# MODELAGEM DA APLICAÇÃO DE ÁGUA COM CANHÕES HIDRÁULICOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE VENTO

**GIULIANI DO PRADO**

**2008**

# Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

**GIULIANI DO PRADO**

# MODELAGEM DA APLICAÇÃO DE ÁGUA COM CANHÕES HIDRÁULICOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE VENTO

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

Orientador

Prof. PhD. Alberto Colombo

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2008

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

Prado, Giuliani do.
Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento / Giuliani do Prado. -- Lavras: UFLA, 2008.
121 p. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2008.
Orientador: Alberto Colombo.
Bibliografia.

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

CDD - 631.587

**GIULIANI DO PRADO**

# MODELAGEM DA APLICAÇÃO DE ÁGUA COM CANHÕES HIDRÁULICOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE VENTO

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

APROVADA em 19 de fevereiro de 2008

| | |
|---|---|
| Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello | UFLA |
| Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho | UFLA |
| Prof. Dr. Jarbas Honório de Miranda | ESALQ/USP |
| Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel | ESALQ/USP |

Prof. PhD. Alberto Colombo
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

Às pessoas que não tiveram as oportunidades que eu tive e às pessoas que tiveram essas oportunidades e não as aproveitaram,

**OFEREÇO**

Ao professor e mestre Alberto Colombo, pelos ensinamentos, os quais tiveram grande importância em minha formação pessoal e profissional.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

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

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Alberto Colombo, pela orientação e auxílio na realização deste trabalho.

Aos Professores Carlos Rogério de Mello, Jacinto de Assunção Carvalho, Jarbas Honorio de Miranda e Tarlei Arriel Botrel, membros da banca examinadora, pelas sugestões e observações.

Aos Professores do Departamento de Engenharia, pelos ensinamentos.

À Empresa Plona Equipamento de Curitiba, PR, na pessoa de Arno Bernert, por disponibilizar o aspersor RL250 para os ensaios técnicos.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) de Uberaba, MG, na pessoa de Antônio Carlos Barreto, por proporcionar a realização dos ensaios do aspersor RL250 em condições de campo.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica.

Aos colegas da pós-graduação, pela amizade.

Aos meus colegas de república, Alex Luiz, Márcio, Thiago, Diego, André e André Luiz, com os quais convivi durante a realização do doutorado.

Aos meus familiares e, em especial, aos meus pais Eraldo e Adelina, pelo apoio e incentivo.

# BIOGRAFIA

Giuliani do Prado, filho de Adelina Krainski do Prado e Eraldo do Prado, nasceu em 8 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.

Iniciou o mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, área de concentração em Irrigação e Drenagem, em março de 2003, concluindo-o em julho de 2004.

No mês de agosto de 2004, ingressou no doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, concluindo-o em fevereiro de 2008.

**SUMÁRIO**

**Página**

RESUMO GERAL ..... i
GENERAL ABSTRACT ..... iii
CAPÍTULO 1 ..... 1
1 INTRODUÇÃO GERAL ..... 1
2 REFERENCIAL TEÓRICO ..... 4
2.1 Sistemas autopropelidos de irrigação ..... 4
2.2 Aspersores utilizados em sistemas autopropelidos de irrigação ..... 6
2.3 Simulações digitais da uniformidade de aplicação de água no auxílio à tomada de decisão ..... 8
2.4 Distribuição de água de aspersores em condições de vento ..... 11
2.4.1 Descrição do modelo de Richards & Weatherhead (1993) ..... 12
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 16
CAPÍTULO 2 - Composição de perfis radiais de distribuição de água de aspersores ..... 20
RESUMO ..... 20
ABSTRACT ..... 21
1 INTRODUÇÃO ..... 22
2 MATERIAL E MÉTODOS ..... 24
2.1 Ensaios de distribuição de água ..... 24
2.2 Tratamento dos dados de ensaio ..... 26
2.3 Procedimento de composição dos perfis radiais ..... 29
2.4 Validação do modelo ..... 31
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 33
4 CONCLUSÕES ..... 38
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 39

CAPÍTULO 3 - Determinação do perfil radial de aspersores a partir de ensaios de distribuição de água em sistemas autopropelidos de irrigação ..... 41
RESUMO ..... 41
ABSTRACT ..... 42
1 INTRODUÇÃO ..... 43
2 MATERIAL E MÉTODOS ..... 46
2.1 Descrição do modelo ..... 46
2.2 Validação do modelo ..... 50
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 52
4 CONCLUSÕES ..... 58
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 59
CAPÍTULO 4 - Ajuste de parâmetros para distorção da distribuição de água aplicada por canhões hidráulicos em condições de vento - Método da malha.. 61
RESUMO ..... 61
ABSTRACT ..... 62
1 INTRODUÇÃO ..... 63
2 MATERIAL E MÉTODOS ..... 66
2.1 Descrição do modelo ..... 66
2.1.1 Posição dos pontos de amostragem de água ..... 66
2.1.2 Ajuste dos parâmetros de distorção ..... 72
2.1.2.1 Método das estimativas descendentes ..... 74
2.1.2.2 Método de Newton ..... 77
2.2 Aplicação do modelo matemático ..... 80
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 83
3.1 Rotina computacional ..... 83
3.2 Ajuste dos parâmetros ..... 85
4 CONCLUSÕES ..... 92
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 93

CAPÍTULO 5 - Ajuste de parâmetros para distorção da distribuição de água aplicada por canhões hidráulicos em condições de vento - Método do Autopropelido ..... 96
RESUMO ..... 96
ABSTRACT ..... 97
1 INTRODUÇÃO ..... 98
2 MATERIAL E MÉTODOS ..... 101
2.1 Descrição do modelo ..... 101
2.1.1 Distribuição de água em condições de campo ..... 101
2.1.2 Estimativa das lâminas aplicadas ..... 103
2.1.2 Ajuste dos parâmetros de distorção ..... 106
2.2 Aplicação do modelo matemático ..... 107
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 110
3.1 Rotina computacional ..... 110
3.2 Ajuste dos parâmetros ..... 112
4 CONCLUSÕES ..... 118
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 119

## RESUMO GERAL

PRADO, Giuliani do. **Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento.** 2008. 121 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.[1]

Canhões hidráulicos são utilizados de forma intensa, para a aplicação de água e de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar, que tem importante papel no cenário sócio-econômico brasileiro. Os canhões hidráulicos também têm grande aplicação na mecanização da irrigação de pequenas áreas com formato geométrico irregular. Apesar da versatilidade dos canhões, a sua utilização é bastante criticada, em função da baixa uniformidade de aplicação de água. Esta baixa uniformidade de aplicação de água, que reduz a produtividade das culturas irrigadas e aumenta as perdas de água, energia e fertilizantes, é decorrente do desconhecimento das características de distribuição de água dos canhões, levando à adoção de critérios equivocados de dimensionamento e operação dos sistemas de irrigação, nos quais os canhões são utilizados. De modo a utilizar os canhões hidráulicos de maneira mais correta, este trabalho objetivou desenvolver e avaliar os seguintes procedimentos: i) uma metodologia para a composição do perfil radial de distribuição de água de aspersores que operam com dois bocais, a partir do ensaio individual de cada bocal; ii) uma rotina computacional para a determinação do perfil radial de distribuição de água, mediante ensaios de aspersores em equipamentos autopropelidos de irrigação; iii) uma rotina computacional para ajustar seis parâmetros empíricos de distorção de vento do modelo de Richards & Weatherhead (1993), mediante ensaios de distribuição de água de aspersores operando de forma estacionária; e iv) uma rotina computacional para ajustar seis parâmetros empíricos de distorção de vento do modelo de Richards & Weatherhead (1993), a partir de ensaios de distribuição de água de aspersores operando em equipamentos autopropelidos de irrigação. As intensidades de precipitação dos perfis radiais obtidos nos procedimentos de cálculos, referentes aos objetivos i e ii, foram muito próximas às intensidades de precipitação obtidas nos perfis radiais determinadas nos ensaios em laboratório. Esta boa adequação também foi comprovada com a proximidade dos valores de uniformidade de Christiansen para equipamentos autopropelidos de irrigação, simuladas para espaçamentos de carreadores compreendidos entre 40% a 80% do diâmetro molhado do aspersor com os perfis radiais obtidos pelos procedimentos de cálculo e determinados em laboratório. Na aplicação da rotina

[1] Comitê Orientador: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Orientador) e Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

computacional, referente ao objetivo iii, observou-se que, os ensaios realizados em condições de maiores velocidades do vento estão associados aos maiores valores de intensidades de aplicação de água e, conseqüentemente, aos maiores valores de desvios médios (de 2,168 a 3,611 mm $h^{-1}$). Na aplicação da rotina computacional, referente ao objetivo iv, um comportamento semelhante foi observado ao comparar os valores de lâminas aplicadas obtidas nas simulações e observadas nos ensaios de campo, onde os valores de desvios médios aumentaram (de 1,521 a 2,307 mm) com o incremento na velocidade do vento observada nos ensaios. Estes resultados demonstram que, com o auxílio das rotinas computacionais desenvolvidas é possível: i) reduzir o número de ensaios de laboratório para a determinação do perfil radial de distribuição de água; ii) determinar o perfil radial de distribuição de água diretamente em sistemas autopropelidos de irrigação; e iii) ajustar os parâmetros empíricos de distorção de vento do modelo de Richards & Weatherhead (1993) mediante ensaios de distribuição de água do aspersores operando de forma estacionária ou em equipamentos autopropelidos de irrigação.

## GENERAL ABSTRACT

PRADO, Giuliani do. **Modeling gun sprinkler water application under different wind conditions.** 2008. 121 p. Thesis (Doctor Science in Agricultural Engineering) - Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.[2]

Gun sprinklers are widely used, to apply water and vinasse, on sugarcane fields, that represent an important component of Brazilian economy. Guns sprinklers also provide a way to mechanize irrigation on small irregular shaped areas. Although raingun versatility has been proved, they have been criticized due to their low water application uniformity. Raingun low water application uniformity, that compromises crop yield and increases waste of water, energy, and fertilizers, is a consequence of the lack of knowledge about raingun water distribution characteristics. This unfamiliarity leads to inadequate design and operation criteria of irrigation systems in which gun sprinklers are used. Aiming to improve raingun application, thought a easier, and faster, characterization of raingun water application, the following procedures were developed and evaluated: i) a computer algorithm that, based on catch can water application measurements of each individual nozzle, simulates the radial water application profile of rainguns operating with two nozzles; ii) a computer algorithm that builds radial water application profiles based on catch can data collected during standard field evaluations of traveller irrigation machines; iii) a computer algorithm that adjust six empirical parameters of a wind distortion application pattern model, developed by de Richards & Weatherhead (1993), based on catch can data collected during standard field evaluations of sprinkler water application distribution; and iv) a computer algorithm that adjust six empirical parameters of a wind distortion application pattern model, developed by de Richards & Weatherhead (1993), based on catch can data collected during standard field evaluations of traveller irrigation machines. Values of water application rates, taken from radial profiles simulated by algorithms number i and ii, as described above, were very near to the ones taken from radial profiles determined during laboratory tests. The proximity among simulated and measured radial water application profiles was further reinforced by the proximity among Christiansen water uniformity values, computed for traveller irrigation machines based on those radial profiles. Comparisons of spatial water application patterns, simulated by the third algorithm and measured ones, showed that tests held under conditions of greater wind velocity were associated

[2] Guidance Committee: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Major Professor) and Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

with greater values of average application rates and, consequently, greater values of average absolute deviations (from 2.168 to 3.611 mm $h^{-1}$). A similar behavior was observed when comparing measured water application depth values with depth values simulated by the algorithm number iv. Averages of absolute deviation values also increased with wind velocity values observed during the tests (from 1.521 to 2.307 mm). These results demonstrate that with the help of the proposed algoritms it is possible: i) to decrease the number of standard field tests required to determine raingun radial water application profile; ii) to determine raingun radial water application profile directly from data collect at standard field evaluations of travel irrigation machines; and iii) to adjust the empirical parameters of the wind distortion application pattern model developed by de Richards & Weatherhead (1993) using catch can data collected at standard water distribution tests or collected at standard field evaluations of traveller irrigation machines.

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Os setores de produção agrícola, em face da alta competitividade e das exigências do mercado, buscam, cada vez mais, produzir bens de consumo com alta eficiência técnica e econômica. Entretanto, este incremento produtivo, tanto em quantidade como em qualidade, visando reduzir os custos de produção, está atrelado a estratégias de proteção ambiental e, principalmente, ao uso e à conservação dos recursos hídricos.

A produção agrícola sob irrigação, devido às exigências hídricas da cultura e ao cultivo em grandes extensões de terra, é um dos setores da cadeia produtiva que mais consomem água. Dessa forma, sistemas de irrigação bem dimensionados, apresentando adequados índices de uniformidade de aplicação de água, aliados a um correto manejo da irrigação, são essenciais para maximizar a produtividade e reduzir as perdas de água.

O método de irrigação por aspersão apresenta-se como um dos mais empregados no Brasil. Essa grande aceitação decorre da facilidade operacional que o método oferece. Neste contexto, a irrigação por aspersão, utilizando canhões hidráulicos, é uma prática amplamente empregada na irrigação da cultura da cana-de-açúcar, a qual vem recebendo grande incentivo devido à produção de biocombustíveis.

A distribuição de água dos sistemas de irrigação que operam com canhões hidráulicos, normalmente, não é adequada, principalmente, em condições de vento. Esta inadequada aplicação de água é decorrente do desconhecimento, por parte dos projetistas e usuários de sistemas de irrigação, das melhores combinações operacionais e ambientais em que o sistema de irrigação deve trabalhar, levando a perdas de água, energia e fertilizantes, bem como a uma redução na produtividade da cultura irrigada.

As melhores condições operacionais que os sistemas de irrigação devem trabalhar, podem ser determinadas com o auxílio de aplicativos computacionais específicos e previamente calibrados. Com a utilização desses programas computacionais, é possível estabelecer as condições de trabalho do sistema de irrigação, de modo a maximizar a uniformidade de aplicação de água. Essas simulações são efetuadas a partir das características de distribuição de água do aspersor (perfil radial) operando de forma estacionária.

Os dados técnicos de distribuição de água dos aspersores, em função das diferentes combinações de diâmetros dos bocais e pressão de serviço, raramente são disponibilizados pelas empresas fabricantes de aspersores. Esta falta de informações a respeito dos dados de distribuição de água dos aspersores deve-se ao desconhecimento destes valores e pela dificuldade, principalmente para canhões hidráulicos, em levantar essas informações, haja vista o elevado número de combinações operacionais possíveis e a exigência de laboratórios de ensaios apropriados. Dessa forma, é preciso desenvolver técnicas, de modo a reduzir o número de ensaios de distribuição de água necessários para a caracterização dos aspersores e determinar estes valores diretamente nos locais onde os sistemas de irrigação foram implantados.

Aliado à falta de dados técnicos de distribuição de água dos canhões hidráulicos disponíveis no mercado nacional, há uma carência de aplicativos computacionais que auxiliam nas simulações da aplicação de água de canhões hidráulicos operando em condições de vento. Dessa forma, visando reverter este quadro e dar subsídios a projetistas e usuário de sistemas de irrigação que operam com canhões hidráulicos, este trabalho teve por objetivos:

*i)* desenvolver uma metodologia para a determinação de perfis radiais de distribuição de água de aspersores que operam com dois bocais (principal e auxiliar), a partir do ensaio individual do bocal principal e do bocal auxiliar, tema abordado no Capítulo 2;

*ii)* descrever um algoritmo e uma rotina computacional, com base no modelo de Newell et al. (2003), para a determinação do perfil radial de distribuição de água de aspersores mediante ensaios de distribuição de água em equipamentos autopropelidos de irrigação, tema trabalhado no Capítulo 3;

*iii)* descrever um procedimento numérico e uma rotina computacional para o ajuste de seis parâmetros empíricos de distorção ocasionados pelo vento, do modelo de Richards & Weatherhead (1993), a partir da realização de ensaios de distribuição de água de aspersores operando isoladamente de forma estacionária, o qual foi estudado no Capítulo 4;

*iv)* descrever um procedimento numérico e uma rotina computacional para o ajuste de seis parâmetros empíricos de distorção ocasionados pelo vento, do modelo de Richards & Weatherhead (1993), a partir da realização de ensaios de distribuição de água de aspersores operando em equipamentos autopropelidos de irrigação, tema desenvolvido no Capítulo 5.

# 2 REFERENCIAL TEÓRICO

## 2.1 Sistemas autopropelidos de irrigação

A evolução dos sistemas de irrigação por aspersão convencional proporcionou o desenvolvimento da aspersão mecanizada, a qual procurou substituir a mão-de-obra necessária no transporte e na montagem de tubulações e aspersores por sistemas mecânicos (Costa et al., 1994).

De acordo com Rocha et al. (2005), o sistema autopropelido de irrigação foi a primeira evolução da aspersão em termos de automação. Conforme os autores, este sistema apresenta facilidade de manejo da irrigação e adapta-se a diferentes tipos de cultura e condições topográficas.

Atualmente, a maior parte dos sistemas autopropelidos de irrigação disponíveis no mercado nacional são do tipo carretel enrolador, os quais, de acordo com Matsura & Testezlaf (2003), são compostos por: aspersor de grande ou médio porte, mangueira de média ou alta densidade, carretel enrolador e mecanismo de propulsão tipo turbina. Neste tipo de equipamento, o sistema de propulsão proporciona o giro do carretel que traciona a mangueira de alimentação do aspersor e promove o seu deslocamento linear ao longo do carreador, irrigando uma faixa de largura regular (Figura 1).

Segundo Rochester et al. (1990) e Prado et al. (2003), os sistemas autopropelidos de irrigação, em função da elevada perda de carga que ocorre tanto no mecanismo de propulsão tipo turbina, como na mangueira, e da elevada pressão de serviço exigida pelo aspersor, apresentam limitações de uso devido ao grande consumo de energia. Entretanto, este sistema é amplamente empregado por produtores rurais na irrigação de culturas de grande porte e capineiras, bem como na agroindústria canavieira (Prado, 2004; Rocha et al., 2005).

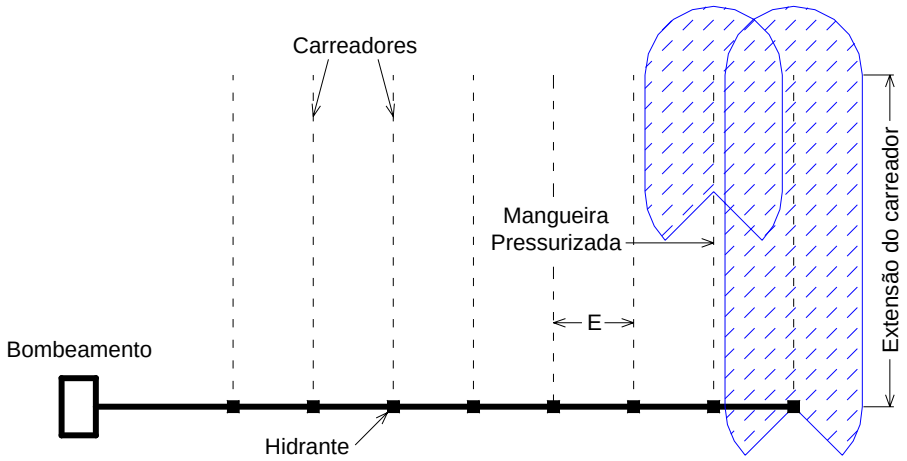


FIGURA 1 - Layout de uma área irrigada por um equipamento autopropelido de irrigação.

Outra crítica aos equipamentos autopropelidos de irrigação é quanto à baixa uniformidade de aplicação de água que o sistema apresenta, principalmente em condições de vento. Apesar desse inconveniente, que muitas vezes é ocasionado pelo desconhecimento das melhores condições operacionais do equipamento, Nunes et al. (2004) salientam que o uso de equipamentos autopropelidos de irrigação é uma prática intensivamente empregada na cultura da cana-de-açúcar. A grande aceitação desse tipo de equipamento não se limita apenas ao caso da cana-de-açúcar. Na Europa, em função da facilidade com que os autopropelidos cobrem áreas irregulares, estes equipamentos são bastante utilizados. Na Inglaterra, sua adoção representa cerca de 75% da área irrigada por aspersão (Lancey, 2006).

## 2.2 Aspersores utilizados em sistemas autopropelidos de irrigação

Nos sistemas autopropelidos de irrigação disponíveis atualmente no mercado nacional, existem duas formas distintas de aspersão de água para as culturas: por meio de barra irrigadora ou por meio de canhão hidráulico.

O sistema autopropelido com barra irrigadora é constituído por uma série de pequenos aspersores acoplados em uma barra metálica, situada na extremidade final da mangueira. De acordo com Silva et al. (2003), este sistema, por apresentar aspersores de pequeno porte operando com pressões de serviço menores, apresenta menores riscos de desagregação do solo e escoamento superficial. Estes autores comentam, ainda, que, pelo fato dos aspersores estarem logo acima da cultura, a distribuição de água sofre menor influência do vento.

Nos projetos de sistemas autopropelidos de irrigação com barra irrigadora, na alocação das faixas de irrigação, o espaçamento entre os carreadores deve ser menor, acarretando em baixo rendimento operacional. Além desta desvantagem, a barra irrigadora é muito propensa ao tombamento, especialmente quando se irrigam culturas de porte elevado.

Em função da praticidade de uso e do maior rendimento operacional em relação à barra irrigadora, adota-se o canhão hidráulico como forma de aspersão de água na maior parte dos sistemas autopropelidos de irrigação. Segundo Bernardo et al. (2005), os canhões hidráulicos operam com pressões de serviço variando entre 50 e 100 m.c.a. e apresentam um raio de alcance que pode atingir valores entre 40 e 80 m.

A utilização de aspersores de grande porte, em sistemas de irrigação por aspersão, sofre, muitas vezes, restrições de uso, devido à alta pressão de operação exigida pelo aspersor (Scaloppi & Colombo, 1995) ou pelo risco de ocorrência de escoamento superficial (Silva et al., 2003). Entretanto, Rocha (2000) salienta que há falta de critérios específicos de dimensionamento,

capazes de proporcionar um desempenho satisfatório e competitivo desses sistemas em diferentes condições operacionais.

