |
| 392           | 63,62                                    | 49,45    | 75,35                                    | 50,45    | 86,20                                    | 50,41    |
| 490           | 70,88                                    | 53,45    | 84,34                                    | 56,45    | 95,92                                    | 56,50    |
| 588           | 77,93                                    | 59,50    | 92,31                                    | 62,06    | 105,27                                   | 63,16    |
| 686           | 84,10                                    | 64,31    | 99,87                                    | 64,40    | 114,30                                   | 67,16    |

**TABELA 4A - Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 22 x 6 mm.**

| <b>Bocal 22 x 6 mm</b> |                                 |            |            |            |            |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ra<br/>(-)</b>      | <b>ia (-)</b>                   |            |            |            |            |
|                        | <b>Pressão de Serviço (kPa)</b> |            |            |            |            |
|                        | <b>294</b>                      | <b>392</b> | <b>490</b> | <b>588</b> | <b>686</b> |
| 0,025                  | 0,094                           | 0,146      | 0,133      | 0,108      | 0,201      |
| 0,075                  | 0,281                           | 0,437      | 0,400      | 0,325      | 0,602      |
| 0,125                  | 0,468                           | 0,729      | 0,666      | 0,542      | 0,951      |
| 0,175                  | 0,615                           | 0,938      | 0,860      | 0,793      | 1,104      |
| 0,225                  | 0,627                           | 1,119      | 1,078      | 1,251      | 1,317      |
| 0,275                  | 0,736                           | 1,356      | 1,262      | 1,536      | 1,485      |
| 0,325                  | 0,958                           | 1,604      | 1,515      | 1,575      | 1,335      |
| 0,375                  | 1,270                           | 1,616      | 1,438      | 1,418      | 1,046      |
| 0,425                  | 1,327                           | 1,327      | 1,303      | 1,281      | 1,095      |
| 0,475                  | 1,259                           | 1,176      | 1,125      | 1,279      | 1,240      |
| 0,525                  | 1,152                           | 1,201      | 1,096      | 1,311      | 1,354      |
| 0,575                  | 1,195                           | 1,247      | 1,171      | 1,209      | 1,412      |
| 0,625                  | 1,252                           | 1,287      | 1,254      | 1,211      | 1,512      |
| 0,675                  | 1,297                           | 1,349      | 1,300      | 1,280      | 1,533      |
| 0,725                  | 1,253                           | 1,263      | 1,328      | 1,231      | 1,367      |
| 0,775                  | 1,203                           | 1,141      | 1,224      | 1,101      | 1,044      |
| 0,825                  | 1,128                           | 0,983      | 1,110      | 1,000      | 0,919      |
| 0,875                  | 1,000                           | 0,774      | 0,862      | 0,834      | 0,741      |
| 0,925                  | 0,770                           | 0,488      | 0,516      | 0,554      | 0,412      |
| 0,975                  | 0,291                           | 0,128      | 0,110      | 0,121      | 0,042      |