Apesar da considerável evolução na manufatura dos canhões hidráulicos, representada pela substituição dos perigosos canhões de reversão rápida pelos modelos de reversão lenta, as empresas fabricantes de canhões hidráulicos ainda não apresentam, de forma adequada, as características técnicas de distribuição de água de seus aspersores. Existem procedimentos normalizados para essas determinações (ISO, 1990 e ASAE, 1987), entretanto, o alto custo na construção de bancadas de ensaio, que atendam às normas técnicas e as dificuldades na realização desses ensaios fazem com que os catálogos técnicos apresentem somente dados de vazão e de raio de alcance (Prado & Colombo, 2005).

Segundo Seginer et al. (1992), o conhecimento das características de distribuição de água dos aspersores (perfil radial) é de fundamental importância para a pesquisa, para o desenvolvimento de protótipos de aspersores, para o controle da qualidade da fabricação e para a seleção dos diversos modelos de aspersores por parte do consumidor. Martín-Benito et al. (1992) afirmam que, diante da importância do conhecimento da distribuição de água dos aspersores, é surpreendente a falta de informações técnicas a respeito dos diversos modelos de aspersores disponíveis no mercado.

A falta de conhecimento das características de distribuição de água dos aspersores proporciona recomendações técnicas, de dimensionamento e operacionais do sistema de irrigação por aspersão, que resultam em uma inadequada uniformidade de aplicação de água. Prado et al. (2007) apresentam uma proposta de catálogo técnico de aspersores e recomendações operacionais de equipamentos autopropelidos de irrigação operando com o aspersor Plona-RL400. Neste catálogo são expostos, de forma compacta, além dos dados de vazão e raio de alcance, os perfis radiais adimensionais de distribuição de água

do aspersor, que podem ser utilizados em aplicativos computacionais para simular a distribuição de água de sistemas convencionais ou mecanizados de irrigação por aspersão.

## 2.3 Simulações digitais da uniformidade de aplicação de água no auxílio à tomada de decisão

Para os diferentes métodos de irrigação, busca-se projetar sistemas de irrigação de modo que a aplicação de água seja a mais uniforme possível. Em cada método de irrigação é recomendado um valor mínimo de uniformidade de aplicação de água. No caso da aspersão, é aconselhável que os valores de uniformidade (coeficiente de Christiansen - CUC) sejam superiores a 80% (Bernardo et al. 2005), porém, em sistemas autopropelidos de irrigação, valores na ordem de 70% podem ser considerados como adequados (Matsura & Testezlaf, 2003).

Segundo Álvarez et al. (2004), altos valores de uniformidade de aplicação de água são fundamentais para a obtenção de um adequado retorno econômico da cultura, pois se consegue maior produtividade por unidade de área com um menor consumo de água, energia e fertilizantes.

Em sistemas de irrigação que apresentam baixos valores de uniformidade de aplicação de água, partes da área irrigada recebem menos água que o necessário e, em conseqüência, apresentam menor produtividade e um produto de menor qualidade. Por outro lado, a desuniformidade de aplicação de água causa também o aparecimento de áreas que recebem um excesso de aplicação de água, que percola pelo sistema radicular da cultura irrigada e causa lixiviação dos fertilizantes aplicados (Montero et al., 2001 e; Ruelle et al., 2003).

Nos sistemas autopropelidos de irrigação, a uniformidade de aplicação de água é influenciada por inúmeros fatores: velocidade e direção do vento, ângulo de lançamento do jato de água, tipo de bocal, ângulo de giro do aspersor,

características do perfil estacionário de aplicação de água do aspersor, sobreposição dos perfis radiais e variações na pressão de serviço e na velocidade de deslocamento do aspersor ao longo do carreador (Shull & Dylla, 1976; Collier & Rochester, 1980; Colombo, 1991).

Conforme Carrión et al. (2001) e Prado & Colombo (2007), devido aos inúmeros fatores que influenciam na uniformidade de aplicação de água de um sistema de irrigação por aspersão, a realização de ensaios de campo torna-se uma tarefa demorada e, na maioria das vezes, não se consegue realizar as avaliações em todas as condições operacionais e ambientais desejadas. Apesar deste inconveniente, as avaliações da uniformidade de aplicação de água no campo, para algumas condições operacionais, são procedimentos essenciais para a calibração de modelos de simulação da distribuição espacial de água de aspersores (Tarjuelo et al., 1999).

O uso de simulações digitais em computadores, para efetuar a análise da uniformidade de aplicação de água, torna-se uma ferramenta extremamente útil devido à agilidade, à precisão e à segurança dos resultados obtidos (Prado & Colombo, 2006). Desse modo, as simulações digitais assumem importante papel na tomada de decisão em projetos de irrigação, na avaliação de equipamentos de irrigação, no desenvolvimento de novos aspersores ou para avaliar se procedimentos usualmente adotados são adequados. Para efetuar estas simulações, basta estabelecer, na ausência de ventos e na pressão de serviço desejada, o perfil estacionário de aplicação de água do aspersor a ser utilizado no sistema de irrigação (Rolland, 1982).

Em sistemas autopropelidos de irrigação, Keller & Bliesner (1990) e Bernardo et al. (2005) salientam que espaçamentos entre carreadores próximos a 80% do diâmetro molhado do aspersor proporcionam adequados valores de uniformidade de aplicação de água. Para ângulo de giro do aspersor, respectivamente, Keller & Bliesner (1990) e Tarjuelo (1999) recomendam que

valores variando entre 210º a 240º e 200º a 220º proporcionam bons valores de uniformidade de aplicação de água.

As recomendações apresentadas na literatura (Keller & Bliesner, 1990; Tarjuelo, 1999; Bernardo et al., 2005) nem sempre podem ser adotados para situações operacionais específicas de pressão de serviço e diâmetro de bocal do aspersor. Na avaliação dos canhões hidráulicos Plona RL250 (Prado & Colombo, 2007), RL300 (Prado, 2004) e RL400 (Prado et al., 2007), a partir de simulações digitais de sistemas autopropelidos de irrigação, para estabelecer as melhores condições operacionais de espaçamento entre carreadores e ângulo de giro do aspersor, verificou-se que, em termos gerais, os valores de espaçamento entre carreadores e ângulo de giro do aspersor encontrados concordam com os valores apresentados na literatura. Entretanto, para algumas combinações de pressão de serviço e diâmetro do bocal do aspersor, é possível utilizar valores de espaçamento entre carreadores e ângulo de giro do aspersor, que diferem aos sugeridos na literatura. Segundo os autores, a adoção de uma dada condição operacional, que pode ser obtida em simulações digitais, vai depender da forma geométrica do perfil radial de distribuição de água do aspersor, que é função da combinação da pressão de serviço e do diâmetro do bocal do aspersor.

Simulações digitais assumem importante papel no suporte ao estudo de alternativas para maximizar a uniformidade de aplicação de água em regiões onde a distribuição de água é deficitária, a exemplo da região inicial e final da faixa irrigada por equipamentos autopropelidos de irrigação. Rochester (1983) e Prado (2004), a partir de simulações digitais, mostram a deficiente aplicação de água nas regiões inicial e final da faixa irrigada, em função da largura da faixa e do ângulo de giro do aspersor. Esses autores apresentam alternativas, como tempos de parada e variações no comprimento inicial e final da faixa irrigada, de modo a melhorar a distribuição de água nessas regiões.

A adequação das combinações operacionais dos aspersores disponíveis no mercado pode ser melhor estudada a partir de aplicativos computacionais. Montero et al. (2003), com auxílio de um aplicativo computacional, contribuíram para a melhoria do aspersor Agros 35. Este aspersor sofreu algumas alterações, para proporcionar a adequação do perfil radial de distribuição de água do aspersor e a conseqüente melhora de sua distribuição de água no sistema de irrigação. Para canhões hidráulicos, este procedimento também pode ser aplicado para encontrar, mediante simulações digitais, a forma geométrica do perfil radial de distribuição de água que proporcione adequados valores de uniformidade de aplicação de água.

## 2.4 Distribuição de água de aspersores em condições de vento

A uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação que operam com canhões hidráulicos não é boa, especialmente em condições de vento intenso (Smith et al., 2002). Esta baixa uniformidade de aplicação de água é, em grande parte, conseqüência da utilização, por parte dos fabricantes, projetistas e usuários, de recomendações operacionais e de projeto que são inadequadas.

Segundo Vories et al. (1987), o vetor vento é um dos principais fatores que afetam a distribuição de água dos aspersores, mas o uso da modelagem matemática para simular os efeitos deste agente pode contribuir para a melhor disposição do equipamento de irrigação no campo.

A distorção causada pelo vetor vento na distribuição espacial da água aplicada por aspersores pode ser analisada pela teoria balística, a exemplo dos trabalhos de Vories et al. (1987), Seginer et al. (1992), Carrión et al. (2001) e Montero et al. (2001). Esta metodologia é muito empregada em sistemas fixos de irrigação que operam com aspersores de pequeno e médio porte. Para estes

aspersores, é possível assumir que a formação da totalidade das gotas ocorre nas proximidades do bocal, justificando-se a utilização da teoria balística.

Para o caso particular dos canhões hidráulicos, os procedimentos numéricos da teoria balística têm aplicação limitada, pois a formação de grande parte das gotas não ocorre nas proximidades do bocal, o que dificulta a determinação dos valores iniciais de posição e velocidade das gotas. Dessa forma, a utilização de procedimentos empíricos torna-se necessária para simular a distorção causada pelo vento na distribuição espacial da água aplicada por esses aspersores. Dentre os métodos empíricos disponíveis, destaca-se o método de Richards & Weatherhead (1993), que foi aplicado com sucesso no estudo de aspersores operando em equipamentos autopropelidos de irrigação, conduzidos por Newell et al. (2003).

A exigência de um elevado número de ensaios de distribuição de água em condições de vento para a calibração do modelo, muitas vezes, inviabiliza a adoção dos métodos empíricos. No modelo de Richards & Weatherhead (1993), exige-se a realização de, pelo menos, três ensaios de campo (método da malha) de distribuição de água do aspersor (um sem vento e dois com vento). Já no modelo de Newell et al. (2003), que é uma adaptação do modelo de Richards & Weatherhead (1993) para aspersores em movimento linear com velocidade constante, também é necessária a realização de, pelo menos, três ensaios de campo de distribuição de água do aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação (um sem vento e dois com vento).

### 2.4.1 Descrição do modelo de Richards & Weatherhead (1993)

No modelo empírico de Richards & Weatherhead (1993), o vetor vento, como mostrado na Figura 2, atua no mesmo sentido do eixo $x_v$ e perpendicularmente ao eixo $y_v$. A distorção causada pelo vetor vento, segundo esses autores, pode ser computada pelas expressões que definem a deriva

causada pelo vento e a redução do raio de alcance do aspersor, causada pelo vento, dadas por:

$$Dv = \left[ A + B \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + C \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot v \tag{1}$$

$$Ra = \left[ D \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + E \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 + F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^3 \right] \cdot v \cdot S \tag{2}$$

$$\text{sendo,} \quad r = \sqrt{{x_{v0}}^2 + {y_{v0}}^2} \quad ; \quad S = \sqrt{\text{sen}^2(\alpha) \cdot \cos^2(\phi) + \text{sen}^2(\phi)}$$

em que, Dv é a deriva causada pelo vento (m); Ra a redução do raio de alcance causada pelo vento (m); v a velocidade do vento (m $s^{-1}$); R o raio de alcance do aspersor (m); r a distância radial do coletor ao aspersor (m); $x_{v0}$ e $y_{v0}$ coordenadas para vento igual a zero (m); S o seno do ângulo entre o vetor velocidade do vento e a direção do jato do aspersor; $\alpha$ o ângulo de lançamento do jato do aspersor (º); $\phi$ ângulo entre a direção do vento e a direção do jato do aspersor no plano horizontal (º); A, B e C constantes de ajuste da expressão que representa a deriva causada pelo vento (s) e D, E e F constantes de ajuste da expressão que representa a redução do raio de alcance causada pelo vento (s).

As coordenadas do ponto de impacto do jato d'água ($x_v$, $y_v$) sob ação do vento, como mostrado pela Figura 2, podem ser determinadas a partir das coordenadas em que cada ponto de impacto do jato d'água se encontra na condição de ausência de vento ($x_{v0}$, $y_{v0}$) e dos efeitos da deriva e da redução do raio de alcance ocasionados pelo vetor vento. Na alocação da coordenada $x_v$, tanto os efeitos da deriva como os da redução do raio de alcance ocasionados pelo vento devem ser considerados. Já para a coordenada $y_v$, apenas o efeito da redução do raio de alcance ocasionado pelo vento é considerado. Dessa forma, as coordenadas $x_v$ e $y_v$ podem ser determinadas por:

$$x_v = x_{v0} - Dv - Ra \cdot \cos(\phi) \tag{3}$$

$$y_v = y_{v0} - Ra \cdot sen(\phi) \quad (4)$$

em que $x_v$ e $y_v$ são coordenadas assumidas na condição de vento (m).

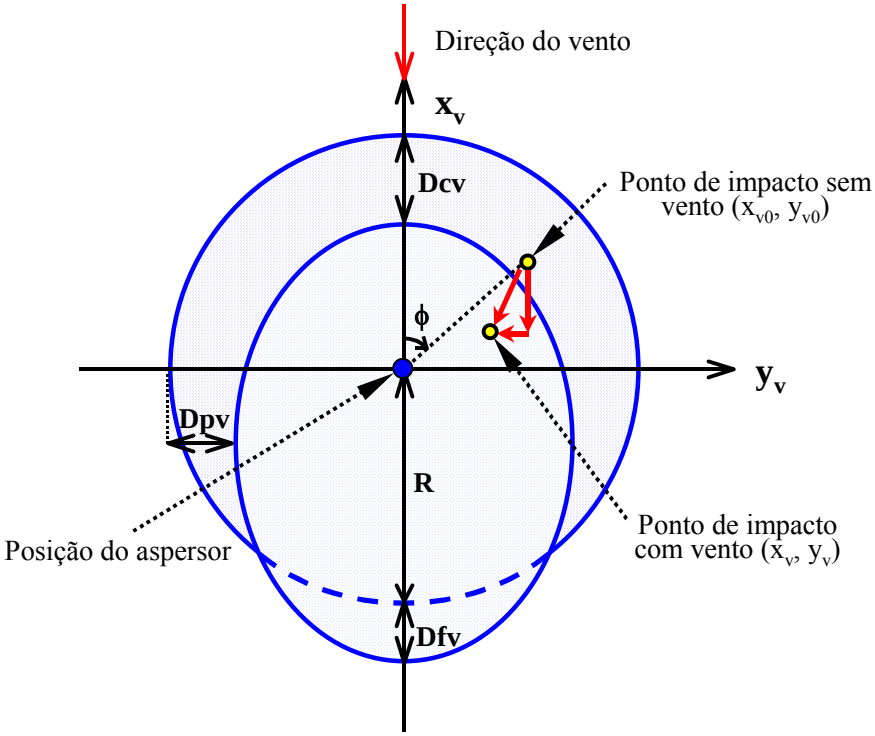


FIGURA 2 - Representação da distorção causada pelo vento no modelo empírico Richards & Weatherhead (1993).

Os seis parâmetros empíricos de Richards & Weatherhead (1993) não apresentam nenhum significado físico, entretanto, o conjunto de seus valores, aplicados nas expressões 3 e 4, pode definir os achatamentos (Figura 2) provocados pelo vetor vento na distribuição espacial de água do aspersor. Dessa forma, considerando a condição de ausência de vento e a distância radial de um ponto de impacto do jato d'água ao aspersor igual ao raio de alcance (r/R = 1), ao ocorrer uma condição de vento, como apresentado na Figura 2, a partir das

equações 3 e 4, os seguintes valores de achatamento provocados pelo vetor vento na distribuição espacial de água do aspersor podem ser estabelecidos:

- Distância contra o vento (Dcv em m):

  sendo $\phi = 0º$ ($x_{v0} = R$, $y_{v0} = 0$):

  $$x_v = R - [(A + B + C) \cdot v] - [(D + E + F) \cdot v] \cdot sen(\alpha)$$

  $$R - x_v = (A + B + C) \cdot v + (D + E + F) \cdot v \cdot sen(\alpha)$$

  $$Dcv = [(A + B + C) \cdot v] + [(D + E + F) \cdot v] \cdot sen(\alpha) \quad (5)$$

- Distância perpendicular ao vento (Dpv em m):

  sendo $\phi = 90º$ ($x_{v0} = 0$, $y_{v0} = R$) ou $\phi = 270º$:

  $$y_v = R - (D + E + F) \cdot v$$

  $$R - y_v = (D + E + F) \cdot v$$

  $$Dpv = (D + E + F) \cdot v \quad (6)$$

- Distância a favor do vento (Dfv em m):

  sendo $\phi = 180º$ ($x_{v0} = -R$, $y_{v0} = 0$):

  $$x_v = -R - [(A + B + C) \cdot v] + [(D + E + F) \cdot v] \cdot sen(\alpha)$$

  $$R + x_v = -[(A + B + C) \cdot v] + [(D + E + F) \cdot v] \cdot sen(\alpha)$$

  $$Dfv = -[(A + B + C) \cdot v] + [(D + E + F) \cdot v] \cdot sen(\alpha) \quad (7)$$

Segundo Richards & Weatherhead (1993), a intensidade de precipitação ocorrida em cada ponto de impacto do jato d'água do aspersor, em condições de vento, pode ser determinada por:

$$i_v = \frac{i_0}{\frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}} \cdot \frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}}} \quad (8)$$

em que, $i_v$ é a intensidade de precipitação em condição de vento (mm $h^{-1}$); $i_0$ a intensidade de precipitação na ausência de vento (mm $h^{-1}$); $\frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}}$, $\frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}}$ derivadas parciais das equações 3 e 4, respectivamente.

## 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ÁLVAREZ, J. F. O.; MARTIN-BENITO, J. M. T.; VALERO, J. A. J.; PÉREZ, P. C. Uniformity distribution and its economic effect on irrigation management in semiarid zones. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering,** New York, v. 130, n. 4, p. 257-268, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE Standard S330.1**. Procedure for sprinkler distribution testing research purposes. St. Joseph, 1987. p. 487-489.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 7.ed. Viçosa, MG: UFV, 2005. 611 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.

COLLIER, R. L.; ROCHESTER, E. W. Water application uniformity of hose towed traveler irrigators. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,** St. Joseph, v. 23, n. 5, p. 1135-1138, Mar./Apr. 1980.

COLOMBO, A. **Simulação do desempenho de um equipamento autopropelido de irrigação.** 1991. 120p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – 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.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7749-2** Irrigation equipment - Rotating sprinkler. Part2: Uniformity of distribution and test methods. Switzerland. 1990. 6 p.

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

LANCEY, T. **Improving irrigation efficiency:** optimising raingun performance in field-scale vegetable production. Cranfield University, 2006.

Disponível em: <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/iwe/students/timlacey.htm>. Acesso em: 20 maio 2006.

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.

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.

MONTERO, J.; AGUADO, A.; GARCÍA, J. M.; CARRION, P. TARJUELO, J. M. Characterization and improvement of the range of products (sprinklers and control valves) manufactured by COMETAL. In: EUROPEN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL COMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 20., 2003, Montpellier. **Anais...** Montpellier: AFEID, 2003.

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.

NEWELL, G. F.; FOLEY, J.; SMITH, R. **TRAVGUN-Travelling Gun Simulation model user's manual:** version 1.1. Toowooba, QLD. Austrália, 2003. 91.p.

NUNES, D.; PINTO, R. S.; TRENTO FILHO, E.; ELIAS, A. I. **Indicadores do setor sucroalcooleiro -** safras 2003/2004. Ribeirão Preto: Grupo IDEA, 2004. 111 p.

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

PRADO, G.; COLOMBO, A; BIAGIONI, P. F. Análise da uniformidade de aplicação de água pelo aspersor PLONA-RL400 em sistemas autopropelidos de irrigação. **Revista de Engenharia,** Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 346-353, maio/ago. 2007.

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

PRADO, G; COLOMBO, A. Aplicativo computacional para simulação da distribuição espacial de água aplicada por canhões hidráulicos em sistemas autopropelidos de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16., 2006, Goiânia. **Anais...** Brasília: ABID, 2006.

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

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.

RICHARDS, P. J.; WEATHERHEAD, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 54, n. 4, p. 281-291. 1993.

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

ROCHA, F. A.; PEREIRA, G. M.; ROCHA, F. S.; SILVA, J. O. Análise da uniformidade de distribuição de água de um equipamento autopropelido. **Irriga,** Botucatu, v. 10, n. 1, p. 96-106, jan./abr. 2005.

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. 1983.

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.

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.

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, MG. **Anais...** Jaboticabal, SP: 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.

SHULL, H.; DYLLA, A. S. Traveling gun application uniformity in high winds. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,** St. Joseph, v. 19, n. 2, p. 254-258, Nov./Dec. 1976.

SILVA, L. L.; SANTOS, N.; SERRALHEIRO, R. Hose-drawn traveler with a line of sprinklers, an alternative to the gun-sprinkler traveler system. In: EUROPEN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL COMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 20., 2003, Montpellier. **Anais...** Montpellier: AFEID, 2003.

SMITH, R.; BAILLE, C. GORDON, G. Performance of travelling gun irrigation machines. **Proc of the Australian Society Sugar Cane Technologists**, Sydney, v. 24, p. 235-240, 2002.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología**. 2.ed. Madrid. Mundi Prensa Libros, 1999. 529 p.

TARJUELO, J. M.; MONTERO, J.; HONRUBIA, F. T.; ORTIZ, J. J.; ORTEGA, J. F. Analysis of uniformity of sprinkler irrigation in a semi-arid area. **Agricultural Water Management,** Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 315-331, Nov. 1999.

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.

# CAPÍTULO 2

# COMPOSIÇÃO DE PERFIS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE ASPERSORES

## RESUMO

PRADO, Giuliani do. Composição de perfis radiais de distribuição de água de aspersores. In: _____. **Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento.** 2008. Cap. 2, p. 20-40. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.[3]

O perfil radial de distribuição de água é um dado fundamental nas simulações da uniformidade de aplicação de água. Para um mesmo aspersor, existem várias combinações possíveis de pressões e bocais, levando a um elevado número de ensaios de distribuição de água necessários para caracterização do aspersor. De modo a reduzir o número de ensaios de distribuição de água, é apresentado um procedimento de composição do perfil radial de aspersores que operam com dois bocais. Para tanto, foram determinados, na bancada de ensaios de aspersores da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, os valores de vazão e perfil radial do aspersor Plona-RL250 operando, individualmente, com os bocais principais 14 e 28 mm e com os bocais auxiliares 5, 6 e 7 mm e operando, nas diferentes seis combinações de bocal principal e auxiliar do aspersor, sob cinco pressões de serviço (294, 392, 490, 588 e 686 kPa). No processo de composição do perfil radial realizado, ajustando a vazão dos bocais auxiliar e principal, operando individualmente, a vazão do aspersor operando com o conjunto de bocais auxiliar e principal, verificou-se um coeficiente de determinação médio de 88,57% entre as intensidades de precipitação adimensionais dos perfis radiais compostos com os perfis radiais do conjunto. Na relação linear, ajustada, entre os valores de uniformidade de Christiansen para equipamentos autopropelidos de irrigação, obtidos com os perfis radiais compostos e do conjunto, a inclinação da reta foi igual a 44°12' com um erro relativo médio de 2,34%. Estes resultados mostram que o procedimento de composição do perfil radial de aspersores não influencia, de maneira significativa, nos valores de uniformidade de Christiansen de equipamentos autopropelidos de irrigação.

---

[3] Comitê Orientador: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Orientador) e Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

## CHAPTER 2

## ABSTRACT

PRADO, Giuliani do. Sprinkler water distribution pattern composition. In: _____. **Modeling gun sprinkler water application under different wind conditions.** 2008. Chap. 2, p. 20-40. Thesis (Doctor Science in Agricultural Engineering) - Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.[4]

The water distribution pattern is a fundamental for applied water uniformity simulations. For a given sprinkler, there are several possible combinations of nozzles and pressures, which leads to a large number of water distribution tests for the characterization of the sprinkler. In order to reduce the number of tests necessary to characterize the sprinkler, a procedure to compose the sprinkler pattern for a sprinkler that operates with several nozzles is described. To compose the pattern, discharge values and patterns of the Plona-RL250 sprinkler were determined at the sprinkler test bench of the Universidade Federal de Lavras, in Lavras, MG. The tests were conducted with all possible combinations of the 14 and 28 mm main nozzles and the 5, 6 and 7 mm auxiliary nozzles as well as with each nozzle functioning individually. Five working pressures (294, 392, 490, 588 and 686 kPa) were used with each nozzle configuration. In the pattern composition process, the main and auxiliary nozzle discharges, measured with the nozzles operating individually, were adjusted to the sprinkler discharge measured with the discharge measured with the sprinkler operating with the corresponding pair of main and auxiliary nozzles. An average determination coefficient of 88.57% between the dimensionless water application rate of the composed and pair patterns was obtained. In the linear relation, already adjusted, between Christiansen uniformity values of a traveller irrigation machine, obtained from the composed and pair patterns, the inclination was 44° 12' with an average relative error of 2.34%. These results show that the proposed composition does not affected, in a meaningful way, Christiansen uniformity values of traveller irrigation machines.

[4] Guidance Commitee: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Major Professor) and Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

# 1 INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação da uniformidade de aplicação de água, em sistemas de irrigação por aspersão, apresentam importante papel no auxílio à tomada de decisões em projetos de irrigação, na avaliação do sistema de irrigação e no desenvolvimento de novos aspersores. Segundo Yanagi Júnior et al. (1995) e Rolim & Pereira (2005), o uso de simulações digitais em computadores, para efetuar o dimensionamento e a análise da disposição do sistema de irrigação por aspersão, torna-se uma ferramenta extremamente útil devido à agilização, à precisão e à segurança dos resultados obtidos.

A análise das melhores disposições e operação dos aspersores no campo, mediante a aplicação de modelos de simulação da distribuição espacial de água, é efetuada a partir dos perfis estacionários de distribuição de água dos aspersores, operando nas mesmas condições que serão atingidas por ocasião de sua instalação nos sistemas de irrigação (Vories et al., 1987; Carrión et al., 2001). Dessa forma, o perfil radial de distribuição de água de aspersores, determinado em instalações apropriadas, em função das diferentes combinações de pressão de serviço e diâmetro de bocais, é utilizado para simular a distribuição de água de sistemas convencionais de aspersão (Allen, 1992) e de sistemas mecanizados, como pivô central (Gat & Molle, 2000) e autopropelido (Prado 2004).

A existência de inúmeras possibilidades de combinações de pressão de serviço e diâmetro de bocais e a dificuldade para a realização de ensaios de distribuição de água, principalmente quando são de aspersores de grande porte (canhões hidráulicos), levam os fabricantes desses aspersores a não disponibilizarem, ou a apresentarem de forma inadequada, as características técnicas de distribuição de água de seus produtos. Existem procedimentos normalizados para estas determinações (ISO, 1990 e ASAE, 1987), entretanto, o

alto custo na construção de bancadas de ensaio, que atendam às normas técnicas, e as dificuldades na realização desses ensaios fazem com que os catálogos técnicos apresentem somente dados de vazão e raio de alcance (Prado & Colombo, 2005a). Dessa maneira, é preciso trabalhar com técnicas, de modo a reduzir o número de ensaios (Prado & Colombo, 2005b) ou determinar estes valores diretamente em condições reais de campo (Newell et al., 2003).

De acordo com Keller & Bliesner (1990) e Bernardo et al. (2005), a forma geométrica do perfil radial de distribuição de água de um aspersor sofre alteração em função do tipo de bocal, pressão de serviço, uso de braço defletor ou uso de múltiplos bocais. Para Kincaid (1991), o uso de aspersores com braço defletor, ou de aspersores operando com múltiplos bocais, é uma técnica utilizada para adequar a forma geométrica do perfil radial de distribuição de água do aspersor. Dessa forma, segundo o mesmo autor, é possível operar o sistema de irrigação com pressões de serviço menores, sem alterar o espaçamento dos aspersores e reduzir os custos de energia.

De modo a oferecer um procedimento mais ágil e menos trabalhoso, para a determinação do perfil radial de distribuição de água de aspersores, que operam com dois bocais, e visando à seleção da melhor combinação de bocais do aspersor, este trabalho foi realizado com o objetivo de apresentar uma metodologia de composição do perfil radial de distribuição de água do aspersor operando com dois bocais (principal + auxiliar), mediante o ensaio individual de cada bocal.

# 2 MATERIAL E MÉTODOS

## 2.1 Ensaios de distribuição de água

O trabalho foi desenvolvido com o aspersor da marca Plona®, modelo RL250. Este aspersor é um canhão hidráulico setorial de reversão lenta, com ângulo de lançamento do jato d'água de 24º e giro proporcionado pelo impacto de um de seus dois braços oscilantes. De acordo com as especificações técnicas de catálogo, o aspersor apresenta um flange de acoplamento de 2½" e é constituído por um bocal principal, tipo cônico de latão, com oito diâmetros distintos (14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 e 28 mm) e por um bocal auxiliar, tipo cônico de plástico, com três diâmetros distintos (5, 6 e 7 mm).

Os ensaios para a determinação das características técnicas do aspersor (vazão, raio de alcance e perfil radial de distribuição de água) foram realizados, sob condições de vento inferiores a 0,9 m $s^{-1}$, na bancada de ensaios do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, esquematizada na Figura 3, seguindo metodologia descrita por Prado & Colombo (2005a).

De modo a efetuar o procedimento de composição dos perfis radiais de distribuição de água, trabalhou-se com os três bocais auxiliares do aspersor (5, 6 e 7 mm) e com o menor (14 mm) e o maior (28 mm) bocal principal do aspersor. Dessa forma, os ensaios para a determinação dos valores de vazão, de raio de alcance e do perfil radial de distribuição de água foram determinados para os bocais principais 14 e 28 mm, com o bocal auxiliar fechado e, para os bocais auxiliares, 5, 6 e 7 mm, com o bocal principal fechado. Estes ensaios foram realizados sob cinco valores de pressão de serviço (294, 392, 490, 588 e 686 kPa), definidas no catálogo técnico do aspersor e medidas na base do aspersor com manômetro alocado de modo a coincidir com a altura do bocal principal.

Como o giro do aspersor é proporcionado pelo impacto do braço oscilante sobre o jato do bocal principal, para proceder aos ensaios dos bocais auxiliares, dos quais o bocal principal era fechado, foi construído um mecanismo para proporcionar o giro do aspersor durante os ensaios. Este mecanismo, como mostrado na Figura 4, é constituído de um motor elétrico de 1/3 de CV com caixa de redução que apresenta rotação de 70 rpm e redutores de rotação de modo que a rotação do aspersor fosse de 0,5 rpm. Trabalhou-se com este valor de rotação do aspersor, pois os demais ensaios do aspersor, operando com os bocais principais, foram realizados com rotações próximas a este valor.

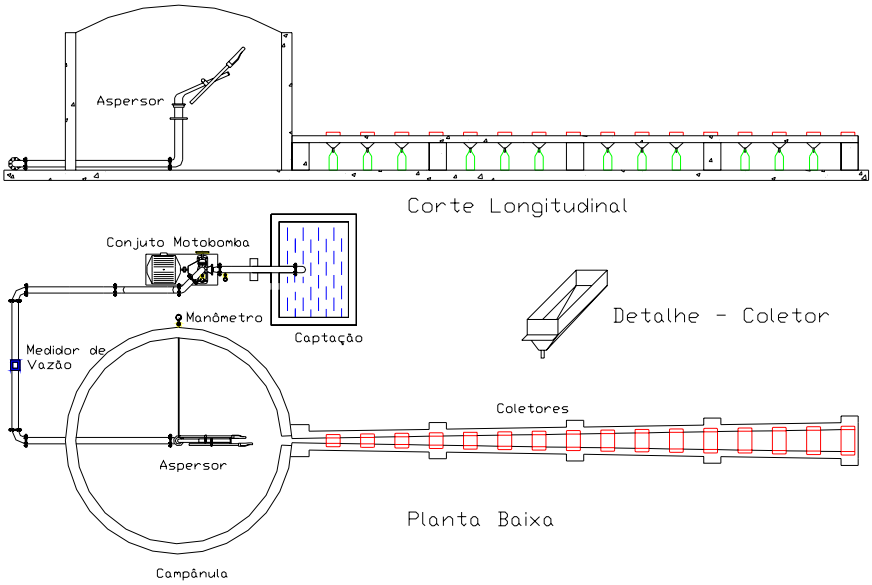


FIGURA 3 - Layout da bancada de ensaios utilizada para a determinação das características técnicas do aspersor Plona-RL250.

Para verificar a adequação da metodologia de composição dos perfis radiais de distribuição de água também foram realizados, sob os mesmos valores de pressão de serviço, os ensaios de vazão, raio de alcance e perfil radial de

distribuição de água combinando-se os bocais principais com os bocais auxiliares (14 x 5, 14 x 6, 14 x 7, 28 x 5, 28 x 6 e 28 x 7 mm).

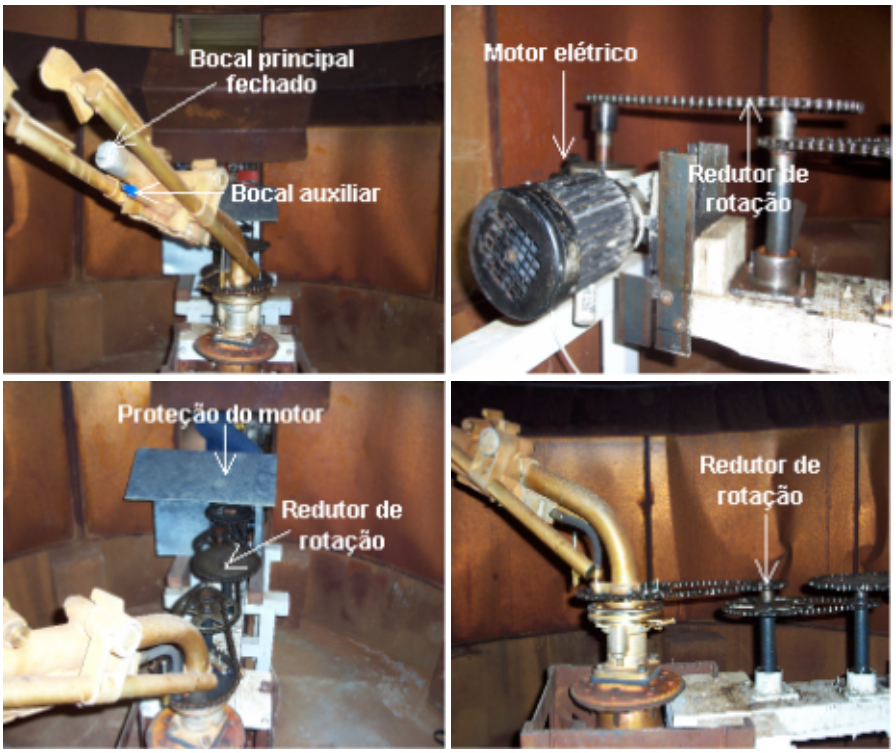


FIGURA 4 - Mecanismo de rotação para ensaio dos bocais auxiliares do aspersor Plona-RL250.

## 2.2 Tratamento dos dados de ensaio

Após a determinação de cada perfil radial de distribuição de água, seguindo sugestão de Seginer et al. (1992), Li (1996) e Molle & Gat (2000), o valor de vazão determinado pelo hidrômetro foi comparado com o valor de vazão correspondente ao giro completo do perfil radial de distribuição de água, dado pela expressão:

$$Q_c = 2\pi \int_0^R \frac{i(r) \cdot r \cdot dr}{1000} \tag{9}$$

em que $Q_c$ é a vazão do aspersor correspondente ao giro completo do perfil radial ($m^3\ h^{-1}$); R é o raio de alcance do aspersor (m); r é a distância radial de cada coletor em relação ao aspersor (m) e i(r) é a intensidade de precipitação em função da distância radial do aspersor ($mm\ h^{-1}$).

O raio de alcance, para as diferentes combinações de pressão de serviço e bocais do aspersor, foi determinado no perfil radial de distribuição de água ensaiado, a partir dos valores de intensidade de precipitação observados nos dois últimos coletores. Estes valores foram prolongados linearmente até a intensidade de precipitação assumir valor igual a zero. Esta determinação pode ser dada pela expressão:

$$R = \frac{(i_{N-1} \cdot r_N) - (i_N \cdot r_{N-1})}{i_{N-1} - i_N} \tag{10}$$

em que $i_{j=N}$ é a intensidade de precipitação ocorrida no coletor N ($mm\ h^{-1}$); $i_{j=N-1}$ é a intensidade de precipitação ocorrida no coletor N-1 ($mm\ h^{-1}$); $r_{j=N}$ é a distância do aspersor ao coletor N (m); $r_{j=N-1}$ é a distância do aspersor ao coletor N-1 (m) e N é o número de coletores no ensaio.

Seguindo a metodologia de Solomon & Bezdek (1980), cada perfil radial de distribuição de água foi adimensionalizado, expressando a distância ao aspersor em termos da fração do raio de alcance e os valores de intensidade de precipitação, em termos da intensidade média de aplicação de água, dados por:

$$ra_j = \frac{r_j}{R} \tag{11}$$

$$ia_j = \frac{i_j . \pi . R^2}{1000 \cdot Q_c} = \frac{i_j}{im} \qquad \text{com}: 1 \le j \le N \tag{12}$$

em que $ra_j$ é a distância adimensional em relação ao aspersor; $r_j$ é a distância do coletor em relação ao aspersor (m); $ia_j$ é a intensidade de precipitação

adimensional; $i_j$ é a intensidade de precipitação coletada (mm $h^{-1}$) e im é a intensidade de precipitação média aplicada pelo aspersor (mm $h^{-1}$).

Com as informações contidas em cada perfil radial adimensional, foram construídos novos perfis radiais adimensionais de distribuição de água contendo quarenta valores de intensidade de aplicação de água ($ia_s$), correspondentes às distâncias adimensionais dadas por:

$$ra_s = 0{,}0125 + (s-1) \cdot 0{,}025 \qquad \text{com}: 1 \le s \le 40 \tag{13}$$

em que $ra_s$ é a distância adimensional ao aspersor, dada pelo índice s.

Na reconstituição dos perfis radiais de distribuição de água, para a sua forma dimensional, são utilizados os valores de vazão e raio de alcance do aspersor determinados nos ensaios. Para tanto, foram ajustadas, para cada bocal principal e auxiliar, equações, tipo potencial, de vazão e raio de alcance, em função da pressão de serviço do aspersor, dadas por:

$$Q_a = k_a \cdot p^{0,5} \tag{14}$$

$$Q_p = k_p \cdot p^{0,5} \tag{15}$$

$$R_a = x_a \cdot p^{y1} \tag{16}$$

$$R_p = x_p \cdot p^{y2} \tag{17}$$

em que $Q_a$ é a vazão do bocal auxiliar ($m^3$ $h^{-1}$); $Q_p$ é a vazão do bocal principal ($m^3$ $h^{-1}$); $R_a$ é o raio de alcance do bocal auxiliar (m); $R_p$ é o raio de alcance do bocal principal (m); p é a pressão de serviço do aspersor (kPa); $k_a$ e $k_p$ são coeficientes de ajuste das equações de vazão e $x_a$, $x_p$, y1 e y2 são coeficientes de ajuste das equações de raio de alcance.

Para a vazão do aspersor ensaiada, em função da pressão de serviço, com o conjunto de bocais auxiliar e principal, também foi ajustada uma equação do tipo potencial dada por:

$$Q_{a+p} = k_{a+p} \cdot p^{0,5} \tag{18}$$

em que $Q_{a+p}$ é a vazão do conjunto de bocais auxiliar e principal ($m^3\ h^{-1}$) e $k_{a+p}$ é o coeficiente de ajuste da equação de vazão.

No caso do raio de alcance do aspersor operando com o conjunto de bocais auxiliar e principal, trabalhou-se com os valores originais de raio de alcance, obtidos no perfil radial de distribuição de água com auxílio da equação 10.

## 2.3 Procedimento de composição dos perfis radiais

A vazão, para uma mesma pressão de serviço, do aspersor operando com o conjunto de bocais auxiliar e principal, apresenta valor inferior ao da vazão do bocal auxiliar, somado ao valor da vazão do bocal principal operando individualmente. Dessa forma, a pressão de serviço, para o bocal auxiliar e o principal, a ser considerada na composição do perfil radial de distribuição de água, também terá um valor inferior à pressão de serviço do aspersor operando com o conjunto de bocais auxiliar e principal, que é calculada por:

$$p' = p \cdot \left( \frac{k_{a+p}}{k_a + k_p} \right)^2 \tag{19}$$

em que p' é a pressão de serviço do bocal auxiliar e principal, corrigida para a composição do perfil radial de distribuição de água (kPa).

Com o valor da pressão de serviço corrigida, são determinados os valores de vazão (equações 14 e 15) e o raio de alcance (equação 16 e 17) do bocal auxiliar e principal do aspersor. Como o valor da pressão de serviço corrigida é inferior ao valor da pressão de serviço do aspersor operando com o conjunto de bocais auxiliar e principal, seguindo metodologia descrita por Prado & Colombo (2005b), procedeu-se a uma interpolação linear, dos valores de intensidade de precipitação adimensionais ($ia_s$), dados pelas distâncias adimensionais $ra_s$, entre dois intervalos de pressões de serviço, mais próximas e

compreendidas entre o valor da pressão de serviço corrigida. A expressão utilizada para a determinação do perfil radial interpolado do bocal auxiliar e do bocal principal, para a pressão corrigida p', é dada por:

$$iad_s = \frac{ias_s(p' - pi) + iai_s(ps - p')}{ps - pi} \qquad com: 1 \leq s \leq 40 \qquad (20)$$

em que $iad_s$ é a intensidade de precipitação adimensional obtida por interpolação para a pressão p'; $ias_s$ é a intensidade de precipitação adimensional para o perfil radial adimensional obtido na pressão imediatamente acima à pressão p' (ps em kPa) e $iai_s$ é a intensidade de precipitação adimensional para o perfil radial adimensional obtido na pressão imediatamente abaixo a pressão p' (pi em kPa).

A partir dos valores de vazão, raio de alcance e perfil radial adimensional do bocal auxiliar e principal, procedeu-se a dimensionalização do perfil radial de distribuição de água, multiplicando-se os valores adimensionais de distância ao aspersor ($ra_s$) pelo valor do raio de alcance (R) e multiplicando-se os valores adimensionais de intensidade de precipitação ($iad_s$) pelo valor de intensidade de precipitação média (im).

Para valores de pressão de serviço corrigidas (p') menores que 294 kPa, não foi efetuado o processo de interpolação linear entre perfis radiais adimensionais. Nesta condição, determinou-se o valor da vazão e raio de alcance dos bocais auxiliar e principal, com o valor da pressão de serviço corrigida (p') e foi utilizado o próprio perfil radial adimensional de distribuição de água, obtido na pressão de serviço de 294 kPa, no processo de dimensionalização.

Na composição dos perfis radiais de distribuição de água do aspersor, operando com os bocais auxiliar e principal, os valores dimensionais de intensidade de precipitação, ocorridos no perfil radial de distribuição de água do bocal principal, são somados aos valores dimensionais de intensidade de precipitação, ocorridos no perfil radial de distribuição de água do bocal auxiliar, pela expressão:

$$i_{(a+p)s} = \frac{\left(r_{(p)s} - r_{(a)s1}\right) - \left(i(r)_{(a)s1+1} - i(r)_{(a)s1}\right)}{r_{(a)_{s1+1}} - r_{(a)_{s1}}} + \left(i_{(p)s} + i_{(a)s1}\right) \quad (21)$$

$$\text{com: } r_{(a)s1} \leq r_{(p)s} \leq r_{(a)_{s1+1}} \;;\; 1 \leq s \leq 40 \text{ e } 1 \leq s1 < 40$$

em que $i_{(p+a)s}$ é a intensidade de precipitação de índice s do aspersor com os bocais principal e auxiliar (mm $h^{-1}$); $i_{(p)s}$ é a intensidade de precipitação de índice s do aspersor com o bocal principal (mm $h^{-1}$); $i_{(a)s1}$ é a intensidade de precipitação de índice s1 do aspersor com o bocal auxiliar (mm $h^{-1}$); $i_{(a)s1+1}$ é a intensidade de precipitação de índice s1+1 do aspersor com o bocal auxiliar (mm $h^{-1}$); $r_{(p)s}$ é a distância de índice s ao aspersor com o bocal principal (m); $r_{(a)s1}$ é a distância de índice s1 ao aspersor com o bocal auxiliar (m) e $r_{(a)s1+1}$ é a distância de índice s1+1 ao aspersor com o bocal auxiliar (m).