**TABELA 5A - Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 24 x 6 mm.**

| <b>Bocal 24 x 6 mm</b> |                                 |            |            |            |            |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ra<br/>(-)</b>      | <b>ia (-)</b>                   |            |            |            |            |
|                        | <b>Pressão de Serviço (kPa)</b> |            |            |            |            |
|                        | <b>294</b>                      | <b>392</b> | <b>490</b> | <b>588</b> | <b>686</b> |
| 0,025                  | 0,059                           | 0,093      | 0,120      | 0,120      | 0,076      |
| 0,075                  | 0,177                           | 0,280      | 0,359      | 0,360      | 0,228      |
| 0,125                  | 0,295                           | 0,466      | 0,598      | 0,600      | 0,380      |
| 0,175                  | 0,393                           | 0,633      | 0,779      | 0,820      | 0,606      |
| 0,225                  | 0,490                           | 0,782      | 1,049      | 1,208      | 0,936      |
| 0,275                  | 0,639                           | 1,088      | 1,303      | 1,557      | 1,118      |
| 0,325                  | 0,823                           | 1,318      | 1,466      | 1,468      | 1,081      |
| 0,375                  | 1,109                           | 1,430      | 1,214      | 1,212      | 1,017      |
| 0,425                  | 1,152                           | 1,335      | 0,930      | 0,974      | 1,079      |
| 0,475                  | 0,979                           | 1,210      | 0,829      | 0,874      | 1,173      |
| 0,525                  | 0,859                           | 1,041      | 0,880      | 1,074      | 1,319      |
| 0,575                  | 0,953                           | 1,010      | 1,080      | 1,244      | 1,438      |
| 0,625                  | 0,979                           | 1,094      | 1,246      | 1,342      | 1,502      |
| 0,675                  | 1,002                           | 1,139      | 1,358      | 1,376      | 1,542      |
| 0,725                  | 1,082                           | 1,171      | 1,407      | 1,410      | 1,472      |
| 0,775                  | 1,238                           | 1,087      | 1,377      | 1,438      | 1,259      |
| 0,825                  | 1,330                           | 1,107      | 1,305      | 1,207      | 1,058      |
| 0,875                  | 1,329                           | 1,062      | 1,027      | 0,919      | 0,833      |
| 0,925                  | 1,247                           | 0,954      | 0,608      | 0,363      | 0,434      |
| 0,975                  | 0,578                           | 0,356      | 0,076      | 0,076      | 0,058      |

TABELA 6A - Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 26 x 6 mm.

| <b>Bocal 26 x 6 mm</b> |                                 |            |            |            |            |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ra<br/>(-)</b>      | <b>ia (-)</b>                   |            |            |            |            |
|                        | <b>Pressão de Serviço (kPa)</b> |            |            |            |            |
|                        | <b>294</b>                      | <b>392</b> | <b>490</b> | <b>588</b> | <b>686</b> |
| 0,025                  | 0,086                           | 0,095      | 0,077      | 0,136      | 0,091      |
| 0,075                  | 0,259                           | 0,284      | 0,231      | 0,407      | 0,272      |
| 0,125                  | 0,398                           | 0,473      | 0,385      | 0,678      | 0,451      |
| 0,175                  | 0,602                           | 0,643      | 0,518      | 0,913      | 0,658      |
| 0,225                  | 0,751                           | 0,852      | 0,742      | 1,164      | 0,918      |
| 0,275                  | 0,946                           | 1,089      | 1,018      | 1,250      | 0,958      |
| 0,325                  | 1,116                           | 1,098      | 1,106      | 0,884      | 0,821      |
| 0,375                  | 1,076                           | 1,014      | 1,072      | 0,745      | 0,720      |
| 0,425                  | 0,962                           | 0,782      | 0,980      | 0,768      | 0,834      |
| 0,475                  | 0,867                           | 0,821      | 1,059      | 0,624      | 0,994      |
| 0,525                  | 0,798                           | 0,933      | 1,163      | 0,776      | 1,187      |
| 0,575                  | 0,874                           | 1,064      | 1,256      | 0,913      | 1,292      |
| 0,625                  | 0,970                           | 1,161      | 1,349      | 1,254      | 1,447      |
| 0,675                  | 1,096                           | 1,278      | 1,428      | 1,391      | 1,500      |
| 0,725                  | 1,281                           | 1,398      | 1,436      | 1,573      | 1,382      |
| 0,775                  | 1,412                           | 1,485      | 1,369      | 1,501      | 1,286      |
| 0,825                  | 1,422                           | 1,457      | 1,245      | 1,551      | 1,292      |
| 0,875                  | 1,332                           | 1,216      | 1,000      | 1,180      | 1,143      |
| 0,925                  | 1,229                           | 0,972      | 0,607      | 0,694      | 0,559      |
| 0,975                  | 0,124                           | 0,025      | 0,080      | 0,066      | 0,153      |