## 2.4 Validação do modelo

De modo a verificar a consistência da metodologia de composição dos perfis radiais de distribuição de água, foram comparados, pelo coeficiente de determinação, os 40 valores de intensidades de precipitação adimensionais, dos perfis radiais compostos, com os 40 valores de intensidades de precipitação adimensionais, dos perfis radiais do conjunto de bocais auxiliar e principal, determinados em laboratório. Também foi realizada uma análise dos valores de uniformidade de aplicação de água de equipamentos autopropelidos de irrigação, obtidos com os perfis radiais compostos, com os valores de uniformidade de aplicação de água, obtidos com os perfis radiais determinados em laboratório para o conjunto de bocais auxiliar e principal.

Para esta última análise, foi desenvolvido um aplicativo computacional, em *Visual Basic*, da planilha eletrônica *Excel*, seguindo modelo descrito por Prado (2004), para simular a uniformidade de aplicação de água de sistemas autopropelidos de irrigação. Com este programa, foram obtidos os valores de

uniformidade de aplicação de água, coeficiente de Christiansen, gerados pelos perfis radiais compostos e pelos perfis radiais do conjunto, determinados em laboratório, para o aspersor deslocando-se ao longo do carreador com uma velocidade linear constante de 50 m $h^{-1}$, operando com um ângulo de giro de 270° e espaçamento de carreadores compreendidos entre 40% a 80% do diâmetro molhado do aspersor.

Os valores de uniformidade de Christiansen, obtidos com os perfis radiais do conjunto, determinados em laboratório, foram relacionados aos valores de uniformidade de Christiansen, obtidos com os perfis radiais compostos, a partir de uma equação de reta ajustada. Também foi determinado o erro relativo entre os valores de uniformidade de Christiansen, dados pela expressão:

$$\mathrm{Er} = \frac{\left|\mathrm{CUC}_{\mathrm{pl}} - \mathrm{CUC}_{\mathrm{pc}}\right|}{\mathrm{CUC}_{\mathrm{pl}}} \cdot 100 \qquad (22)$$

em que Er é o erro relativo (%); $CUC_{pl}$ é a uniformidade de Christiansen obtida com o perfil radial do conjunto de bocais, determinados em laboratório (%) e $CUC_{pc}$ é a uniformidade de Christiansen, obtida com o perfil radial composto (%).

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentadas as equações de vazão e de raio de alcance do bocal auxiliar (5, 6 e 7 mm) e principal (14 e 28 mm) operando individualmente no aspersor Plona-RL250. Observa-se, também nesta tabela, que as equações de vazão e de raio de alcance apresentaram coeficientes de determinação todos superiores a 96%, revelando um bom ajuste aos dados observados nos ensaios de laboratório.

TABELA 1 - Equações de vazão e raio de alcance do aspersor Plona-RL250 trabalhando individualmente com os bocais auxiliares e principais.

| **Bocal - b (mm)** | **Vazão - Q ($m^3\ h^{-1}$)** | | **Raio de Alcance - R (m)** | |
|---|---|---|---|---|
| **5** | $Q_a = 0{,}0989 \cdot p^{0,5}$ | ($r^2$=0,9984) | $R_a = 4{,}8389 \cdot p^{0,2330}$ | ($r^2$=0,9880) |
| **6** | $Q_a = 0{,}1320 \cdot p^{0,5}$ | ($r^2$=0,9868) | $R_a = 4{,}9729 \cdot p^{0,2424}$ | ($r^2$=0,9687) |
| **7** | $Q_a = 0{,}1886 \cdot p^{0,5}$ | ($r^2$=0,9990) | $R_a = 2{,}6661 \cdot p^{0,3568}$ | ($r^2$=0,9961) |
| **14** | $Q_p = 0{,}7112 \cdot p^{0,5}$ | ($r^2$=0,9933) | $R_p = 3{,}6927 \cdot p^{0,3717}$ | ($r^2$=0,9909) |
| **28** | $Q_p = 2{,}8032 \cdot p^{0,5}$ | ($r^2$=0,9999) | $R_p = 1{,}1160 \cdot p^{0,6144}$ | ($r^2$=0,9931) |

Na Tabela 2 são apresentadas as equações de vazão do conjunto de bocais auxiliar e principal. Conforme os valores de coeficientes de determinação mostrados nesta tabela, verifica-se que os dados observados nos ensaios de laboratório apresentaram adequados ajustes às equações ($r^2 > 99\%$).

A necessidade da realização dos ensaios de vazão do conjunto de bocais auxiliar e principal é justificável, pois é possível verificar, a partir das equações da Tabela 1, que, para uma mesma pressão de serviço, a soma algébrica da vazão do bocal auxiliar com a vazão do bocal principal não corresponderá, como pode ser observado na Tabela 2, à vazão do aspersor operando com o conjunto

de bocais. Dessa forma, não é adequado proceder ao cálculo da vazão do aspersor, como apresentado por Pereira (2003), o qual utiliza coeficientes de descarga (Cd) do bocal auxiliar e do bocal principal determinados individualmente e, sim, utilizar um coeficiente de descarga do aspersor operando com o conjunto de bocais auxiliar e principal.

TABELA 2 - Equações de vazão do aspersor Plona-RL250 trabalhando com o conjunto de bocais auxiliar e principal.

| **Bocais – b (mm)** | **Vazão - Q ($m^3$ $h^{-1}$)** |
|---|---|
| **14 x 5** | $Q_{a+p} = 0{,}8001 \cdot p^{0,5}$ ($r^2$=0,9949) |
| **14 x 6** | $Q_{a+p} = 0{,}8349 \cdot p^{0,5}$ ($r^2$=0,9940) |
| **14 x 7** | $Q_{a+p} = 0{,}8858 \cdot p^{0,5}$ ($r^2$=0,9999) |
| **28 x 5** | $Q_{a+p} = 2{,}8818 \cdot p^{0,5}$ ($r^2$=0,9999) |
| **28 x 6** | $Q_{a+p} = 2{,}9060 \cdot p^{0,5}$ ($r^2$=0,9999) |
| **28 x 7** | $Q_{a+p} = 2{,}9347 \cdot p^{0,5}$ ($r^2$=0,9998) |

Apesar do inconveniente da realização dos ensaios de laboratório para a determinação da vazão do conjunto de bocais auxiliar e principal, em função da pressão de serviço, o uso desta metodologia ainda é vantajosa, pois ensaios de vazão são rápidos e menos trabalhosos que a determinação dos perfis radiais de distribuição de água do conjunto de bocais. Para os 8 diâmetros de bocais principais (14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 e 28), 4 condições de bocais auxiliares (0, 5, 6 e 7) e 5 pressões de serviço (294, 392, 490, 588 e 686 kPa) do aspersor Plona-RL250, seriam possíveis 160 diferentes combinações operacionais para a determinação dos perfis radiais do aspersor. Ao utilizar esta metodologia de composição, 120 ensaios são necessários para determinar os perfis radiais do aspersor, para todas as combinações possíveis de bocal principal, bocal auxiliar e pressão de serviço do aspersor.

Com as equações de vazão do bocal auxiliar e do bocal principal (Tabela 1) e do conjunto dos bocais auxiliar e principal (Tabela 2), determina-se a pressão de serviço corrigida, p' e calcula-se o perfil radial de distribuição de água composto do aspersor (Figura 5). Nesta figura são apresentados o perfil radial do bocal auxiliar (linha amarela), o perfil radial do bocal principal (linha verde), o perfil radial composto com o bocal auxiliar e principal (linha azul) e o perfil radial do conjunto de bocais auxiliar e principal determinado em laboratório (pontos vermelhos), considerando uma pressão de serviço de 490 kPa para o conjunto de bocais auxiliar e principal. Observa-se, nesta figura, que os perfis radiais compostos apresentaram boa semelhança com os perfis radiais do conjunto de bocais auxiliar e principal determinados em laboratório.

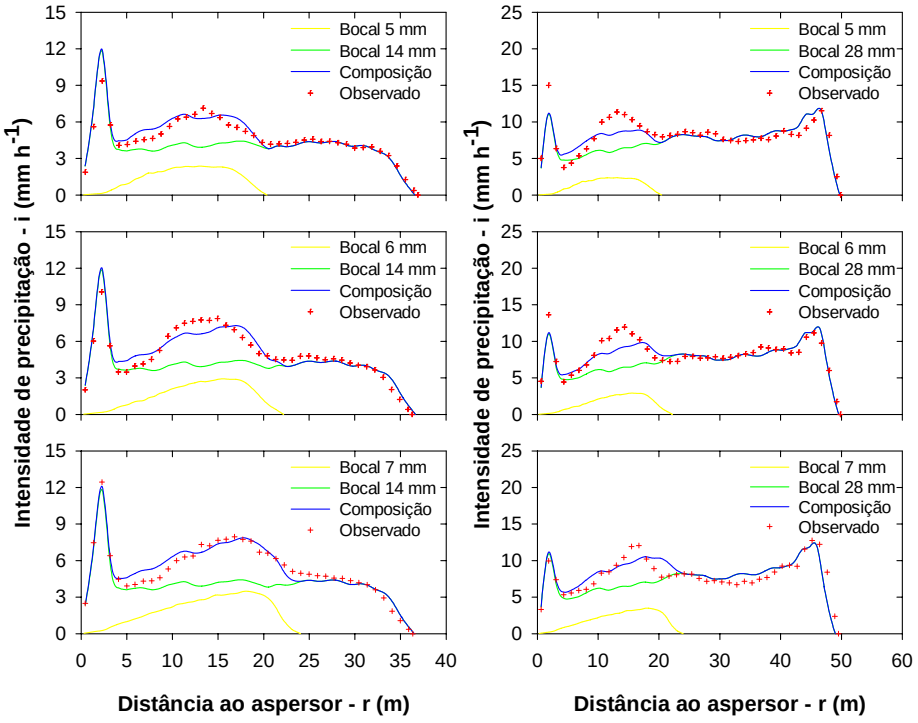


FIGURA 5 - Perfis radiais de distribuição de água do aspersor Plona-RL250 compostos e observados em ensaios de laboratório, considerando a pressão de 490 kPa para o conjunto de bocais auxiliar e principal.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de coeficientes de determinação obtidos na comparação dos valores de intensidades de precipitação adimensionais dos perfis radiais compostos com os valores de intensidades de precipitação adimensionais dos perfis radiais do conjunto de bocais auxiliar e principal. Observa-se, nesta tabela, que os menores valores de coeficientes de determinação ocorreram na pressão de serviço de 294 kPa, uma vez que, para esta pressão, não houve interpolação linear entre dois perfis radiais adimensionais. Dessa forma, recomenda-se a realização de ensaios de distribuição de água, tanto do bocal auxiliar como do bocal principal, em uma pressão de serviço mais baixa, por exemplo 245 kPa, para possibilitar este procedimento de interpolação.

TABELA 3 - Coeficientes de determinação obtidos na comparação entre os valores de intensidades de precipitação adimensionais dos perfis radiais compostos com os perfis radiais do conjunto de bocais auxiliar e principal.

| **Bocais - b** | **Pressão de serviço – h (kPa)** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **(mm)** | **294** | **392** | **490** | **588** | **686** |
| **14 x 5** | 0,8767 | 0,9182 | 0,9343 | 0,9579 | 0,9516 |
| **14 x 6** | 0,8535 | 0,9392 | 0,9179 | 0,9699 | 0,9412 |
| **14 x 7** | 0,8012 | 0,9099 | 0,9601 | 0,9590 | 0,9291 |
| **28 x 5** | 0,8240 | 0,9017 | 0,8050 | 0,8754 | 0,9422 |
| **28 x 6** | 0,6273 | 0,9587 | 0,8626 | 0,8836 | 0,9332 |
| **28 x 7** | 0,7370 | 0,8876 | 0,8819 | 0,7847 | 0,8472 |

De acordo com as observações de Molle & Gat (2000), uma boa adequação dos valores estimados aos valores observados é obtida com valores de coeficiente de determinação em torno de 85%. Verifica-se, na Tabela 3, que

para a maior parte dos valores encontrados, o coeficiente de determinação foi superior a 85%, com média geral igual a 88,57%.

Na Figura 6a é apresentada a relação linear entre os valores de CUC, obtidos com os perfis radiais determinados em laboratório e com os perfis radiais determinados pelo procedimento de composição. Esta relação linear, demonstrada por uma equação de reta, apresentou coeficiente de determinação igual a 95% e coeficiente angular de reta igual a 44°12', denotando boa aderência entre os valores de intensidade de precipitação dos perfis radiais determinados em laboratório com as intensidades de precipitação dos perfis radiais compostos.

Na Figura 6b são apresentados os valores de erros relativos percentuais entre os valores de CUC, determinados com os perfis radiais obtidos em laboratório e com os perfis radiais obtidos pelo procedimento de composição, originados de 212 simulações de espaçamento entre carreadores. O erro relativo médio foi igual a 2,34%, sendo o maior valor de erro relativo igual a 10,52%, gerado por um erro absoluto de 8,54% e o menor valor de erro relativo foi de 0,01%, gerado por um erro absoluto de 0,007%.

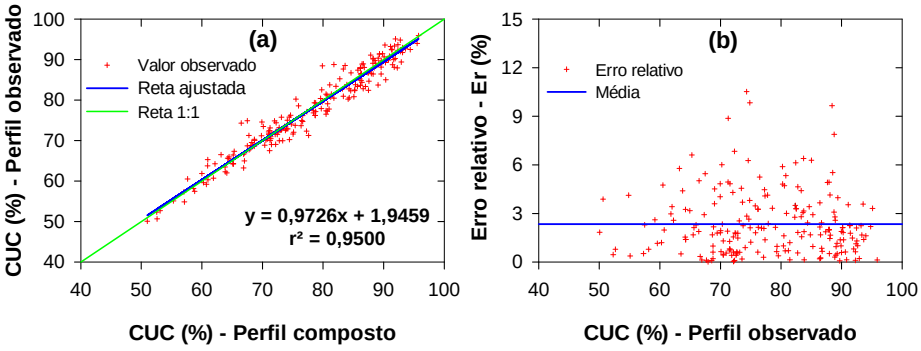


FIGURA 6 - Relação dos valores de CUC (a) e erro relativo (b), obtidos com os perfis radiais compostos e os perfis radiais do conjunto de bocais auxiliar e principal, para sistemas autopropelidos de irrigação.

# 4 CONCLUSÕES

i) O procedimento de composição do perfil radial de distribuição de água do bocal auxiliar com o perfil radial de distribuição de água do bocal principal, obtidos separadamente em ensaios de laboratório, pode ser utilizado para a determinação do perfil radial de distribuição de água do conjunto de bocais.

ii) O procedimento de composição do perfil radial de aspersores não influencia, de maneira significativa, a uniformidade de aplicação de água de aspersores operando em sistemas autopropelidos de irrigação.

# 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ALLEN, R.G. **Catch-3D sprinkler pattern analysis software:** user's manual. Logan, Utah: Utah State University. Dept. of Biol. and Irrig. Engrg., 1992.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE Standard S330.1.** Procedure for sprinkler distribution testing research purposes. St. Joseph, 1987. p. 487-489.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa, MG: UFV, 2005. 611 p.

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J.; MOTERO J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. I. Description of model. **Irrigation Science**, v. 20, p. 74-84, 2001.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7749-2.** Irrigation equipment - Rotating sprinkler. Part2: Uniformity of distribution and test methods. Switzerland. 1990. 6p.

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

KINCAID, D.C. Impact sprinkler pattern modification. **Transactions of the American 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,** v. 122, n. 4, p. 244-247, July/Aug. 1996.

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

NEWELL, G. F.; FOLEY, J.; SMITH, R. **TRAVGUN-Travelling Gun Simulation model user's manual:** version 1.1. Toowooba, QLD. Austrália, 2003. 91.p.

PEREIRA, G. M. Aspersão convencional. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação.** Jaboticabal, SP: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. p. 107-178.

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

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

PRADO, G.; COLOMBO, A. Interpolação de perfis radiais de aplicação de água de aspersores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2005b.

ROLIM, J.; PEREIRA, L. S. Design and evaluation of traveling-gun systems: the simulation model TRAVGUN. In: EFITA/WCCA JOINT CONGRESS ON IT IN AGRICULTURE, 2005, Vila Real. **Proceedings…** Vila Real: EFITA/WCCA, 2005. p. 166-171.

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

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.

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

# CAPÍTULO 3

# DETERMINAÇÃO DO PERFIL RADIAL DE ASPERSORES A PARTIR DE ENSAIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM SISTEMAS AUTOPROPELIDOS DE IRRIGAÇÃO

## RESUMO

PRADO, Giuliani do. Determinação do perfil radial de aspersores a partir de ensaios de distribuição de água em sistemas autopropelidos de irrigação. In: _____. **Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento.** 2008. Cap. 3, p. 41-60. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.[5]

Com o objetivo de apresentar um procedimento para determinação do perfil radial, a partir de ensaios de distribuição de água em sistemas autopropelidos de irrigação, uma rotina computacional, escrita em *Visual Basic 6*, foi desenvolvida e avaliada. Para avaliação do programa, foi utilizado o aplicativo computacional Simulasoft e dados de ensaios de campo de sistemas autopropelidos de irrigação. As lâminas aplicadas, geradas pelo Simulasoft, foram para o aspersor Plona-RL250 (bocal = 20 x 6 mm; pressão = 490 kPa) em deslocamento linear com velocidade de 50 m $h^{-1}$ e quatro ângulos de giro (180, 270, 330 e 360°). As lâminas aplicadas, observadas nos ensaios de campo, em condições de vento menores a 1,5 m $s^{-1}$, foram para o aspersor Plona-RL250 operando na pressão de 392 kPa e sob as seguintes condições: i) bocal de 14 mm, ângulo de giro de 240° e velocidade de 30 m $h^{-1}$ e ii) bocal de 14 x 6 mm, ângulo de giro de 270° e velocidade de 55 m $h^{-1}$. O perfil radial determinado pela rotina computacional com as lâminas aplicadas, geradas com Simulasoft, foi igual ao perfil radial obtido em ensaios de laboratório, revelando que o procedimento de cálculo está correto. Uma boa semelhança entre os perfis radiais do aspersor Plona-RL250 determinados em ensaios de laboratório e gerados pela rotina computacional, com as lâminas obtidas nos ensaios de campo, foi observada, mostrando que ensaios de campo de sistemas autopropelidos de irrigação podem ser utilizados para a obtenção do perfil radial de aspersores.

---

[5] Comitê Orientador: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Orientador) e Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

## CHAPTER 3

## ABSTRACT

PRADO, Giuliani do. Determinig sprinkler patterns from water distribution tests of traveller irrigation systems. In: _____. **Modeling gun sprinkler water application under different wind conditions.** 2008. Chap. 3, p. 41-60. Thesis (Doctor Science in Agricultural Engineering) - Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.[6]

With the goal of presenting a procedure to determine rain gun radial water distribution patterns, based on catch can data collected at standard tests of traveller irrigation machines, a computational algorithm, in *Visual Basic 6*, was developed and evaluated. The algorithm was evaluated by using both simulated and measured data input. Simulated data input were obtained by running a software, named Simulasoft, in order to generate catch can data of a traveller irrigation machine transect section. Simulated values were computed considering the Plona-RL250 sprinkler (nozzle = 20 x 6 mm; pressure = 490 kPa) working with four wetted sector angles (180º, 270º, 330º and 360º) and a 50 m $h^{-1}$ linear traveling speed. Measured catch can data were obtained at field tests, held under wind speeds lower than 1.5 m $s^{-1}$, of a traveler irrigation machine working with the Plona-RL250, at 392 kPa , under the following conditions: i) nozzle = 14 mm; sector angle 240º, and traveling speed = 30 m $h^{-1}$; ii) nozzle = 14 x 6 mm, sector angle = 270º, and traveling speed = 55 m $h^{-1}$. Comparisons among radial water application profiles measured at the test bench and the ones generated by the algorithm indicated that profiles computed based on simulated data were mores accurate than the profiles computed based on field measured data. The very good similarities obtained with simulated input data demonstrate the numerical accuracy of the proposed algorithm. The reasonably good resemblance of radial patterns generated by the algorithm, when using experimental input values, demonstrates that catch can transect values collected during standard field test of traveller irrigation machines may be used in order to determine rain gun radial water distribution pattern.

[6] Guidance Commitee: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Major Professor) and Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

# 1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola sob irrigação, devido às exigências hídricas da cultura e ao cultivo em grandes extensões de terra, é um dos setores da cadeia produtiva que mais consomem água. Dessa forma, sistemas de irrigação bem dimensionados, apresentando adequados índices de uniformidade de aplicação de água, aliados a um correto manejo da irrigação, são essenciais para maximizar a produtividade e reduzir as perdas de água (Frizzone & Dourado Neto, 2003).

Nos sistemas autopropelidos de irrigação, a uniformidade de aplicação de água, na maioria das vezes, não é adequada, principalmente pelo desconhecimento das melhores condições operacionais do equipamento de irrigação (Rocha et al., 2005; Smith et al., 2002). Conforme Prado & Colombo (2005a), estas recomendações inadequadas são conseqüência da falta de conhecimento das reais características de distribuição de água dos aspersores utilizados nestes equipamentos de irrigação.

O conhecimento das características de distribuição de água dos aspersores é essencial para projetistas estabelecerem as melhores condições operacionais do sistema de irrigação por aspersão, de modo a otimizar a uniformidade de aplicação de água. Segundo Seginer et al. (1992), a mensuração do perfil radial de distribuição de água de um aspersor é requerida para a pesquisa, o desenvolvimento de protótipos de aspersores, o controle da qualidade de fabricação e a avaliação dos aspersores pelo consumidor. Diante da importância do conhecimento da distribuição de água dos aspersores, é surpreendente a falta de informações técnicas a respeito dos diversos modelos de aspersores disponíveis no mercado (Martín-Benito et al., 1992).

Keller & Bliesner (1990) e Bernardo et al. (2005) salientam que as características de distribuição de água dos aspersores dependem do modelo de

aspersor considerado, das suas condições operacionais (altura de instalação, diâmetro de bocal, pressão de serviço e ângulo de giro) e das condições climáticas durante sua operação. Além dessas várias possibilidades de combinações operacionais dos aspersores, o procedimento para a determinação do perfil radial de distribuição de água de aspersores rotativos, conforme as normas técnicas (ISO, 1990 e ASAE, 1987), é moroso e bastante trabalhoso. O grau destas dificuldades é aumentado pelo incremento no raio molhado do aspersor em questão.

Em função das dificuldades e da inviabilidade das empresas fabricantes de aspersores disponibilizarem, em seus catálogos técnicos, todos os dados de distribuição de água dos aspersores para todas as combinações operacionais de bocal, pressão de serviço e ângulo de jato, é preciso desenvolver técnicas, de modo a reduzir o número de ensaios e determinar estes valores diretamente em condições reais de campo. Prado & Colombo (2005b) apresentam uma metodologia de interpolação de perfis radiais adimensionais para a obtenção do perfil radial não ensaiado. Newell et al. (2003) apresentam uma técnica para a obtenção do perfil radial de distribuição de água que dispensa o uso de instalações especiais para ensaio do aspersor estacionário.

Com a metodologia apresentada por Newell et al. (2003), é possível a obtenção do perfil radial de distribuição de água mediante ensaios de campo de distribuição de água do aspersor acoplado a um equipamento autopropelido de irrigação, como os ensaios realizados em baixas condições de vento por Rocha et al. (2005) e Prado et al. (2007). Dessa forma, a partir de um ensaio específico de distribuição de água do equipamento autopropelido, é possível simular com programas computacionais, como o Simulasoft (Prado, 2004) e Travgun (Newell et al., 2003), a distribuição de água para outras situações não ensaiadas e estabelecer as condições operacionais, de modo a maximizar os valores de uniformidade de aplicação de água.

Newell et al. (2003) apenas descrevem a metodologia para a obtenção do perfil radial de distribuição de água mediante ensaios com equipamentos autopropelidos de irrigação. De modo a apresentar uma seqüência de cálculos para a obtenção do perfil radial de distribuição de água, a partir da metodologia descrita por Newell al. (2003), este trabalho objetivou: i) apresentar um algoritmo para a obtenção do perfil radial de distribuição de água a partir de ensaios de distribuição de água de aspersores em equipamentos autopropelidos de irrigação e ii) verificar se o procedimento de cálculo é adequado para a obtenção do perfil radial de distribuição de água do aspersor.

# 2 MATERIAL E MÉTODOS

## 2.1 Descrição do modelo

De acordo com a Figura 8, um aspersor acoplado em um sistema autopropelido de irrigação, em movimento linear com velocidade constante (V em m $h^{-1}$) e operando com um ângulo de giro θ (em graus), apresenta um ângulo seco β (em graus), que é determinado por:

$$\beta = \frac{360 - \theta}{2} \tag{23}$$

A distribuição de água desse aspersor, em movimento linear ao longo do eixo "W" (Figura 8), o qual coincide com o carreador, é determinada, de acordo com a norma ISO 8224-1 (International Organization for Standardization, 2003), com auxílio de um dado número (N) de coletores de água dispostos ao longo do eixo "y", situado perpendicularmente ao sentido de deslocamento do aspersor.

Os coletores de água dispostos ao longo do eixo "y", espaçados em Δe (em m), se estendem ao longo do raio de alcance do aspersor (Figura 8). Após a passagem do aspersor, cada coletor de água que se encontra a uma dada distância em relação ao carreador e contida no vetor $\mathbf{d} = (d_1, d_2,..., d_N)^t$, apresenta uma dada lâmina de irrigação aplicada, caracterizada pelo vetor "$\mathbf{I} = (I_1, I_2,..., I_N)^t$". A partir da lâmina aplicada no último coletor que recebeu água e do antepenúltimo é estabelecido o raio de alcance (R em m) do aspersor, prolongando linearmente as lâminas aplicadas até o valor de zero, que é dado por:

$$R = d_{(N)} - I_{(N)} \cdot \left( \frac{d_{(N-2)} - d_{(N)}}{I_{(N-2)} - I_{(N)}} \right) \tag{24}$$

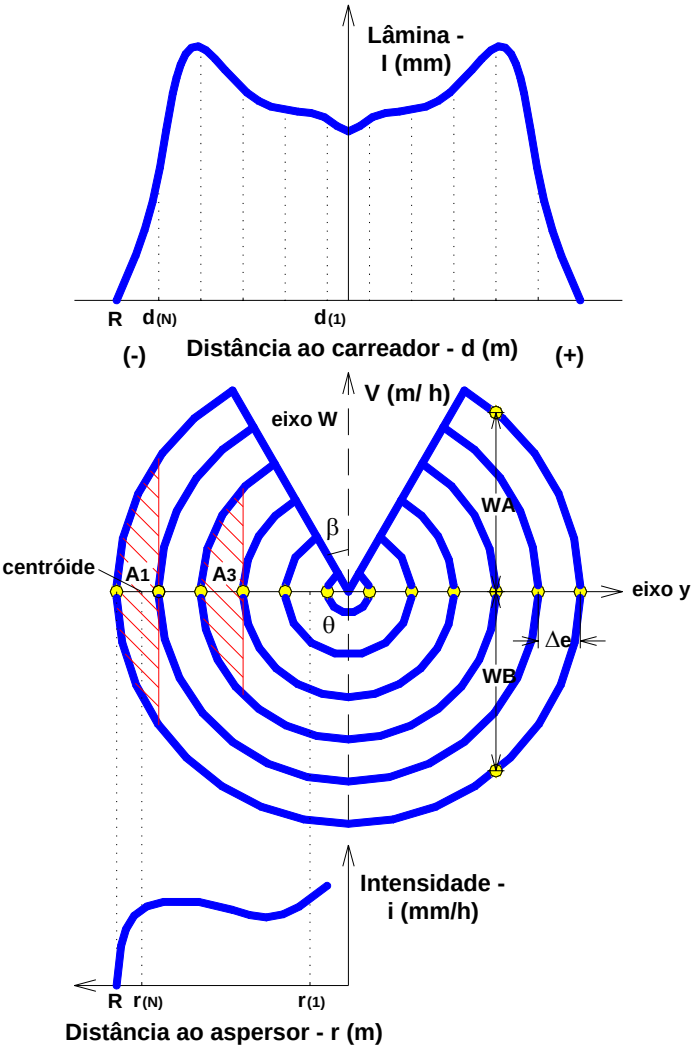


FIGURA 8 - Representação da distribuição de água de um aspersor em movimento com velocidade linear constante ao longo do carreador. Adaptado de Newell et al. (2003).

Durante a passagem do aspersor, cada coletor recebeu água durante um intervalo de tempo "T" (em h) que, de acordo com a Figura 8, começa no início da aplicação de água e termina no final da aplicação. Este tempo de molhamento depende da velocidade linear (V em m $h^{-1}$) de deslocamento do aspersor e da

distância entre o início e o fim da aplicação de água. Para a determinação desta distância são utilizadas as variáveis auxiliares WA e WB (Figura 8), que dependem do ângulo seco β, da coordenada "y" que o coletor em questão se encontra (ya em m) e da coordenada "y" do próximo ponto (yp em m), dadas por:

$$WA(ya, yp, \beta) = \begin{cases} \text{para}: \ ya \geq yp \ \rightarrow \ WA = 0 \\ \text{para}: \ yp \cdot sen(\beta) \leq ya < yp \ \rightarrow \ WA = \sqrt{yp^2 - ya^2} \\ \text{para}: \ ya < yp \cdot sen(\beta) \ \rightarrow \ WA = ya \cdot cotg(\beta) \end{cases} \quad (25)$$

$$WB(ya, yp) = \begin{cases} \text{para}: \ ya \geq yp \ \rightarrow \ WB = 0 \\ \text{para}: \ ya < yp \ \rightarrow \ WB = -\sqrt{ya^2 - yp^2} \end{cases} \quad (26)$$

Para ensaios de distribuição de água do aspersor operando em equipamentos autopropelidos de irrigação, sob baixos valores de velocidade de vento (menor que 0,9 m $s^{-1}$), as lâminas aplicadas nos coletores à direita e à esquerda do aspersor são praticamente iguais, permitindo trabalhar com a média das lâminas aplicadas nestes coletores. Dessa forma, as lâminas aplicadas à direita e à esquerda são simétricas, possibilitando caracterizar a posição de cada coletor como anéis (Figura 8). A partir destes anéis são determinadas as intensidades de precipitação, caracterizadas pelo vetor "$\mathbf{i} = (i_1, i_2,..., i_{N+1})^t$", ocorridas no perfil radial de distribuição de água do aspersor.

Para o último coletor que recebeu água, "$I_{(N)}$", a intensidade de precipitação média "$i_{(N)}$ (em mm $h^{-1}$)", ocorrida na área "A1" (Figura 8) e calculada pela expressão (27), representa a relação entre a lâmina de precipitação, "$I_{(N)}$ (em mm)" e o tempo necessário para que o aspersor percorra a distância correspondente à base da área "A1", a qual é calculada a partir da distância "$d_{(N)}$ (em m)" ao carreador e do raio de alcance do aspersor, utilizando as funções auxiliares WA e WB.

$$i_{(N)} = \frac{I_{(N)} \cdot V}{WA\left(d_{(N)}, R, \beta\right) - WB\left(d_{(N)}, R\right)} \tag{27}$$

A distância ao aspersor no perfil radial de distribuição de água, caracterizada pelo vetor "**r** = $(r_1, r_2, ... r_{N+1})^t$", que ocorreu a intensidade de precipitação média corresponde à distância do aspersor até o centróide de "A1". O valor da distância do aspersor até o centróide (dc(ya,yp) em m) pode ser calculada por:

$$dc(ya, yp) = \frac{2 \cdot \left(yp^2 - ya^2\right)^{1,5}}{3 \cdot \left[ yp^2 \cdot \operatorname{arctg}\left( \frac{\sqrt{yp^2 - ya^2}}{ya} \right) - ya \cdot \sqrt{yp^2 - ya^2} \right]} \tag{28}$$

Para os demais valores de intensidades de precipitação média e distâncias ao aspersor ocorridas no perfil radial de distribuição de água, o procedimento de cálculo é semelhante. Entretanto, é preciso retirar as lâminas precipitadas no coletor em questão, que são decorrentes das intensidades de precipitação médias ocorridas em pontos mais distantes do perfil radial de distribuição de água. Dessa forma, a intensidade de precipitação média ocorrida em um coletor de índice "p" pode ser determinada pela expressão:

$$i_{(p)} = \frac{I_{(p)} - \left( i_{(N)} \cdot T1 + \sum_{k=2}^{N-p} i_{(p+k-1)} \cdot T2 \right)}{T} \quad \text{com: } 1 \le p < N$$

$$\begin{aligned}
T &= \frac{WA\left(d_{(p)}, d_{(N)}, \beta\right) - WB\left(d_{(p)}, d_{(N)}\right)}{V} \\
T1 &= \frac{\left(WA\left(d_{(p)}, R, \beta\right) - WA\left(d_{(p)}, d_{(N)}, \beta\right)\right) - \left(WB\left(d_{(p)}, R\right) - WB\left(d_{(p)}, d_{(N)}\right)\right)}{V} \\
T2 &= \frac{\left(WA\left(d_{(p)}, d_{(p+k)}, \beta\right) - WA\left(d_{(p)}, d_{(p+k-1)}, \beta\right)\right)}{V} - \ldots \\
&\ldots - \frac{\left(WB\left(d_{(p)}, d_{(p+k)}\right) - WB\left(d_{(p)}, d_{(p+k-1)}\right)\right)}{V}
\end{aligned} \tag{29}$$

As intensidades de precipitações médias calculadas, contidas no vetor "**i**", de aspersores operando em sistemas autopropelidos de irrigação com ângulos de giro menor que 360º, são corrigidas pelo fator θ/360.

## 2.2 Validação do modelo

Para verificar se o procedimento de cálculo apresentado está correto, foi utilizado o aplicativo computacional Simulasoft (Prado, 2004). Este programa simula, a partir das características técnicas de vazão, raio de alcance e perfil radial de distribuição de água do aspersor, as lâminas aplicadas pelo aspersor em um equipamento autopropelido de irrigação, operando com um ângulo de giro θ e deslocando-se com uma velocidade linear constante.

Com auxílio do programa, foram determinadas, com o perfil radial de distribuição de água do aspersor da marca Plona®, modelo RL250, obtido com os bocais 20 x 6 mm, sob a pressão de serviço de 490 kPa, na bancada de ensaio de aspersores da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, as lâminas aplicadas por este aspersor deslocando-se com uma velocidade constante de 50 m $h^{-1}$ e quatro ângulos de giro distintos (180º, 270º, 330º e 360°).

A partir das quatro condições simuladas, as lâminas aplicadas em coletores espaçados em 2 m foram utilizadas, com o auxílio do procedimento de cálculo descrito, para estabelecer o perfil radial de distribuição de água do aspersor. Este perfil radial estimado foi comparado com o perfil radial utilizado no Simulasoft para gerar as lâminas aplicadas pelo aspersor.

Para a validação experimental do modelo, foram determinados, na bancada de ensaios de aspersores da Universidade Federal de Lavras, a vazão, o raio de alcance e o perfil radial de distribuição de água do aspersor Plona-RL250, para as duas condições operacionais distintas. Estes ensaios foram realizados, de acordo com o procedimento descrito por Prado & Colombo

(2005), com o aspersor operando com os bocais 14 mm e 14 x 6 mm na pressão de 392 kPa.

Os ensaios de campo de distribuição de água foram feitos com o aspersor Plona-RL250, operando em um carretel enrolador da marca Metal Lavras, modelo Hidro Roll 63/150 sob a pressão de 392 kPa. Estes ensaios foram realizados no Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) de Uberaba, MG, em um terreno com declividade de 2% no sentido do deslocamento do aspersor, observando-se as seguintes condições operacionais: i) bocal de 14 mm, ângulo de giro de 240° e velocidade de 30 m $h^{-1}$ e ii) bocais de 14 x 6 mm, ângulo de giro de 270° e velocidade de 55 m $h^{-1}$.

Nos ensaios de campo, transversalmente ao sentido de deslocamento do aspersor, a uma distância maior que 45 m dos pontos de início e de parada do deslocamento linear do aspersor no carreador, foram instaladas três linhas de coletores, espaçadas de 6 m. Em cada lado dessas linhas, 20 coletores de plástico, com 8 cm de diâmetro, foram instalados. O espaçamento entre coletores foi de 2 m, sendo o primeiro coletor de cada linha instalado a uma distância de 1 m da linha de deslocamento do aspersor no carreador. A área de captação dos coletores foi mantida em nível, a uma distância média de 40 cm da superfície do solo. Durante os ensaios, a velocidade média do vento, que era monitorada a cada 5 minutos, com um anemômetro de canecas, instalado a 2 m de altura, não excedeu 1,5 m $s^{-1}$.

Os valores de lâminas aplicadas foram utilizados para determinar, com auxílio do procedimento de cálculo descrito, as intensidades de precipitação de água do perfil radial de distribuição de água do aspersor para as duas condições operacionais ensaiadas no campo. Estes dois perfis radiais estimados foram comparados com os perfis radiais obtidos em laboratório.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o procedimento de cálculo descrito para a obtenção do perfil radial de distribuição de água, a partir das lâminas aplicadas por um aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação, foi desenvolvido, de modo a auxiliar o desenvolvimento de rotinas computacionais, o seguinte algoritmo:

ENTRADA: ângulo de giro ($\theta$), velocidade de deslocamento do aspersor (V), vetor distância ao carreador $\mathbf{d} = (d_1, d_2,..., d_N)^t$ e vetor lâmina aplicada $\mathbf{I} = (I_1, I_2,..., I_N)^t$

Passo *1*: Faça $T = \dfrac{WA(d_{(N)}, R, \beta) - WB(d_{(N)}, R)}{V}$ ; $i_{(N)} = \dfrac{I_{(N)}}{T}$

$r_{(N)} = dc(d_{(N)}, R)$ ; $x' = N$

$r_{(N+1)} = R$ ; $i_{(N+1)} = 0$

Passo *2*: Para j = 2,..., N siga os passos 3-7.

Passo *3*: Faça $r_{(x-1)} = dc(d_{(x'-1)}, d_{(x')})$

$d1 = WA(d_{(x'-1)}, d_{(x')}, \beta)$ ; $d2 = WB(d_{(x'-1)}, d_{(x')})$

$T = \dfrac{d1 - d2}{V}$ ; $I0 = 0$

Passo *4*: Para k = 1,..., j siga os passos 5-6.

Passo *5*: Se k = j

$dA = WA(d_{(x'-1)}, R, \beta)$ ; $dB = WB(d_{(x'-1)}, R)$

$T1 = \dfrac{(dA - d1) - (dB - d2)}{V}$

$I1 = i_{(N)} \cdot T1$ ; $I0 = I0 + I1$

Passo *6*: Se $k \neq j$

$dA = WA(d_{(x'-1)}, d_{((N+(k-j)+1))}, \beta)$ ;

$$dB = WB\left(d_{(x'-1)}, d_{((N+(k-j)+1))}\right)$$

$$T1 = \frac{(dA - d1) - (dB - d2)}{V}$$

$$I1 = i_{(N+(k-j))} \cdot T1 \quad ; \quad I0 = I0 + I1$$

$$d1 = dA \quad ; \quad d2 = dB$$

Passo *7*: Faça $x' = x' - 1$

$$i_{(x')} = \frac{I_{(x')} - I0}{T}$$

Passo *8*: Para j = 1,..., N Faça $i_{(j)} = i_{(j)} \cdot \frac{\theta}{360}$

Saída: vetor distância ao aspersor $\mathbf{r} = (r_1, r_2,..., r_{N+1})^t$ e vetor intensidade aplicada $\mathbf{i} = (i_1, i_2,..., i_N)^t$

O algoritmo descrito acima foi utilizado para desenvolver uma rotina computacional para a obtenção do perfil radial, a partir de ensaios de aspersores em equipamentos autopropelidos de irrigação, a qual foi incorporada ao aplicativo computacional Simulasoft (Prado, 2004). Conforme a Figura 9, esta rotina apresenta duas janelas, uma para a entrada de dados e outra apresentando o perfil radial de distribuição de água estimado. Na primeira janela (Figura 9a), o usuário deve entrar com os dados do ensaio de campo do aspersor operando no equipamento autopropelido, os quais são: i) aspersor; ii) bocais; iii) pressão de serviço; iv) ângulo do jato d'água; v) vazão; vi) velocidade; vii); ângulo de giro; viii) condições de vento (velocidade e direção); ix) número de linhas de coletores; x) espaçamento entre linhas de coletores; xi) número de coletores em cada lado da linha; xii) espaçamento entre coletores e xiii) valores de lâminas aplicadas. Com estes dados, o programa estima, apresenta e salva o perfil radial de distribuição de água do aspersor na segunda janela (Figura 9b).

No lado esquerdo da Figura 10 são mostradas as lâminas de irrigação geradas, para quatro ângulos de giro distintos, com auxílio do programa

Simulasoft, pelo perfil radial de distribuição de água, apresentado no lado direito da Figura 10 (linha vermelha), do aspersor Plona-RL250 (bocal = 20 x 6 mm e pressão = 490 kPa). Estes valores de lâminas aplicadas foram inseridos na rotina computacional (Figura 9) e foi determinado o perfil radial de distribuição de água do aspersor apresentado no lado direito da Figura 10 (linha azul).

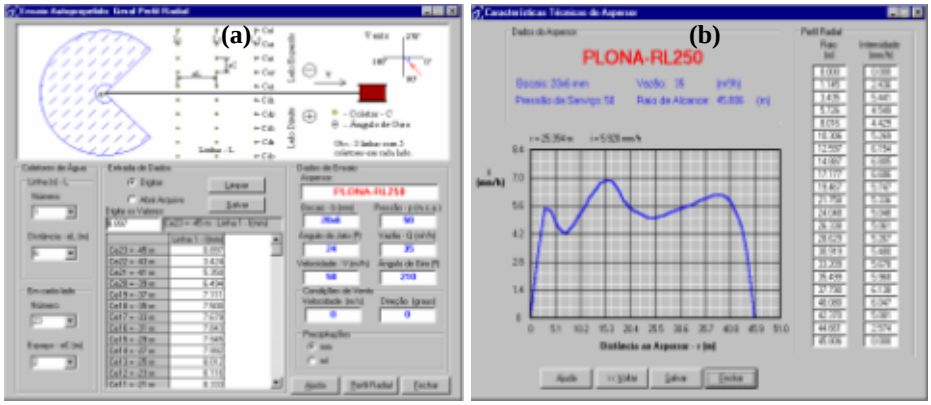


FIGURA 9 - Rotina computacional desenvolvida a partir do algoritmo descrito: (a) janela para entrada de dados e (b) janela com perfil radial de distribuição de água estimado.

Na Figura 10, observa-se que os valores de intensidade de precipitação do perfil radial de distribuição de água, gerado pelo algoritmo apresentado, são praticamente idênticos aos valores de intensidade de precipitação observados no perfil radial de distribuição de água determinado em laboratório. Esta similaridade mostra que a seqüência de cálculos apresentada no algoritmo é satisfatória para determinar o perfil radial de distribuição de água de qualquer aspersor a partir de ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação operando em baixas condições de vento.

No lado esquerdo da Figura 11 (linha vermelha) são apresentadas as lâminas aplicadas pelo aspersor Plona-RL250 acoplado em um sistema autopropelido de irrigação, obtidas nos ensaios de campo. No mesmo lado desta

figura (linha azul) também é mostrada a média das lâminas aplicadas, do lado direito com as do lado esquerdo, no carreador. A partir deste valor médio das lâminas aplicadas de ambos os lados do carreador, foi estabelecido o perfil radial de distribuição de água do aspersor, mostrado no lado direito da Figura 11 (linha azul), com auxílio da rotina computacional apresentada na Figura 9.