**TABELA 7A - Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 28 x 6 mm.**

| <b>Bocal 28 x 6 mm</b> |                                 |            |            |            |            |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ra<br/>(-)</b>      | <b>ia (-)</b>                   |            |            |            |            |
|                        | <b>Pressão de Serviço (kPa)</b> |            |            |            |            |
|                        | <b>294</b>                      | <b>392</b> | <b>490</b> | <b>588</b> | <b>686</b> |
| 0,025                  | 0,062                           | 0,071      | 0,085      | 0,083      | 0,101      |
| 0,075                  | 0,185                           | 0,213      | 0,255      | 0,248      | 0,303      |
| 0,125                  | 0,309                           | 0,355      | 0,423      | 0,414      | 0,501      |
| 0,175                  | 0,378                           | 0,499      | 0,560      | 0,608      | 0,799      |
| 0,225                  | 0,465                           | 0,765      | 0,805      | 0,970      | 1,138      |
| 0,275                  | 0,677                           | 1,013      | 1,042      | 1,144      | 1,238      |
| 0,325                  | 0,866                           | 1,091      | 1,006      | 1,023      | 1,100      |
| 0,375                  | 1,042                           | 1,046      | 0,877      | 0,943      | 1,216      |
| 0,425                  | 0,934                           | 0,935      | 0,859      | 1,068      | 1,242      |
| 0,475                  | 0,852                           | 0,912      | 0,973      | 1,134      | 1,274      |
| 0,525                  | 0,762                           | 0,957      | 1,092      | 1,161      | 1,231      |
| 0,575                  | 0,804                           | 1,026      | 1,252      | 1,203      | 1,198      |
| 0,625                  | 0,765                           | 1,110      | 1,323      | 1,185      | 1,342      |
| 0,675                  | 0,947                           | 1,142      | 1,419      | 1,312      | 1,618      |
| 0,725                  | 1,118                           | 1,177      | 1,481      | 1,325      | 1,581      |
| 0,775                  | 1,136                           | 1,353      | 1,354      | 1,318      | 1,376      |
| 0,825                  | 1,234                           | 1,559      | 1,199      | 1,191      | 1,035      |
| 0,875                  | 1,474                           | 1,428      | 0,990      | 1,036      | 0,744      |
| 0,925                  | 1,567                           | 0,891      | 0,754      | 0,814      | 0,308      |
| 0,975                  | 0,743                           | 0,094      | 0,157      | 0,132      | 0,017      |

TABELA 8A - Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 30 x 6 mm.

| <b>Bocal 30 x 6 mm</b> |                                 |            |            |            |            |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ra<br/>(-)</b>      | <b>ia (-)</b>                   |            |            |            |            |
|                        | <b>Pressão de Serviço (kPa)</b> |            |            |            |            |
|                        | <b>294</b>                      | <b>392</b> | <b>490</b> | <b>588</b> | <b>686</b> |
| 0,025                  | 0,054                           | 0,075      | 0,099      | 0,136      | 0,101      |
| 0,075                  | 0,162                           | 0,224      | 0,297      | 0,407      | 0,302      |
| 0,125                  | 0,271                           | 0,373      | 0,495      | 0,707      | 0,504      |
| 0,175                  | 0,377                           | 0,484      | 0,766      | 0,870      | 0,756      |
| 0,225                  | 0,520                           | 0,722      | 1,073      | 0,982      | 1,058      |
| 0,275                  | 0,706                           | 0,981      | 1,219      | 0,929      | 1,165      |
| 0,325                  | 0,922                           | 1,058      | 0,978      | 0,899      | 1,038      |
| 0,375                  | 0,989                           | 0,894      | 0,800      | 1,033      | 0,936      |
| 0,425                  | 0,918                           | 0,891      | 0,767      | 1,040      | 1,102      |
| 0,475                  | 0,824                           | 0,925      | 0,737      | 1,060      | 1,089      |
| 0,525                  | 0,778                           | 0,993      | 0,838      | 1,076      | 1,172      |
| 0,575                  | 0,841                           | 1,032      | 1,049      | 1,222      | 1,208      |
| 0,625                  | 0,932                           | 1,075      | 1,188      | 1,371      | 1,180      |
| 0,675                  | 1,060                           | 1,209      | 1,275      | 1,437      | 1,295      |
| 0,725                  | 1,212                           | 1,412      | 1,358      | 1,459      | 1,401      |
| 0,775                  | 1,329                           | 1,521      | 1,423      | 1,384      | 1,403      |
| 0,825                  | 1,424                           | 1,486      | 1,416      | 1,408      | 1,268      |
| 0,875                  | 1,538                           | 1,169      | 1,306      | 1,058      | 1,049      |
| 0,925                  | 1,390                           | 0,796      | 0,815      | 0,309      | 0,549      |
| 0,975                  | 0,140                           | 0,152      | 0,172      | 0,018      | 0,073      |

**TABELA 9A - Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 32 x 6 mm.**

| <b>Bocal 32 x 6 mm</b> |                                 |            |            |            |            |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ra<br/>(-)</b>      | <b>ia (-)</b>                   |            |            |            |            |
|                        | <b>Pressão de Serviço (kPa)</b> |            |            |            |            |
|                        | <b>294</b>                      | <b>392</b> | <b>490</b> | <b>588</b> | <b>686</b> |
| 0,025                  | 0,052                           | 0,071      | 0,096      | 0,146      | 0,095      |
| 0,075                  | 0,155                           | 0,213      | 0,289      | 0,439      | 0,284      |
| 0,125                  | 0,258                           | 0,355      | 0,482      | 0,731      | 0,478      |
| 0,175                  | 0,328                           | 0,513      | 0,654      | 0,982      | 0,927      |
| 0,225                  | 0,452                           | 0,768      | 0,866      | 1,216      | 0,979      |
| 0,275                  | 0,525                           | 0,920      | 0,776      | 0,987      | 0,869      |
| 0,325                  | 0,673                           | 0,984      | 0,670      | 0,902      | 0,858      |
| 0,375                  | 0,790                           | 0,994      | 0,694      | 1,002      | 0,972      |
| 0,425                  | 0,876                           | 1,013      | 0,781      | 1,110      | 1,029      |
| 0,475                  | 0,943                           | 1,043      | 0,961      | 1,100      | 1,151      |
| 0,525                  | 1,024                           | 1,056      | 1,131      | 1,149      | 1,211      |
| 0,575                  | 1,013                           | 1,112      | 1,223      | 1,337      | 1,239      |
| 0,625                  | 0,978                           | 1,135      | 1,341      | 1,292      | 1,430      |
| 0,675                  | 0,975                           | 1,137      | 1,470      | 1,381      | 1,438      |
| 0,725                  | 1,046                           | 1,156      | 1,592      | 1,430      | 1,387      |
| 0,775                  | 1,137                           | 1,222      | 1,625      | 1,262      | 1,310      |
| 0,825                  | 1,226                           | 1,307      | 1,413      | 1,138      | 1,166      |
| 0,875                  | 1,553                           | 1,209      | 1,173      | 0,916      | 1,000      |
| 0,925                  | 1,584                           | 1,015      | 0,512      | 0,594      | 0,680      |
| 0,975                  | 0,579                           | 0,339      | 0,025      | 0,098      | 0,026      |

TABELA 10A - Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 34 x 6 mm.