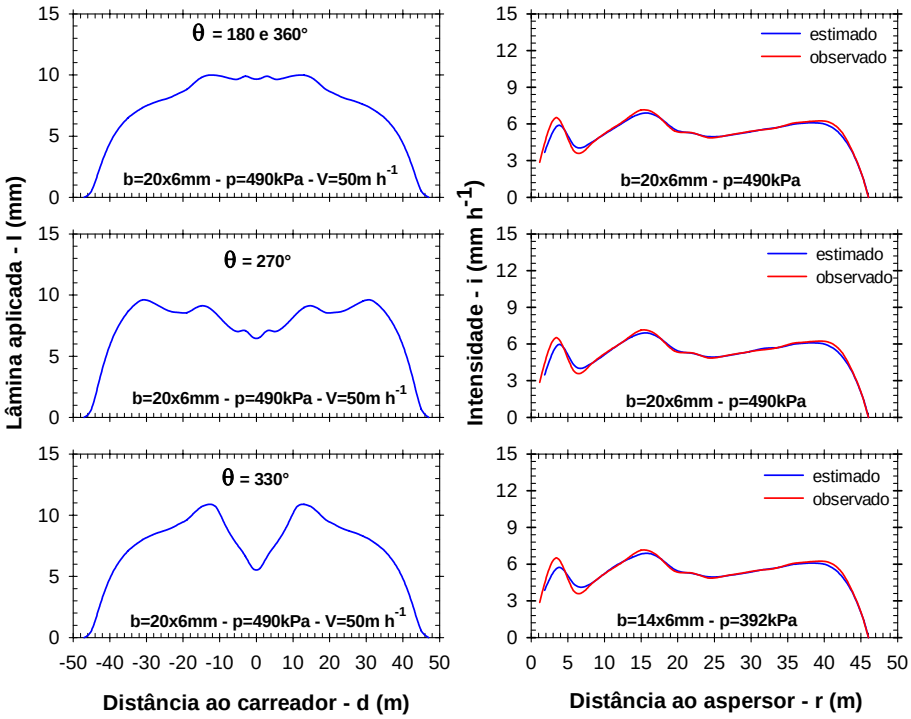


FIGURA 10 - Lâminas de irrigação geradas pelo Simulasoft com o perfil radial observado e perfil radial de distribuição de água observado e estimado com auxílio do algoritmo.

Na Figura 11, observa-se que o perfil radial de distribuição de água estimado a partir das lâminas aplicadas pelo aspersor, em um equipamento autopropelido de irrigação, apresenta boa semelhança com o perfil radial de distribuição de água obtido no ensaio de laboratório. Conforme Montero et al. (2001), estas diferenças nos valores de intensidades de precipitação de água,

entre o perfil radial estimado e observado em laboratório, são decorrentes de pequenas variações operacionais (pressão de serviço e velocidade de deslocamento do aspersor) e as condições climáticas de vento que não são absolutamente nulas.

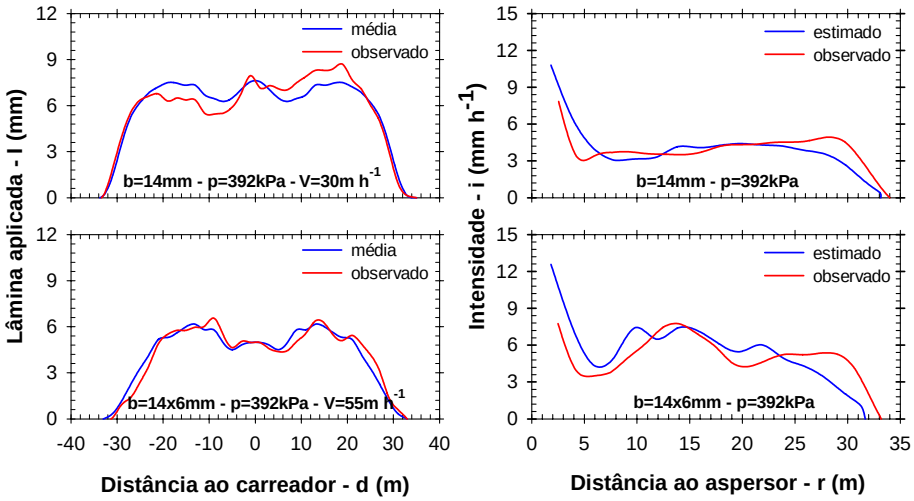


FIGURA 11 - Lâminas de irrigação aplicadas pelo aspersor Plona-RL250 acoplado em um sistema autopropelido de irrigação e perfis radiais de distribuição de água estimados e observados em laboratório.

Como apresentado na Figura 12, apesar das diferenças entre os valores de intensidades de precipitação dos perfis radiais obtidos em laboratório com os perfis radiais gerados pela rotina computacional, os valores de uniformidade de aplicação para sistemas autopropelidos de irrigação obedecem a uma mesma tendência. Prado (2004), na validação do aplicativo computacional Simulasoft, observou este mesmo comportamento entre os valores de uniformidade de aplicação de água, obtidos nas simulações digitais e nos ensaios de campo com sistemas autopropelidos de irrigação.

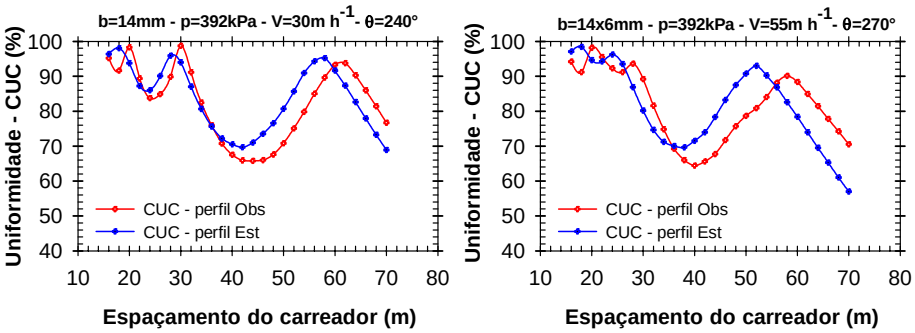


FIGURA 12 - Uniformidade de aplicação de água (coeficiente de Christiansen - CUC) obtida em simulações digitais com o perfil radial estimado pela rotina computacional e pelo perfil radial determinado em laboratório.

A obtenção dos perfis radiais de distribuição de água apresentados na Figura 11, a partir de ensaios de campo de sistemas autopropelidos de irrigação, sob baixas condições de vento, dispensa o uso de bancadas de ensaio de aspersores, as quais apresentam alto custo de instalação e manutenção. Por meio desses perfis radiais (Figura 11), o irrigante poderá otimizar, com auxílio de aplicativos computacionais, como o Simulasoft (Prado 2004) e Travgun (Newell et al., 2003), as melhores condições operacionais de ângulo de giro e espaçamento de carreador que promovam adequados valores de uniformidade de aplicação de água.

# 4 CONCLUSÕES

i) A rotina computacional apresentada é adequada para a obtenção do perfil radial de distribuição de água de aspersores a partir de ensaios de sistemas autopropelidos de irrigação.

ii) Ensaios de distribuição de água de aspersores em equipamentos autopropelidos, realizados obedecendo às normas técnicas e para baixas condições de velocidade do vento (menor que 0,9 m $s^{-1}$), podem ser utilizados para a obtenção do perfil radial de distribuição de água do aspersor.

# 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE Standard S330.1.** Procedure for sprinkler distribution testing research purposes. St. Joseph, 1987. p. 487-489.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa, MG: UFV, 2005. 611 p.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7749-2** Irrigation equipment - Rotating sprinkler. Part2: Uniformity of distribution and test methods. Switzerland. 1990. 6p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8224-1** Traveller irrigation machines. Part1: Operational characteristics and laboratory and field test methods. Switzerland. 2003. 36p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

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.

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.

NEWELL, G. F.; FOLEY, J.; SMITH, R. **TRAVGUN-Travelling Gun Simulation model user's manual:** version 1.1. Toowooba, QLD. Austrália, 2003. 91.p.

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

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

PRADO, G.; COLOMBO, A. Interpolação de perfis radiais de aplicação de água de aspersores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2005b.

PRADO, G.; COLOMBO, A.; BARRETO, A. C.; FARIA, L. C.; OLIVEIRA, H. F. E. Simulações digitais e ensaios de uniformidade de aplicação de água de equipamentos autopropelidos de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. **Anais...** Jaboticabal, SP: SBEA, 2007.

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

ROCHA, F. A.; PEREIRA, G. M.; ROCHA, F. S.; SILVA, J. O. Análise da uniformidade de distribuição de água de um equipamento autopropelido. **Irriga,** Botucatu, v. 10, n. 1, p. 96-106, jan./abr. 2005.

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.

SMITH, R.; BAILLE, C. GORDON, G. Performance of travelling gun irrigation machines. **Proc of the Australian Society Sugar Cane Technologists**, Sydney, v. 24, p. 235-240, 2002.

# CAPÍTULO 4

# AJUSTE DE PARÂMETROS PARA DISTORÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA APLICADA POR CANHÕES HIDRÁULICOS EM CONDIÇÕES DE VENTO - MÉTODO DA MALHA

## RESUMO

PRADO, Giuliani do. Ajuste de parâmetros para a distorção da distribuição de água aplicada por canhões hidráulicos em condições de vento - Método da malha. In: _____. **Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento.** 2008. Cap. 4, p. 61-95. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.[7]

Em condições de vento, a distribuição de água aplicada por sistemas de irrigação por aspersão, que operam com canhões hidráulicos, pode ficar comprometida. Vários procedimentos têm sido empregados para modelar a distribuição de água de aspersores em condições de vento. Na modelagem da distribuição de água de canhões hidráulicos, operando em condições de vento, os procedimentos empíricos oferecem melhores aproximações. Para a utilização desses procedimentos, é preciso ajustar os parâmetros do modelo às condições operacionais do equipamento. No modelo de Richards & Weatherhead (1993), a deriva e a redução no raio de alcance do aspersor devido ao vento são descritos por seis parâmetros. O objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo matemático e uma rotina computacional, escrita em *Visual Basic 6*, para o ajuste destes seis parâmetros a partir de ensaios de distribuição de água determinados em campo. Os dados de distribuição de água do aspersor Plona-RL250 operando em condições de vento, nas pressões de 392 e 490 kPa e com os bocais de 18 x 5 e 18 x 7 mm, foram utilizados para aplicação da rotina computacional desenvolvida. No ajuste dos parâmetros com a rotina computacional, verificou-se uma variação no desvio médio de 2,168 a 3,611 mm $h^{-1}$, entre os valores de intensidades de precipitação estimados e observados. A partir dos parâmetros estimados é possível simular a distribuição espacial de água do aspersor para qualquer direção de vento e para velocidades do vento que não excedam os valores nos quais os parâmetros foram determinados.

---

[7] Comitê Orientador: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Orientador) e Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

## CHAPTER 4

## ABSTRACT

PRADO, Giuliani do. Parameter adjustment for distortion of raingun water distribution under windy conditions - Full field method. In: _____. **Modeling gun sprinkler water application under different wind conditions.** 2008. Chap. 4, p. 61-95. Thesis (Doctor Science in Agricultural Engineering) - Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.[8]

In windy conditions, water distribution through sprinklers systems, which often employ rainguns, may be compromised. Several procedures have been used to model water distribution by rainguns in windy conditions. In these models, empirical procedures offer the best results. In order to use these empirical procedures, it is necessary to adjust the model parameters to the operational conditions of the equipment. In the Richard & Weatherhead (1993) model, drift and range shortening in the sprinkler due to wind is described by six parameters. We aimed to develop a mathematical model and a computational routine, written in *Visual Basic 6*, to adjust these parameters from data obtained in field tests of water distribution. To test the model and the application developed, data from field tests of the PLONA-RL250 operating in windy conditions with working pressures of 392 and 490 kPa and nozzle sizes of 18 x 5 mm and 18 x 7 mm were used. In the parameter adjustment done by the computational routine developed, variations between 2.168 and 3.611 mm $h^{-1}$ were observed when comparing the measured and the estimated values. It is important to note that from the estimated parameters, it is possible to simulated water distribution values for the sprinkler operating under any wind direction or speed, as long as the speed is lower than the speed used to determine said parameters.

[8] Guidance Commitee: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Major Professor) and Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

# 1 INTRODUÇÃO

A minimização das perdas econômicas está relacionada à uniformidade de aplicação de água pelo sistema, ao preço do produto e ao custo da irrigação. Para Paz et al. (2002) e Álvarez et al. (2004), sistemas de irrigação que não apresentam boa uniformidade de aplicação de água não são apropriados quando o objetivo é o máximo retorno econômico. Conforme esses autores, a irrigação com maior uniformidade de aplicação de água proporciona melhores resultados econômicos em qualquer combinação de preço do produto e custo da água.

A irrigação por aspersão figura como um dos métodos de irrigação mais empregados no Brasil, principalmente pela facilidade operacional que o método oferece. Atualmente, devido aos incentivos na utilização de biocombustíveis, o setor sucroalcooleiro tem apresentado grande expansão (Revista Item, 2006). Inserida neste contexto, a irrigação por aspersão, utilizando canhões hidráulicos, é uma prática intensamente empregada na cultura da cana-de-açúcar (Nunes et al., 2004).

A uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação que operam com canhões hidráulicos não é boa, especialmente em condições de vento intenso (Smith et al., 2002). Conforme Azevedo et al. (1999), esses sistemas de irrigação expõem o jato d'água a grandes alturas (>7 m em relação à superfície do solo), facilitando a distorção ocasionada pelo vento. Aliado a isso, condições operacionais inadequadas do sistema de irrigação contribuem para os baixos valores de uniformidade de aplicação de água (Prado & Colombo, 2005).

Normalmente, projetistas e usuários de sistemas de irrigação por aspersão, em condições de vento, reduzem, sem nenhum critério, o espaçamento entre aspersores. Esta redução no espaçamento entre aspersores implica em aumento nos custos de implantação, operacionais e nos custos totais do sistema de irrigação (Holzapfel et al., 2007). Para Playán et al. (2006) e Zapata et al.

(2007), há uma combinação ótima entre as condições operacionais e as condições ambientais, de modo a proporcionar adequados valores de uniformidade de aplicação de água. A determinação desta condição ótima de trabalho do sistema de irrigação pode ser estabelecida de forma mais precisa a partir de modelos de simulação previamente calibrados (Dechmi et al., 2003).

Durante a aplicação de água de um aspersor operando em condições de vento ocorre uma distorção na distribuição de água aplicada por este aspersor. Dessa forma, observa-se que, quando o jato do aspersor está na posição contra o vento, há maior resistência do ar e conseqüente redução do raio de alcance e, quando o jato do aspersor está na posição a favor do vento, a resistência do ar é menor e ocorre um ligeiro incremento no raio de alcance. Este mesmo tipo de interação também provoca decréscimo no raio de alcance do aspersor quando o jato está na posição perpendicular ao vento. Na literatura especializada existem procedimentos que envolvem a teoria balística (Vories et al., 1987; Seginer et al., 1992; Carrión et al.,2001; Montero et al.,2001) ou procedimentos empíricos (Richards & Weatherhead, 1993; Newell et al., 2003), ambos visando modelar essa distorção ocasionada pelo vento na distribuição espacial de água de aspersores (Granier et al., 2003).

A modelagem da distribuição espacial de água aplicada por canhões hidráulicos operando em condições de vento não é bem retratada ao utilizar a teoria balística (Richards & Weatherhead, 1993). O inadequado ajuste da teoria balística à distribuição espacial de água de canhões hidráulicos é devido ao fato de o modelo considerar que a maioria das gotas aplicadas se forma nas proximidades do bocal. No caso de canhões hidráulicos, as gotas d'água se formam ao longo do jato do aspersor, tornando-se necessária a utilização de procedimentos empíricos para simular a distorção causada pelo vento na distribuição espacial de água aplicada por esses aspersores.

Richards & Weatherhead (1993) descreveram um procedimento empírico para modelar a distorção ocasionada pelo vento na distribuição espacial de água de canhões hidráulicos. A utilização deste modelo está condicionada ao ajuste de seis parâmetros, que definem a deriva e a redução do raio de alcance pelo vento. Para o ajuste dos parâmetros, é necessária a realização de, pelo menos, três ensaios de campo (método da malha) de distribuição de água do aspersor (um sem vento e dois com vento). Este modelo foi aplicado com êxito nos trabalhos apresentados por Newell et al. (2003) e Granier et al. (2003).

No Brasil, com a crescente utilização de sistemas de irrigação que operam com canhões hidráulicos, principalmente na irrigação da cana-de-açúcar, há a necessidade do desenvolvimento de estratégias que visem melhorar a uniformidade de aplicação de água desses equipamentos. De modo a contribuir com melhoria da distribuição de água dos canhões hidráulicos, este trabalho tem por objetivos: i) descrever o modelo de ajuste numérico dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento, de Richards & Weatherhead (1993), visto que não há um procedimento numérico especifico para este fim; ii) desenvolver uma rotina computacional para ajustar os parâmetros de distorção ocasionados pelo vento e iii) aplicar a rotina computacional no ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento para ensaios de campo (método da malha) do aspersor Plona-RL250.

# 2 MATERIAL E MÉTODOS

## 2.1 Descrição do modelo

Na análise da distribuição de água de um aspersor operando em condições de vento, pelo modelo de Richards & Weatherhead (1993), é preciso conhecer os parâmetros (A, B, C, D, E e F) que definem a deriva ocasionada pelo vento (Dv) e a redução do raio de alcance ocasionado pelo vento (Ra).

Para a determinação desses parâmetros, é necessária a realização de ensaios de distribuição de água, em diferentes condições de vento (velocidade e direção) e nas condições operacionais de bocais e pressões de serviço que interessam. De acordo com Richards & Weatherhead (1993), é necessária a realização de, pelo menos, três ensaios de distribuição de água (um sem vento e dois com vento) para uma boa estimativa dos parâmetros que definem a deriva e a redução do raio de alcance devido ao vento. Também durante os ensaios de campo, os valores de velocidade e direção do vento, preferencialmente, não devem apresentar coeficiente de variação (CV) superior a 25% (Newell et al., 2003).

### 2.1.1 Posição dos pontos de amostragem de água

A distribuição de água de um aspersor operando isoladamente é analisada por uma série de pontos de amostragem (coletores de água) dispostos em torno do aspersor (Figura 13), caracterizando o método da malha. O número de coletores de água, na linha ($N_L$) e na coluna ($N_C$), necessários para representar a distribuição de água do aspersor, é dado por:

$$N_L = 2 \cdot \mathrm{Int}(\tau) + 4 \qquad \text{e} \qquad N_C = N_L$$
$$\text{sendo:} \quad \tau = \frac{R}{\Delta e} \tag{30}$$

em que $N_L$ é o número de coletores de água na linha; $N_C$ é o número coletores de água na coluna; R é o raio de alcance do aspersor (m); $\Delta e$ é o espaçamento entre pontos de amostragem (m) e Int($\tau$) é a função matemática que retorna a parte inteira de $\tau$.

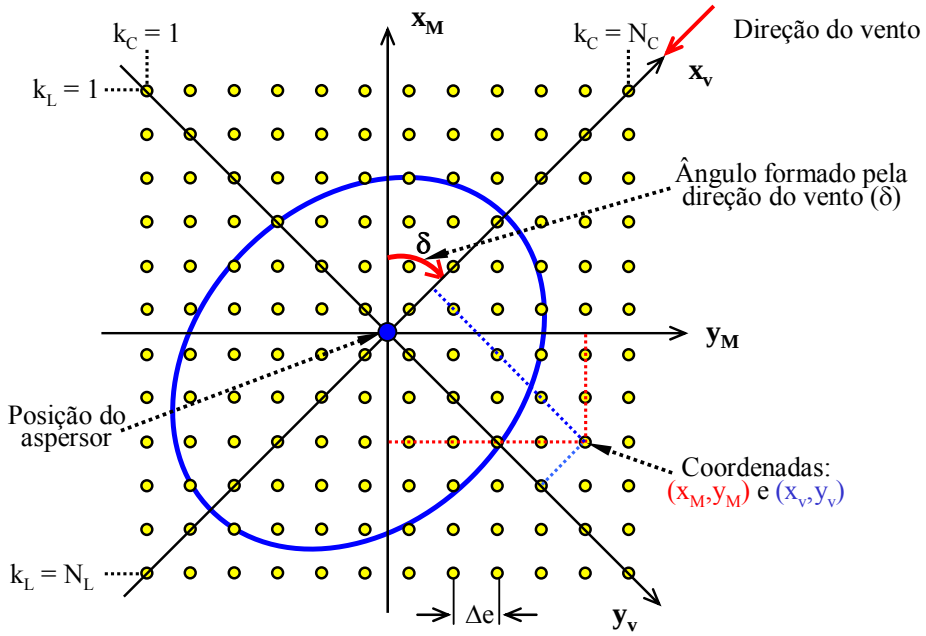


FIGURA 13 - Disposição dos pontos de amostragem para a determinação da distribuição de água de um aspersor operando isoladamente.

No campo de ensaios, conforme indicado na malha de coletores da Figura 13, os pontos de amostragem de água são dispostos em um sistema de coordenadas cartesianas ($x_M$, $y_M$). A coordenada "$x_M$", identificada pelo índice "$k_L$", é dada pela equação 31 e a coordenada "$y_M$", identificada pelo índice "$k_C$", é dada pela equação 32.

$$x_M = \left[\left(\frac{N_L}{2} - 0{,}5\right) - (k_L - 1)\right] \cdot \Delta e \qquad (31)$$

$$y_M = \left[\left(-\frac{N_C}{2} + 0{,}5\right) + \left(k_C - 1\right)\right] \cdot \Delta e \tag{32}$$

em que $x_M$ e $y_M$ são as coordenadas dos pontos de amostragem de água na malha de coletores (m).

A partir do ângulo ($\delta$ em graus) formado entre a direção predominante do vetor vento e o eixo $x_M$ da malha de coletores, é estabelecido um sistema de coordenadas cartesianas ($x_v$, $y_v$). Como mostrado na Figura 13, nesse sistema de coordenadas cartesianas, o eixo "$x_v$" é alocado de forma a coincidir com a direção predominante do vetor vento e o eixo "$y_v$" é alocado perpendicularmente em relação à direção predominante do vetor vento. Dessa forma, a posição em relação ao aspersor das coordenadas "$x_v$" e "$y_v$" do sistema cartesiano são determinadas por:

$$x_v = x_M \cdot \cos(\delta) + y_M \cdot \text{sen}(\delta) \tag{33}$$

$$y_v = y_M \cdot \cos(\delta) - x_M \cdot \text{sen}(\delta) \tag{34}$$

em que $x_v$ e $y_v$ são as coordenadas dos pontos de amostragem de água originadas em função da direção do vento (m).