| <b>Bocal 34 x 6 mm</b> |                                 |            |            |            |            |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ra<br/>(-)</b>      | <b>ia (-)</b>                   |            |            |            |            |
|                        | <b>Pressão de Serviço (kPa)</b> |            |            |            |            |
|                        | <b>294</b>                      | <b>392</b> | <b>490</b> | <b>588</b> | <b>686</b> |
| 0,025                  | 0,071                           | 0,075      | 0,105      | 0,095      | 0,112      |
| 0,075                  | 0,213                           | 0,225      | 0,315      | 0,286      | 0,337      |
| 0,125                  | 0,355                           | 0,375      | 0,504      | 0,478      | 0,543      |
| 0,175                  | 0,497                           | 0,414      | 0,692      | 0,734      | 0,778      |
| 0,225                  | 0,591                           | 0,691      | 0,757      | 0,845      | 0,763      |
| 0,275                  | 0,763                           | 0,802      | 0,589      | 0,690      | 0,578      |
| 0,325                  | 0,835                           | 0,695      | 0,472      | 0,671      | 0,725      |
| 0,375                  | 0,766                           | 0,599      | 0,543      | 0,702      | 0,877      |
| 0,425                  | 0,613                           | 0,666      | 0,605      | 0,782      | 0,976      |
| 0,475                  | 0,430                           | 0,704      | 0,708      | 0,740      | 1,100      |
| 0,525                  | 0,540                           | 0,746      | 0,844      | 0,800      | 1,300      |
| 0,575                  | 0,655                           | 0,785      | 0,916      | 1,051      | 1,582      |
| 0,625                  | 0,701                           | 0,857      | 1,131      | 1,194      | 1,781      |
| 0,675                  | 0,882                           | 1,022      | 1,443      | 1,458      | 1,665      |
| 0,725                  | 0,982                           | 1,283      | 1,610      | 1,522      | 1,584      |
| 0,775                  | 1,160                           | 1,456      | 1,576      | 1,548      | 1,358      |
| 0,825                  | 1,452                           | 1,510      | 1,467      | 1,458      | 1,142      |
| 0,875                  | 1,764                           | 1,508      | 1,369      | 1,226      | 0,760      |
| 0,925                  | 1,753                           | 1,429      | 0,932      | 0,807      | 0,344      |
| 0,975                  | 1,011                           | 0,372      | 0,300      | 0,189      | 0,049      |

TABELA 11A - Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 36 x 6 mm.

| <b>Bocal 36 x 6 mm</b> |                                 |            |            |            |            |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ra<br/>(-)</b>      | <b>ia (-)</b>                   |            |            |            |            |
|                        | <b>Pressão de Serviço (kPa)</b> |            |            |            |            |
|                        | <b>294</b>                      | <b>392</b> | <b>490</b> | <b>588</b> | <b>686</b> |
| 0,025                  | 0,048                           | 0,067      | 0,074      | 0,134      | 0,132      |
| 0,075                  | 0,145                           | 0,200      | 0,223      | 0,402      | 0,396      |
| 0,125                  | 0,242                           | 0,333      | 0,371      | 0,689      | 0,651      |
| 0,175                  | 0,332                           | 0,453      | 0,451      | 0,835      | 0,793      |
| 0,225                  | 0,423                           | 0,573      | 0,597      | 0,812      | 0,787      |
| 0,275                  | 0,505                           | 0,692      | 0,738      | 0,760      | 0,767      |
| 0,325                  | 0,603                           | 0,656      | 0,812      | 0,805      | 0,856      |
| 0,375                  | 0,731                           | 0,705      | 0,905      | 0,942      | 1,022      |
| 0,425                  | 0,728                           | 0,819      | 1,034      | 1,132      | 1,346      |
| 0,475                  | 0,758                           | 0,948      | 1,160      | 1,224      | 1,428      |
| 0,525                  | 0,838                           | 0,969      | 1,213      | 1,282      | 1,345      |
| 0,575                  | 0,966                           | 1,027      | 1,221      | 1,162      | 1,331      |
| 0,625                  | 1,043                           | 1,201      | 1,304      | 1,347      | 1,360      |
| 0,675                  | 1,106                           | 1,224      | 1,313      | 1,502      | 1,342      |
| 0,725                  | 1,164                           | 1,241      | 1,286      | 1,507      | 1,290      |
| 0,775                  | 1,145                           | 1,260      | 1,305      | 1,460      | 1,275      |
| 0,825                  | 1,255                           | 1,303      | 1,284      | 1,304      | 1,180      |
| 0,875                  | 1,427                           | 1,311      | 1,080      | 0,959      | 1,039      |
| 0,925                  | 1,624                           | 1,217      | 0,851      | 0,350      | 0,456      |
| 0,975                  | 0,686                           | 0,402      | 0,162      | 0,064      | 0,025      |

**TABELA 12A - Representação da fração do raio de alcance (ra) versus fração da intensidade média de aplicação de água dos perfis adimensionais do aspersor PLONA-RL300, ensaiados com os bocais 38 x 6 mm.**

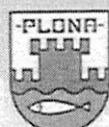
| <b>Bocal 38 x 6 mm</b> |                                 |            |            |            |            |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ra<br/>(-)</b>      | <b>ia (-)</b>                   |            |            |            |            |
|                        | <b>Pressão de Serviço (kPa)</b> |            |            |            |            |
|                        | <b>294</b>                      | <b>392</b> | <b>490</b> | <b>588</b> | <b>686</b> |
| 0,025                  | 0,041                           | 0,082      | 0,072      | 0,085      | 0,088      |
| 0,075                  | 0,123                           | 0,246      | 0,216      | 0,255      | 0,263      |
| 0,125                  | 0,206                           | 0,405      | 0,360      | 0,419      | 0,412      |
| 0,175                  | 0,269                           | 0,427      | 0,424      | 0,546      | 0,588      |
| 0,225                  | 0,316                           | 0,538      | 0,610      | 0,668      | 0,595      |
| 0,275                  | 0,445                           | 0,631      | 0,716      | 0,775      | 0,643      |
| 0,325                  | 0,585                           | 0,574      | 0,741      | 0,841      | 0,724      |
| 0,375                  | 0,638                           | 0,534      | 0,799      | 0,980      | 0,789      |
| 0,425                  | 0,564                           | 0,607      | 0,880      | 1,203      | 0,887      |
| 0,475                  | 0,531                           | 0,635      | 0,988      | 1,299      | 1,007      |
| 0,525                  | 0,567                           | 0,773      | 0,954      | 1,457      | 1,163      |
| 0,575                  | 0,628                           | 0,792      | 1,037      | 1,548      | 1,479      |
| 0,625                  | 0,640                           | 0,955      | 1,163      | 1,596      | 1,595      |
| 0,675                  | 0,875                           | 1,208      | 1,310      | 1,457      | 1,527      |
| 0,725                  | 1,022                           | 1,282      | 1,408      | 1,267      | 1,499      |
| 0,775                  | 1,116                           | 1,413      | 1,384      | 1,274      | 1,466      |
| 0,825                  | 1,501                           | 1,475      | 1,274      | 1,192      | 1,323      |
| 0,875                  | 1,792                           | 1,515      | 1,153      | 0,999      | 0,966      |
| 0,925                  | 1,782                           | 1,536      | 1,050      | 0,284      | 0,459      |
| 0,975                  | 1,344                           | 0,381      | 0,291      | 0,050      | 0,081      |

## **ANEXOS B**

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| <b>FIGURA 1B</b>  |               |
| <b>Catálogo apresentando o aspersor PLONA-RL300.....</b>                              | <b>85</b>     |
| <b>FIGURA 2B</b>  |               |
| <b>Catálogo com as características técnicas do aspersor<br/>    PLONA-RL300. ....</b> | <b>86</b>     |

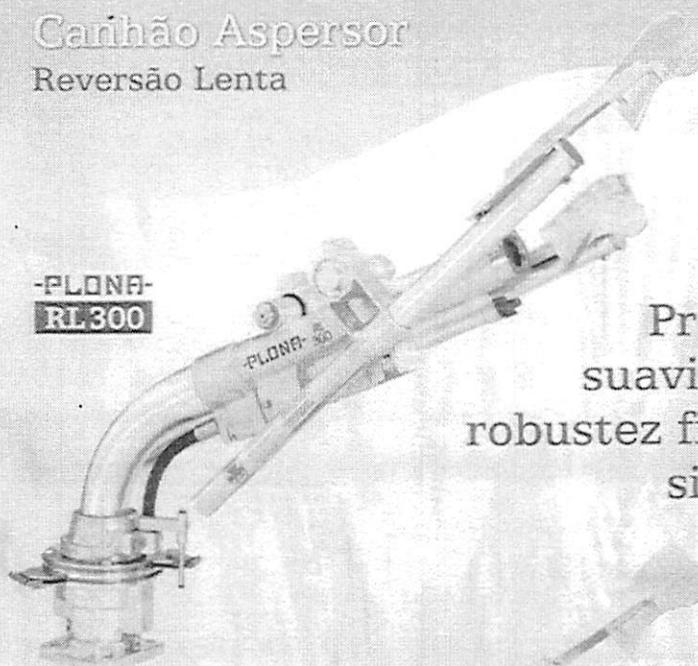
# Canhão Aspersor

## Reversão Lenta



A MARCA DO ASPERSOR

**-PLONA-  
RL300**



Precisão,  
suavidade e  
robustez ficaram  
simples.