Conhecendo-se as coordenadas "$x_v$" e "$y_v$" de cada coletor em relação ao aspersor, na condição de vento, é possível determinar às coordenadas "$x_{v0}$" e "$y_{v0}$" de cada coletor, na condição da ausência de vento. Essa determinação pode ser efetuada de maneira iterativa pelo método de Newton (Burden & Faires, 2003) por meio das equações 3 e 4, que estabelecem, respectivamente, as coordenadas "$x_v$" e "$y_v$", as quais podem ser reescritas por:

- sendo: $\cos(\phi) = \frac{x_{v0}}{r}$, tem-se:

$$x_v = x_{v0} - \left[ A + B \cdot \left(\frac{r}{R}\right) + C \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \cdot v - \ldots$$
$$\ldots - \left[ D \cdot \left(\frac{r}{R}\right) + E \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 + F \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 \right] \cdot \frac{x_{v0}}{r} \cdot S \cdot v \qquad (35)$$

- sendo: $\text{sen}(\phi) = \frac{y_{v0}}{r}$, tem-se:

$$y_v = y_{v0} - \left[ D \cdot \left(\frac{r}{R}\right) + E \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 + F \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 \right] \cdot \frac{y_{v0}}{r} \cdot S \cdot v \qquad (36)$$

$$sendo: \quad S = \frac{\sqrt{sen^2(\alpha) \cdot x_{v0}^{\ 2} + y_{v0}^{\ 2}}}{r} \quad \text{e} \quad r = \sqrt{x_{v0}^{\ 2} + y_{v0}^{\ 2}}$$

em que v é a velocidade do vento (m $s^{-1}$); r é a distância radial do coletor ao aspersor (m); $x_{v0}$ e $y_{v0}$ são as coordenadas para vento igual a zero (m); S é o seno do ângulo entre o vetor velocidade do vento e a direção do jato do aspersor; $\alpha$ é o ângulo de lançamento do jato d'água do aspersor (º); A, B e C são constantes de ajuste da expressão que representa a deriva causada pelo vento (s) e D, E e F são constantes de ajuste da expressão que representa a redução do raio de alcance causada pelo vento (s).

Para a estimativa das coordenadas "$x_{v0}$" e "$y_{v0}$", pelo método iterativo de Newton, as equações 35 e 36 são reescritas da seguinte forma:

$$fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ x_{v0} - \left[ A + B \cdot \left(\frac{r}{R}\right) + C \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \cdot v - \ldots \right.$$
$$\left. \ldots - \left[ D \cdot \left(\frac{r}{R}\right) + E \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 + F \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 \right] \cdot \frac{x_{v0}}{r} \cdot S \cdot v \right\} - x_v \qquad (37)$$

$$fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ y_{v0} - \left[ D \cdot \left(\frac{r}{R}\right) + E \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 + F \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 \right] \cdot \frac{y_{v0}}{r} \cdot S \cdot v \right\} - y_v \qquad (38)$$

Ao calcular inicialmente os valores de $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ e $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ com um valor inicial para as coordenadas "$x_{v0}$" ($x_{v0}^{(0)} = x_v$) e "$y_{v0}$" ($y_{v0}^{(0)} = y_v$) e não encontrar valores suficientemente próximos de zero, calcula-se o valor dos fatores de correção "$\Delta x_{v0}$" e "$\Delta y_{v0}$" que devem ser adicionados, respectivamente, aos valores atuais de "$x_{v0}$" e "$y_{v0}$".

A determinação dos fatores de correção "$\Delta x_{v0}$" e "$\Delta y_{v0}$", calculados com base em aproximações de $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ e $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$, é efetuada de acordo com a série de Taylor truncada (Burden & Faires, 2003), sendo dada por:

$$fx_{v0}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0}) + \ldots$$
$$\ldots + \left[\Delta x_{v0} \cdot \left(\frac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}}\right) + \Delta y_{v0} \cdot \left(\frac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}\right)\right]$$

$$fy_{v0}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0}) + \ldots$$
$$\ldots + \left[\Delta x_{v0} \cdot \left(\frac{\partial fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}}\right) + \Delta y_{v0} \cdot \left(\frac{\partial fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}\right)\right]$$

Na aproximação acima, assumindo-se que os valores de "$\Delta x_{v0}$" e "$\Delta y_{v0}$" são suficientes para resultar em $fx_{v0}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = 0$ e $fy_{v0}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = 0$, tem-se:

$$\Delta x_{v0} \cdot \left(\frac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}}\right) + \Delta y_{v0} \cdot \left(\frac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}\right) = -fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$$

$$\Delta x_{v0} \cdot \left(\frac{\partial fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}}\right) + \Delta y_{v0} \cdot \left(\frac{\partial fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}\right) = -fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$$

Em termos de álgebra matricial, os valores de "$\Delta x_{v0}$" e "$\Delta y_{v0}$" são calculados como:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} & \dfrac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \\ \dfrac{\partial fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} & \dfrac{\partial y_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{v0} \\ \Delta y_{v0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0}) \\ -fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0}) \end{bmatrix} \quad (39)$$

em que $\Delta x_{v0}$ é o fator de correção para $x_{v0}$ (m) é $\Delta y_{v0}$ o fator de correção para $y_{v0}$ (m).

No caso específico das funções $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ e $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$, os elementos da matriz jacobiana acima são computados pelas seguintes expressões:

- derivada de $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ em relação $x_{v0}$:

$$\frac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} = 1 - \frac{x_{v0} \cdot v}{R} \cdot \left\{ \left( \frac{B}{r} + \frac{2 \cdot C}{R} \right) + \left( \frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S \cdot x_{v0} + \ldots \right.$$
$$\left. \ldots + \left[ \left( \frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{x_{v0} \cdot \operatorname{sen}^2(\alpha)}{S} \right] + \left[ D + E \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot \frac{S}{x_{v0}} \right\} \tag{40}$$

- derivada de $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ em relação $y_{v0}$:

$$\frac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} = -\frac{y_{v0} \cdot v}{R} \cdot \left[ \left( \frac{B}{r} + \frac{2 \cdot C}{R} \right) + \left( \frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S \cdot x_{v0} + \ldots \right.$$
$$\left. \ldots + \left( \frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{x_{v0}}{S} \right] \tag{41}$$

- derivada de $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ em relação $x_{v0}$:

$$\frac{\partial fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} = -\frac{x_{v0} \cdot y_{v0} \cdot v}{R} \cdot \left[ \left( \frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S + \ldots \right.$$
$$\left. \ldots + \left( \frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{\operatorname{sen}^2(\alpha)}{S} \right] \tag{42}$$

- derivada de $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ em relação $y_{v0}$:

$$\frac{\partial fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} = 1 - \frac{y_{v0} \cdot v}{R} \cdot \left\{ \left( \frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S \cdot y_{v0} + \ldots \right.$$
$$\left. \ldots + \left( \frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{y_{v0}}{S} + \left[ D + E \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot \frac{S}{y_{v0}} \right\} \tag{43}$$

A resolução do sistema de equações apresentado na expressão 39 pode ser realizada pela Regra de Cramer. Esta resolução, para encontrar os incrementos dos fatores de correção, "$\Delta x_{v0}$" e "$\Delta y_{v0}$", é efetuada por um número

de até 20 iterações, ou de modo que a soma algébrica dos valores absolutos das funções $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ e $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ assumam valores suficientemente próximos de zero (<0,01). Dessa forma, os novos valores das coordenadas "$x_{v0}$" e "$y_{v0}$" serão dados por:

$$x_{v0}^{(k'+1)} = x_{v0}^{(k')} + \Delta x_{v0} \tag{44}$$

$$y_{v0}^{(k'+1)} = y_{v0}^{(k')} + \Delta y_{v0} \tag{45}$$

em que k' é o índice que identifica a iteração.

### 2.1.2 Ajuste dos parâmetros de distorção

No ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), que definem a deriva ocasionada pelo vento (Dv) e a redução do raio de alcance ocasionado pelo vento (Ra), é utilizado o método dos mínimos quadrados. Dessa forma, é preciso estabelecer uma função (função objetivo) da diferença ao quadrado dos valores de intensidade de precipitação determinados nos ensaios distribuição de água no campo, menos os valores de intensidade de precipitação estimados pelo modelo. Assim, a função que objetiva ajustar os parâmetros (A, B, C, D, E e F) do modelo de Richards & Weatherhead (1993) é dada por:

$$\begin{gathered} g(\mathbf{x}) = \sum_{k_E=1}^{N_E}\sum_{k_C=1}^{N_C}\sum_{k_L=1}^{N_L}\left(i'_{k_E k_C k_L} - \hat{i}_{k_E k_C k_L}\right)^2 \\ \text{sendo: } \hat{i}_{k_E k_C k_L} = \frac{i_0}{\dfrac{\partial x_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} \cdot \dfrac{\partial y_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}} \end{gathered} \tag{46}$$

em que g(**x**) é a função objetivo $(mm^1\ h^{-1})^2$; **x** = ($x_1$ = A, $x_2$ = B, $x_3$ = C, $x_4$ = D, $x_5$ = E, $x_6$ = F)$^t$ é o vetor que contém os parâmetros de ajuste; $i'_{k_E k_C k_L}$ é a intensidade de precipitação corrigida determinada no ensaio de campo (mm $h^{-1}$); $\hat{i}_{k_E k_C k_L}$ é a intensidade de precipitação estimada pelo modelo (mm $h^{-1}$); $i_0$ é a intensidade de precipitação na ausência de vento, obtida no perfil radial de

distribuição de água do aspersor (mm $h^{-1}$); $k_E$ é o índice que identifica o número do ensaio; $N_E$ é a quantidade de ensaios de distribuição de água; $\frac{\partial x_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}}$ é a derivada parcial da equação 35, que é calculada pela equação 40 e $\frac{\partial y_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}$ é a derivada parcial da equação 36, que é calculada pela equação 43.

Nos ensaios de distribuição de água no campo sempre há uma perda de água por evaporação e arraste. Richards & Weatherhead (1993) e Granier et al. (2003) comentam que, para canhões hidráulicos, esta perda é pequena e pode ser negligenciada. Entretanto, para que não haja problemas volumétricos, os valores de intensidades de precipitação observados em cada ensaio de distribuição de água no campo, e utilizados na expressão 46, são corrigidos por:

$$\begin{aligned} & i'_{k_E k_C k_L} = i_{k_E k_C k_L} \cdot \frac{Q_{a+p}}{Q_E} \\ & \text{sendo: } Q_E = \sum_{k_C=1}^{N_C} \sum_{k_L=1}^{N_L} \left( \frac{i_{k_E k_C k_L} \cdot \Delta e^2}{1000} \right) \\ & \text{com: } 1 \le k_E \le N_E \ ; \ 1 \le k_C \le N_C \ ; \ 1 \le k_L \le N_L \end{aligned} \tag{47}$$

em que $i_{k_E k_C k_L}$ é a intensidade de precipitação observada no ensaio de distribuição de água no campo (mm $h^{-1}$); $Q_{a+p}$ é a vazão do conjunto de bocais auxiliar e principal do aspersor ($m^3$ $h^{-1}$) e $Q_E$ é a vazão determinada no ensaio de distribuição de água no campo ($m^3$ $h^{-1}$).

Para o ajuste dos seis parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção ocasionada pelo vento serão utilizados dois métodos: i) método das estimativas descendentes, para uma estimativa inicial dos valores de A, B, C, D, E e F e ii) método de Newton para sistemas de equações não lineares, para estimativa final dos parâmetros de ajuste.

#### 2.1.2.1 Método das estimativas descendentes

Segundo Bez (2005), este método é classificado como um método de primeira ordem, em que é avaliada apenas a derivada primeira da função. Dessa forma, o método apresenta uma convergência linear para uma solução, mas, em geral, sempre haverá uma convergência, mesmo quando as aproximações iniciais forem pobres. A partir desta aproximação inicial dos parâmetros de ajuste, é possível aplicar o método de Newton com uma maior garantia de que haverá convergência para um valor mínimo da função objetivo.

Para aplicação do método das estimativas descendentes, inicialmente, são efetuadas duas estimativas da função objetivo: uma com os parâmetros (A, B, C, D, E e F) obtidos por Richards & Weatherhead (1993) e outra com os parâmetros (A, B, C, D, E e F) obtidos por Granier et al. (2003). Dessa forma, os parâmetros escolhidos para iniciar o processo de cálculos são aqueles que proporcionam o menor valor da função objetivo.

Segundo Burden & Faires (2003), uma função diferenciável de uma só variável pode apresentar um mínimo relativo somente quando a derivada for igual a zero. Conforme esses autores, ao estender esse resultado a funções multivariáveis, o gradiente da função objetivo será dado por:

$$\nabla g\left(\mathbf{x}^{(k')}\right) = \left( 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial A}, 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial B}, 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial C}, \right.$$
$$\left. 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial D}, 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial E}, 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial F}, \right)^t \qquad (48)$$
$$\text{fazendo : } \nabla g\left(\mathbf{x}^{(k')}\right) = \mathbf{z} = \left(z_A, z_B, z_C, z_D, z_E, z_F\right)^t$$

em que $\nabla g\left(\mathbf{x}^{(k')}\right)$ é o gradiente da função e $\mathbf{z} = (z_A, z_B, z_C, z_D, z_E, z_F)^t$ é o vetor que contém os valores de gradiente da função.

As derivadas da função objetivo em relação aos parâmetros (A, B, C, D, E, F), apresentadas acima, são resolvidas numericamente com a série de Taylor

truncada. Essa resolução, para a obtenção da derivada primeira, é chamada de fórmula dos três pontos. Dessa forma, considerando um valor de delta (Δ) igual a 0,001, as derivadas primeiras da função objetivo, em relação aos parâmetros, são aproximadas por:

$$\frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial x_{i'}} \approx \frac{g(\mathbf{x} + e_{i'}\Delta) - g(\mathbf{x} - e_{i'}\Delta)}{2 \cdot \Delta} \quad \text{com}: \quad 1 \leq i' \leq 6 \tag{49}$$

em que $e_{i'}$ é o vetor cuja única entrada diferente de zero é um valor 1 na i'-ésima coordenada.

De acordo Burden & Faires (2003), é necessário mensurar a distância entre vetores n-dimensionais de coluna para determinar o quanto uma seqüência de vetores converge para uma solução do sistema. Dessa forma, a distância dos valores do vetor **z** em relação à origem será dada por:

$$\|\mathbf{z}\|_2 = z_0 = \sqrt{z_A{}^2 + z_B{}^2 + z_C{}^2 + z_D{}^2 + z_E{}^2 + z_F{}^2} \tag{50}$$

em que, $\|\mathbf{z}\|_2$ é a norma euclidiana do vetor **z**.

Dessa maneira, os valores do vetor **z**, que representam o gradiente da função objetivo, serão dados por:

$$\frac{\mathbf{z}}{z_0} = \left( \frac{z_A}{z_0}, \frac{z_B}{z_0}, \frac{z_C}{z_0}, \frac{z_D}{z_0}, \frac{z_E}{z_0}, \frac{z_F}{z_0} \right)^t \tag{51}$$

Com o objetivo de reduzir a função g(**x**) para um valor mínimo, uma estimativa apropriada de $\mathbf{x}^{(k1+1)}$ é dada por:

$$\mathbf{x}^{(k'+1)} = \mathbf{x}^{(k')} - \sigma \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0} \quad \text{para qualquer constante } \sigma > 0 \tag{52}$$

Como apresentado na expressão 52, para a determinação do valor de $\mathbf{x}^{(k1+1)}$, um valor de "σ" deve ser escolhido. Para encontrar um valor de "σ" que proporcione um valor mínimo da função, são definidos dois valores de "σ": $\sigma_1 = 0$; $\sigma_2 = 1$. Calculando-se a função (g(**x**)) com esses valores de "σ", a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_2 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) < g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_1 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right)$$

Caso a condição acima não seja satisfeita, a seguinte seqüência de cálculos é efetuada para encontrar $\sigma_2$:

$$\sigma_2 = \begin{cases} \text{Enquanto}: \; g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_2 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) \geq g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_1 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) \\ \text{Faça}: \; \sigma_2 = \frac{\sigma_2}{2} \end{cases} \tag{53}$$

Ao determinar a função (g(**x**)) com os valores de "$\sigma_1$", "$\sigma_2$" e um terceiro ponto ($\sigma_2/2$) é possível construir um polinômio interpolador quadrático. Derivando-se esse polinômio quadrático, em função de "$\sigma$", o ponto de mínima ou máxima, para um valor de "$\sigma$" é dado por:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_2}{2} \cdot \left[ \frac{1}{2} - \frac{g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \frac{\sigma_2 \cdot \mathbf{z}}{2 \cdot z_0}\right) - g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_1 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right)}{g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_2 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) - 2 \cdot g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \frac{\sigma_2 \cdot \mathbf{z}}{2 \cdot z_0}\right) + g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_1 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right)} \right] \tag{54}$$

Como a função g(x), calculada com o valor "$\sigma_0$", pode apresentar o ponto de mínima ou de máxima da função, o valor de "$\sigma$" será dado por:

$$\sigma = \begin{cases} \text{se}: \; g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_0 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) \leq g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_2 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) \;\rightarrow\; \sigma = \sigma_0 \\ \text{se}: \; g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_0 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) > g\left(\mathbf{x}^{(k')} - \sigma_2 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) \;\rightarrow\; \sigma = \sigma_2 \end{cases} \tag{55}$$

Desse modo, a estimativa apropriada dos parâmetros (A, B, C, D, E, F) pode ser determinada por:

$$A^{(k'+1)} = A^{(k')} - \sigma \cdot \frac{z_A}{z_0} \tag{56}$$

$$B^{(k'+1)} = B^{(k')} - \sigma \cdot \frac{z_B}{z_0} \tag{57}$$

$$C^{(k'+1)} = C^{(k')} - \sigma \cdot \frac{z_C}{z_0} \tag{58}$$

$$D^{(k'+1)} = D^{(k')} - \sigma \cdot \frac{z_D}{z_0} \tag{59}$$

$$E^{(k'+1)} = E^{(k')} - \sigma \cdot \frac{z_E}{z_0} \tag{60}$$

$$F^{(k'+1)} = F^{(k')} - \sigma \cdot \frac{z_F}{z_0} \tag{61}$$

O procedimento de cálculo descrito acima, para encontrar uma estimativa inicial dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), é efetuado por um número de até 20 iterações ou de modo que a função objetivo assuma um valor próximo a zero (<0,01).

#### 2.1.2.2 Método de Newton

No emprego do método de Newton para solucionar problemas de otimização de variáveis, é necessária a avaliação da derivada segunda da função (Šimùnek & Hopmans, 2002). Dessa forma, segundo Bez (2005), este método é classificado como um método de segunda ordem, apresentando uma convergência quadrática para a solução do problema.

De acordo com Šimùnek & Hopmans (2002), o método das estimativas descendentes é adequado para uma estimativa inicial das variáveis, entretanto, exige um número grande de iterações quando o problema se aproxima de uma solução. Dessa forma, a partir da aproximação inicial dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), efetuada com o método das estimativas descendentes, será utilizado o método de Newton para uma aproximação mais apropriada dos parâmetros.

Para aplicação do método de Newton, no ajuste dos seis parâmetros de distorção ocasionada pelo vento (A, B, C, D, E e F), é necessário desenvolver seis expressões. Essas seis expressões são obtidas derivando-se a função objetivo, em relação aos parâmetros de ajuste (A, B, C, D, E e F), por:

$$f_{i'} = \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial x_{i'}} \approx \frac{g(\mathbf{x} + e_{i'}\Delta) - g(\mathbf{x} - e_{i'}\Delta)}{2 \cdot \Delta} \qquad (62)$$

$$\text{com}: \quad 1 \le i' \le 6 \quad ; \quad \Delta = 0{,}001$$

Ao calcular inicialmente os valores das seis funções, representadas na expressão 62, com o valor inicial dos parâmetros de ajuste e não encontrar valores suficientemente próximos de zero, calculou-se o valor dos fatores de correção "ΔA", "ΔB", "ΔC", "ΔD", "ΔE" e "ΔF" que devem ser adicionados, respectivamente, aos valores atuais de "A", "B", "C", "D", "E" e "F".

A determinação dos fatores de correção "ΔA", "ΔB", "ΔC", "ΔD", "ΔE" e "ΔF", calculados com base em aproximações das seis funções, dadas na expressão 62, é efetuada de acordo com a série de Taylor. Assumindo que os valores dos fatores de correção dos parâmetros de ajuste (A, B, C, D, E e F) são suficientes para resultar em:

$$f_1(A + \Delta A, B + \Delta B, C + \Delta C, D + \Delta D, E + \Delta E, F + \Delta F) = 0$$
$$f_2(A + \Delta A, B + \Delta B, C + \Delta C, D + \Delta D, E + \Delta E, F + \Delta F) = 0$$
$$f_3(A + \Delta A, B + \Delta B, C + \Delta C, D + \Delta D, E + \Delta E, F + \Delta F) = 0$$
$$f_4(A + \Delta A, B + \Delta B, C + \Delta C, D + \Delta D, E + \Delta E, F + \Delta F) = 0$$
$$f_5(A + \Delta A, B + \Delta B, C + \Delta C, D + \Delta D, E + \Delta E, F + \Delta F) = 0$$
$$f_6(A + \Delta A, B + \Delta B, C + \Delta C, D + \Delta D, E + \Delta E, F + \Delta F) = 0$$

Dessa forma, em termos de álgebra matricial, os valores de "ΔA", "ΔB", "ΔC", "ΔD", "ΔE" e "ΔF" podem ser calculados por:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta A \\ \Delta B \\ \Delta C \\ \Delta D \\ \Delta E \\ \Delta F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1(\mathbf{x}) \\ -f_2(\mathbf{x}) \\ -f_3(\mathbf{x}) \\ -f_4(\mathbf{x}) \\ -f_5(\mathbf{x}) \\ -f_6(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (63)$$

No caso específico, os elementos da matriz jacobiana (**J(x))** acima, identificados pelos índices i' e j', são computados numericamente, com um valor de delta (Δ) igual a 0,001, pelas expressões:

- para elementos da matriz jacobiana (**J(x))** com índices i' = j':

$$\frac{\partial f_{i'}(\mathbf{x})}{\partial x_{i'}} \approx \frac{g(\mathbf{x}+e_{i'}\Delta)-2\cdot g(\mathbf{x})+g(\mathbf{x}-e_{i'}\Delta)}{\Delta^2} \qquad \text{com}: 1 \le i' \le 6 \quad (64)$$

- para elementos da matriz jacobiana (**J(x))** com índices i' ≠ j':

$$\frac{\partial f_{i'}(\mathbf{x})}{\partial x_{j'}} \approx \frac{g(\mathbf{x}+e_{i'}\Delta+e_{j'}\Delta)-g(\mathbf{x}-e_{i'}\Delta+e_{j'}\Delta)-[g(\mathbf{x}+e_{i'}\Delta-e_{j'}\Delta)-g(\mathbf{x}-e_{i'}\Delta-e_{j'}\Delta)]}{4\cdot\Delta^2} \quad (65)$$

$$\text{com:} \quad 1 \le i' \le 6 \quad ; \quad 1 \le j' \le 6$$

em que **e** é o vetor cuja única entrada diferente de zero é um valor 1 na i'-ésima ou j'-ésima coordenada.