**-PLONA-  
RL250**



• Mecanismo de reversão simples e confiável.

• Regulação de velocidade independente nos dois sentidos de avanço.

• Aleta de perfil aberto, não entope com resíduos sólidos.

• Funcionamento setorial ou círculo cheio através de um simples ajuste manual.

• Avanço suave e preciso tanto em altas como em baixas pressões.

• Muito fácil de regular o sator irrigado. Mecanismo não quebra, mesmo ao ser forçado.

• Paredes internas aletadas e exclusivo bico auxiliar garantem excelente uniformidade de distribuição e gotas finas mesmo em baixas pressões.

• Pode ser fabricado em qualquer ângulo de lançamento para as mais diversas aplicações, incluindo: irrigação semi-fixa, auto-propelido, carretel enrolador, pivô, distribuição de vinhaça e esterco, sistemas anti-polluição.

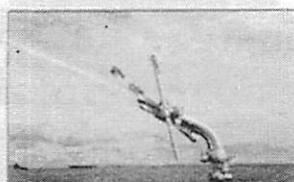
FIGURA 1B - Catálogo apresentando o aspersor PLONA-RL300.

## Canhão Aspersor Reversão Lenta

### -PLONA- RL300



Excelente uniformidade de distribuição.



Robusto.

| ANEL  | Bico auxiliar recomendado  | pressão mca |      |      |       |       |       |
|---|----------------------------|-------------|------|------|-------|-------|-------|
|   |                            | 30          | 40   | 50   | 60    | 70    | 80    |
| 22  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 21,4        | 24,2 | 27,3 | 29,6  | 32,3  | 34,8  |
|   | D m                        | 72          | 77   | 82   | 87    | 92    | 96    |
| 24  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 25,1        | 28,9 | 32,3 | 35,3  | 38,2  | 40,9  |
|   | D m                        | 74          | 81   | 87   | 94    | 100   | 107   |
| 26  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 30,2        | 35,4 | 40,0 | 43,8  | 47,4  | 50,5  |
|   | D m                        | 77          | 84   | 92   | 99    | 107   | 114   |
| 28  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 36,0        | 41,2 | 45,9 | 50,3  | 54,5  | 58,5  |
|   | D m                        | 79          | 86   | 94   | 104   | 113   | 121   |
| 30  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 42,9        | 49,6 | 55,4 | 60,3  | 65,2  | 69,8  |
|   | D m                        | 82          | 91   | 100  | 109   | 119   | 128   |
| 32  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 48,2        | 55,8 | 63,6 | 68,7  | 74,4  | 79,4  |
|   | D m                        | 83          | 93   | 102  | 112   | 121   | 131   |
| 34  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 54,7        | 62,7 | 70,3 | 78,4  | 83,9  | 89,3  |
|   | D m                        | 85          | 95   | 105  | 114   | 124   | 134   |
| 36  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 65,3        | 74,7 | 82,4 | 90,7  | 98,1  | 105,9 |
|   | D m                        | 85          | 95   | 105  | 115   | 125   | 137   |
| 38  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 76,0        | 86,0 | 96,5 | 105,8 | 113,7 | 121,8 |
|   | D m                        | 89          | 97   | 108  | 118   | 129   | 140   |
| Vazão do Bico auxiliar(B) m <sup>3</sup> /h | 6                          | 2,2         | 2,6  | 2,9  | 3,1   | 3,4   | 3,6   |
|   | 7                          | 3,0         | 3,5  | 3,9  | 4,3   | 4,6   | 4,9   |
|   | 8                          | 3,5         | 4,0  | 4,4  | 4,8   | 5,0   | 5,4   |

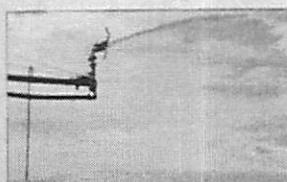
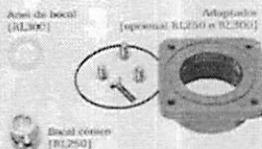
\*Pressão de operação medida na base do aspersor (ARL300 8988).

Vazão Total = vazão do bico auxiliar(A) + vazão do bico auxiliar(B).  
O canhão é fornecido com um bico de bocal montado, mais três outros anéis (padrões: 28 montado e 26, 30 e 32 anéis - bico auxiliar(B)).  
Ângulo de lançamento: 24°.  
Opcionais: adaptador para rosca 2" x 3".  
ângulo de lançamento especial até 45°.

### -PLONA- RL250

| BÓCAL - Bico auxiliar CONICO recomendado    | pressão mca                |      |      |      |      |      |      |
|---|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
|   | 30                         | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   |      |
| 14  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 12,4 | 14,3 | 16,0 | 17,5 | 18,9 | 20,2 |
|   | D m                        | 60   | 64   | 68   | 71   | 74   | 76   |
| 16  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 16,5 | 19,1 | 21,3 | 23,3 | 25,2 | 27,0 |
|   | D m                        | 64   | 69   | 74   | 78   | 81   | 84   |
| 18  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 21,3 | 24,6 | 27,5 | 30,2 | 32,6 | 34,8 |
|   | D m                        | 68   | 74   | 79   | 83   | 87   | 90   |
| 20  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 26,9 | 31,0 | 34,7 | 38,0 | 41,1 | 43,9 |
|   | D m                        | 70   | 78   | 84   | 89   | 93   | 96   |
| 22  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 32,5 | 37,6 | 42,0 | 46,0 | 49,7 | 53,1 |
|   | D m                        | 71   | 81   | 88   | 94   | 98   | 102  |
| 24  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 37,9 | 43,8 | 49,0 | 53,6 | 57,9 | 61,9 |
|   | D m                        | 72   | 84   | 92   | 98   | 103  | 106  |
| 26  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 43,6 | 50,3 | 56,3 | 61,6 | 66,6 | 71,2 |
|   | D m                        | 73   | 85   | 94   | 101  | 106  | 110  |
| 28  | vazão(A) m <sup>3</sup> /h | 49,5 | 57,1 | 63,9 | 70,0 | 75,6 | 80,8 |
|   | D m                        | 74   | 87   | 96   | 103  | 109  | 114  |
| Vazão do Bico auxiliar(B) m <sup>3</sup> /h | 5                          | 1,5  | 1,8  | 2,0  | 2,2  | 2,4  | 2,5  |
|   | 6                          | 2,2  | 2,6  | 2,9  | 3,1  | 3,4  | 3,6  |
|   | 7                          | 3,0  | 3,5  | 3,9  | 4,3  | 4,6  | 4,9  |

Vazão Total = vazão do bico auxiliar(A) + vazão do bico auxiliar(B).  
O canhão é fornecido com um bocal cônico montado, mais dois bocais cônicos anéis (padrões: 18 montado e 16 e 20 anéis - bico auxiliar(B)).  
Ângulo de lançamento: 18°, 21° ou 24° (especificar no pedido).  
Opcionais: adaptador para rosca 2" x 3".  
ângulo de lançamento especial até 45°.



Contável.



Funcionamento suave.



### PLONA EQUIPAMENTOS

INDÚSTRIA DE COMPONENTES MECÂNICOS LTDA

R. Roberto Berneri, 40 - Cx. Norte - CEP 81280-370 - Curitiba - PR - Brasil  
Fone: (41) 373-1910 - Fax: (41) 373-5266 - E-mail: vendas@plona.com.br  
www.plona.com.br

FIGURA 2B - Catálogo com as características técnicas do aspersor PLONA-RL300.