A matriz jacobiana, apresentada na expressão 63, é uma matriz simétrica com elementos da diagonal principal diferentes de zero. Assim, é necessário calcular, somente, os elementos da diagonal principal, pela equação 64, e os elementos acima da diagonal principal, pela equação 65, visto que os valores dos elementos de cada i' coluna são iguais aos valores dos elementos de cada i' linha.

A resolução do sistema de equações apresentado na expressão 63 é dada pela fatoração $LDL^t$ (Burden & Faires, 2003). Esta resolução, para encontrar os fatores de correção, "ΔA", "ΔB", "ΔC", "ΔD", "ΔE" e "ΔF", é efetuada por um número de até 10 iterações, ou de modo que a função objetivo assuma um valor próximo a zero (<0,001). Dessa forma, os valores dos parâmetros "A", "B", "C", "D", "E" e "F" serão determinados por:

$$A^{(k'+1)} = A^{(k')} + \Delta A \tag{66}$$

$$B^{(k'+1)} = B^{(k')} + \Delta B \tag{67}$$

$$C^{(k'+1)} = C^{(k')} + \Delta C \tag{68}$$

$$D^{(k'+1)} = D^{(k')} + \Delta D \tag{69}$$

$$E^{(k'+1)} = E^{(k')} + \Delta E \tag{70}$$

$$F^{(k'+1)} = F^{(k')} + \Delta F \tag{71}$$

Para os valores estimados dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), o desvio médio entre os valores de intensidade de precipitação estimada ($\hat{i}_{k_E k_C k_L}$) e observada ($i'_{k_E k_C k_L}$) é dado por:

$$D_M = \sqrt{\frac{g(A, B, C, D, E, F)}{N_V}} \tag{72}$$

em que $D_M$ é o desvio médio dos valores de intensidades de precipitação estimadas e observadas (mm $h^{-1}$) e $N_V$ é o número de valores na qual a diferença ao quadrado dos valores de intensidades de precipitação estimadas e observadas é maior que zero.

## 2.2 Aplicação do modelo matemático

O modelo matemático descrito foi aplicado aos ensaios de distribuição de água do aspersor Plona-RL250 operando com os bocais 18 x 5 mm e 18 x 7

mm, sob as pressões de serviço de 392 e 490 kPa. Esses ensaios foram realizados nas condições sem e com vento.

Os ensaios de distribuição de água (perfil radial de distribuição de água), em condições de ausência de vento (ventos menores que 0,9 m $s^{-1}$), foram determinados na bancada de ensaios de aspersores da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, de acordo com o procedimento descrito por Prado & Colombo (2005).

Para a determinação da distribuição de água, em condições de vento, foram realizados dois ensaios para cada condição operacional do aspersor, no Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) de Uberaba, MG, em uma área aberta, com declividade de 2%. Nesta área, ilustrada na Figura 14, foi disposta uma malha de coletores plásticos, com 8 cm de diâmetro, espaçados em 6 m, em torno do aspersor. Em cada linha da malha, 16 coletores foram dispostos perpendicularmente ao sentido da declividade e em cada coluna da malha 16 coletores foram dispostos no sentido da declividade. A área de captação desses coletores foi mantida em nível, a uma distância média de 40 cm da superfície do solo.

Na realização dos ensaios de distribuição de água no campo, por um período de tempo de uma hora, a pressão de operação, medida na base do aspersor, era monitorada a cada 10 minutos (Figura 14) e as condições de velocidade média e direção do vento eram monitoradas a cada 5 minutos, com um anemômetro de canecas, instalado a 2 m de altura do solo.

FIGURA 14 - Ensaios de distribuição de água do aspersor Plona-RL250 operando isoladamente em condições de vento.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1 Rotina computacional

Na Figura 15 é mostrada a rotina computacional desenvolvida, em *Visual Basic 6* e incorporada ao Simulasoft (Prado, 2004) para ajustar os parâmetros de vento (A, B, C, D, E e F) do modelo de Richards & Weatherhead (1993). Como mostrado na Figura 15a, na janela inicial da rotina computacional, é necessário definir as condições operacionais do aspersor. Para os aspersores Plona RL250, RL300 e RL400, ao selecionar-se a combinação de pressão de serviço e bocais, o programa apresenta os dados técnicos de vazão, raio de alcance, intensidade de precipitação média e perfil radial de distribuição de água do aspersor operando na ausência de vento. Nessa janela também é necessário assinalar o número de ensaios (um, dois ou três) de distribuição de água realizados com o aspersor operando em condições de vento.

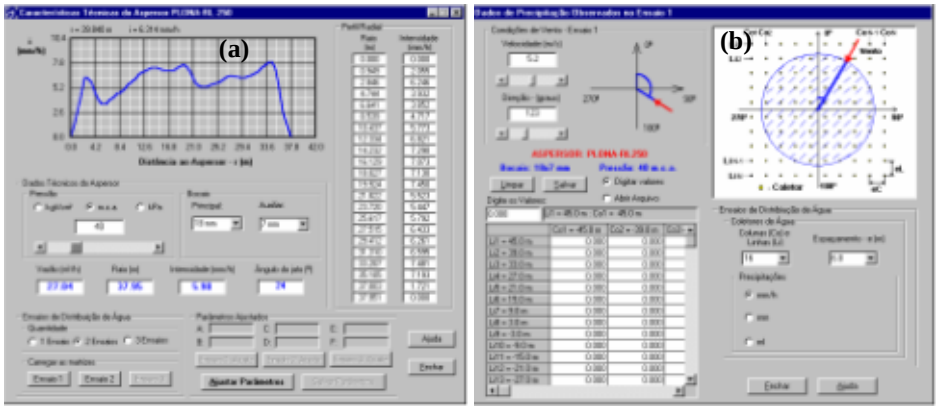


FIGURA 15 - Telas da rotina computacional para entrada de dados: (a) dados técnicos do aspersor e ajustes dos parâmetros de vento; (b) dados dos ensaios de distribuição de água em condições de vento.

Ao definir o número de ensaios de distribuição de água realizados em condições de vento (Figura 15a), na tela seguinte (Figura 15b), dá-se a entrada

dos valores médios de velocidade e direção do vento e dos valores de precipitação observados nos ensaios de campo. A entrada desses valores pode ser por meio de digitação ou de abertura de arquivo, que deve estar na extensão *.TXT, separado por tabulações.

Com os dados de ensaio de distribuição de água determinados em condições de vento, o programa determina os valores dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) minimizando a diferença entre os valores de intensidades de precipitação estimadas e observadas. Os valores de intensidades de precipitação estimados e observados são apresentados graficamente, conjuntamente com o desvio médio das estimativas (Figura 16). O programa também apresenta os valores numéricos de intensidades de precipitação estimadas, caso seja uma opção do usuário.

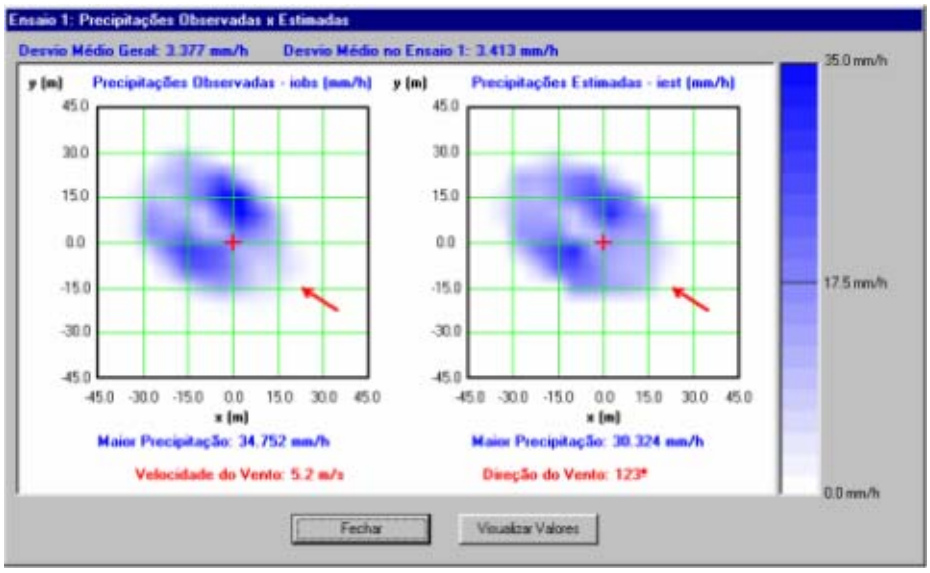


FIGURA 16 - Apresentação gráfica do ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento.

Os parâmetros ajustados, para combinação de bocal e pressão de serviço do aspersor, podem ser salvos e utilizados no Simulasoft (Prado, 2004) para simulação da distribuição espacial de água do aspersor operando em sistemas autopropelidos de irrigação. Dessa forma, é possível estabelecer, de modo a maximizar a uniformidade de aplicação de água, as melhores condições operacionais de ângulo de giro e espaçamento entre carreadores para as condições de vento predominantes na região.

## 3.2 Ajuste dos parâmetros

As formas geométricas dos perfis radiais de distribuição de água obtidas em laboratório na condição de ausência de vento são apresentadas na Figura 17. Esses perfis radiais foram determinados para as mesmas combinações de bocais e pressão de serviço utilizadas nos ensaios de distribuição de água no campo em condições de vento.

Os perfis radiais apresentados na Figura 17 assemelham-se aos perfis radiais E e F descritos por Christiansen (1942). Segundo Kincaid (1991) e Montero et al. (2003), aspersores que apresentam perfil radial de distribuição de água com formato geométrico tendendo para o uniforme, como os apresentados na Figura 17, sofrem menor influência do vento, em relação a aspersores que apresentam perfil radial de distribuição de água com a forma geométrica tendendo para o triangular.

Na Tabela 4, são apresentados os valores médios de velocidade e direção do vento observados nos ensaios de distribuição de água no campo. De acordo com classificação de Tarjuelo (1991), os ensaios de distribuição de água foram realizados em condições de vento medianas (2 a 4 m $s^{-1}$) e ventos fortes (acima de 4 m $s^{-1}$). Segundo este autor, para valores de velocidades médias do vento superiores a 4 m $s^{-1}$, a irrigação deve ser suspensa, devido ao comprometimento da uniformidade de aplicação de água. Entretanto, para o melhor ajuste dos

parâmetros de distorção devido ao vento, é conveniente realizar alguns ensaios de distribuição de água com valores de velocidade do vento que excedam ligeiramente ao valor de 4 m $s^{-1}$.

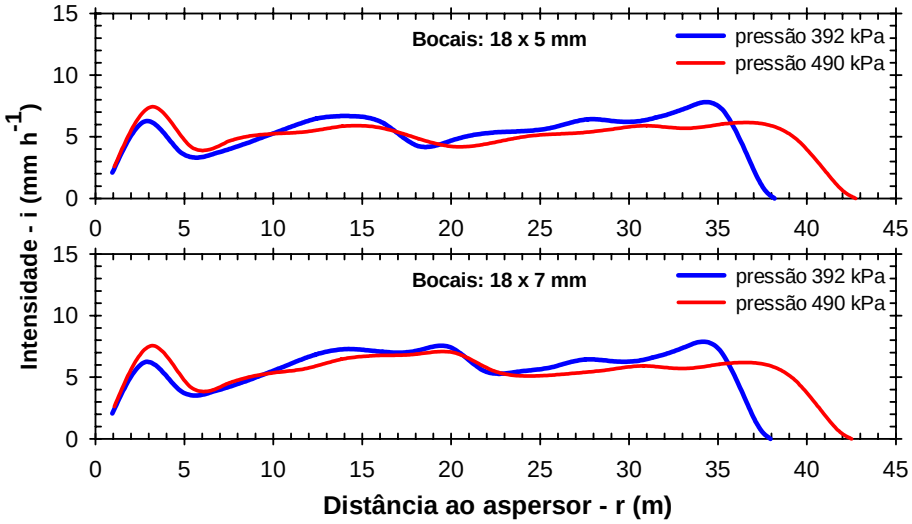


FIGURA 17 - Perfis radiais de distribuição de água do aspersor Plona-RL250, obtidos na ausência de vento, para as condições operacionais de bocais e pressão de serviço utilizadas nos ensaios de campo.

Os coeficientes de variação dos valores médios de velocidade e direção do vento variaram de 0,03 a 0,51 (Tabela 4). Os maiores valores de coeficientes de variação foram observados quando as velocidades médias do vento foram menores, em torno de 2,5 m $s^{-1}$. Para a maioria dos valores de velocidades médias do vento acima de 4 m $s^{-1}$ (Tabela 4), os coeficientes de variação, tanto para velocidade como para direção do vento, apresentaram valores menores que 25%. De acordo com Newell et al. (2003), coeficientes de variação de velocidade e direção do vento devem ser, preferencialmente, menores que 25% para o ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção do vento.

TABELA 4 - Condições médias de vento (velocidade e direção) observadas durante a realização dos ensaios de distribuição de água no campo.

| Bocais (mm) | Pressão (kPa) | Ensaio | Condições de vento | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Velocidade ($m\ s^{-1}$) | Velocidade CV* (%) | Direção (graus) | Direção CV (%) |
| 18 x 5 | 392 | 1 | 2,3 | 0,43 | 94 | 0,51 |
| | | 2 | 4,4 | 0,12 | 17 | 0,32 |
| | 490 | 1 | 2,7 | 0,29 | 59 | 0,44 |
| | | 2 | 4,4 | 0,16 | 97 | 0,39 |
| 18 x 7 | 392 | 1 | 5,2 | 0,14 | 123 | 0,10 |
| | | 2 | 5,4 | 0,13 | 14 | 0,03 |
| | 490 | 1 | 4,9 | 0,15 | 359 | 0,04 |
| | | 2 | 5,9 | 0,09 | 111 | 0,13 |

* Coeficiente de variação (CV).

Nas condições de baixas velocidades médias do vento (Tabela 4), a variabilidade do vetor vento é mais acentuada. Dessa forma, para obter uma maior constância do vetor vento, é recomendável realizar os ensaios de distribuição de água, para ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção do vento, quando os valores de velocidade média do vento situam-se entre 3 a 5 $m\ s^{-1}$. Newell et al. (2003) recomendam que o ajuste dos parâmetros de distorção devido ao vento seja realizado com valores de velocidade média do vento entre 4 a 5 $m\ s^{-1}$.

Na Tabela 5 são mostrados os ajustes dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção ocasionados pelo vento, os valores da função objetivo e o desvio médio entre as intensidades de precipitação observadas nos ensaios de campo e estimadas pelo modelo de ajuste. O maior desvio médio observado foi igual a 3,611 $mm\ h^{-1}$. Granier et al. (2003) encontraram um desvio médio igual a 3,380

mm $h^{-1}$ no ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento, utilizando apenas um ensaio de campo de distribuição de água. Richards & Weatherhead (1993), no ajuste dos parâmetros de distorção do vento, verificaram desvios médios que variaram entre 1,4 a 3,4 mm $h^{-1}$ tendo os maiores valores de desvios médios sido observados nas velocidades de vento maiores.

TABELA 5 - Parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção do vento ajustados para o aspersor Plona-RL250 operando com os bocais 18 x 5 e 18 x 7 mm sob as pressões de 392 e 490 kPa.

| **Ajuste dos Parâmetros** | **Bocal 18 x 5 mm** | | **Bocal 18 x 7 mm** | |
|---|---|---|---|---|
| | **p = 392 kPa** | **p = 490 kPa** | **p = 392 kPa** | **p = 490 kPa** |
| **A (m $m^{-1}$ s)** | 1,155 | 1,784 | 1,011 | 0,818 |
| **B (m $m^{-1}$ s)** | 1,051 | -0,517 | 1,352 | 2,303 |
| **C (m $m^{-1}$ s)** | -0,893 | 0,106 | -1,029 | -1,602 |
| **D (m $m^{-1}$ s)** | 0,104 | 1,533 | 1,712 | 1,413 |
| **E (m $m^{-1}$ s)** | 12,342 | 10,691 | 5,739 | 7,814 |
| **F (m $m^{-1}$ s)** | -9,046 | -8,584 | -4,086 | -5,393 |
| **$D_M$* (mm $h^{-1}$)** | **2,575** | **2,168** | **3,377** | **3,611** |
| **g(A,B,C,D,E,F) ($mm^2$ $h^{-2}$)** | **1.306,5** | **1.047,9** | **1.653,9** | **2.125,7** |

* Desvio médio ($D_M$).

O ajuste dos parâmetros de distorção devido ao vento, mostrados na Tabela 5, não garantem que o valor da função objetivo seja um valor com um mínimo global. Este valor pode ser um mínimo local. Segundo Saramago (2003), raramente pode-se garantir a existência e a unicidade de um ponto ótimo global, devido à existência de várias soluções, mau condicionamento numérico ou lenta convergência.

Conforme Šimùnek & Hopmans (2002), uma estratégia para alcançar um valor com um mínimo global da função objetivo seria iniciar o processo de

otimização a partir de diferentes configurações dos parâmetros; caso se encontre o mesmo valor final dos parâmetros, tem-se alguma garantia de mínimo global. Entretanto, a utilização deste procedimento no ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção pelo vento exigiria um grande esforço computacional e um grande intervalo de tempo seria despendido para encontrar a solução.

Na Figura 18 são apresentados os valores da função objetivo, determinados com diferentes configurações dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), para a condição operacional do aspersor Plona-RL250 trabalhando com os bocais 18 x 7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa. A representação gráfica da função objetivo, apresentada na Figura 18, foi efetuada em relação aos parâmetros "C" e "D". Nesta figura, é possível observar que o valor mínimo da função objetivo situa-se na região na qual foram ajustados os parâmetros.

Para o caso específico dos valores da função objetivo apresentados na Figura 18, é nítida a ocorrência de uma região (vale) em que a combinação dos valores dos parâmetros de ajuste leva para um mínimo e a ocorrência de regiões (vales) nas quais as combinações dos parâmetros levam para um valor máximo da função objetivo. Dessa forma, a estimativa inicial dos parâmetros de ajuste, pelo método das estimativas descendentes, foi fundamental para assegurar a convergência para um local mínimo da função objetivo quando foi aplicado o método de Newton.

Na Figura 19 são mostrados as superfícies dos valores de intensidade de precipitação observados nos ensaios de distribuição de água obtidos no campo e os valores de intensidades de precipitação estimados com os parâmetros (A, B, C, D, E e F) ajustados pelo modelo. Esta representação gráfica foi feita para a condição operacional do aspersor Plona-RL250, trabalhando com os bocais 18 x 7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa. Como mostrado nesta figura, os valores estimados de intensidades de precipitação à direita e à esquerda do vetor vento são praticamente simétricos.

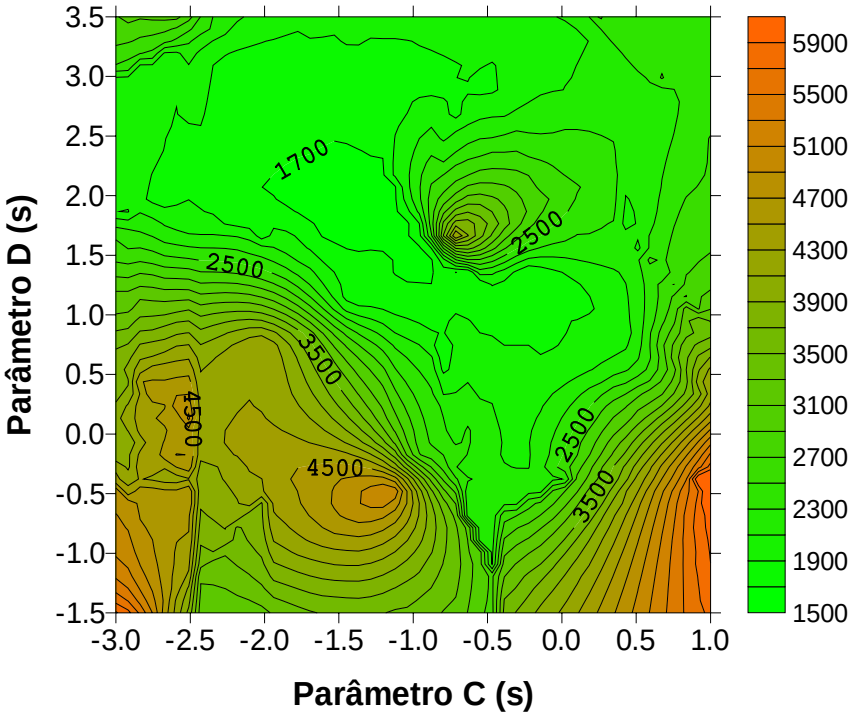


FIGURA 18 - Valores da função objetivo (g(A,B,C,D,E,F) em $mm^2h^{-2}$) em relação aos parâmetros "C" e "D", para ensaio do aspersor Plona-RL250 operando com os bocais 18 x 7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa.

A condição operacional do aspersor Plona-RL250, mostrada pela Figura 19, apresentou um desvio médio igual a 3,377 mm $h^{-1}$ entre os valores de intensidade de precipitação observados e estimados. Entretanto, as superfícies dos valores estimados apresentaram boa semelhança com as superfícies dos valores observados. De acordo com as considerações de Vories et al. (1987), apesar de os modelos não retratarem exatamente a distribuição de água de aspersores operando em condições de vento, os modelos matemáticos podem contribuir para uma melhor configuração destes equipamentos no campo.

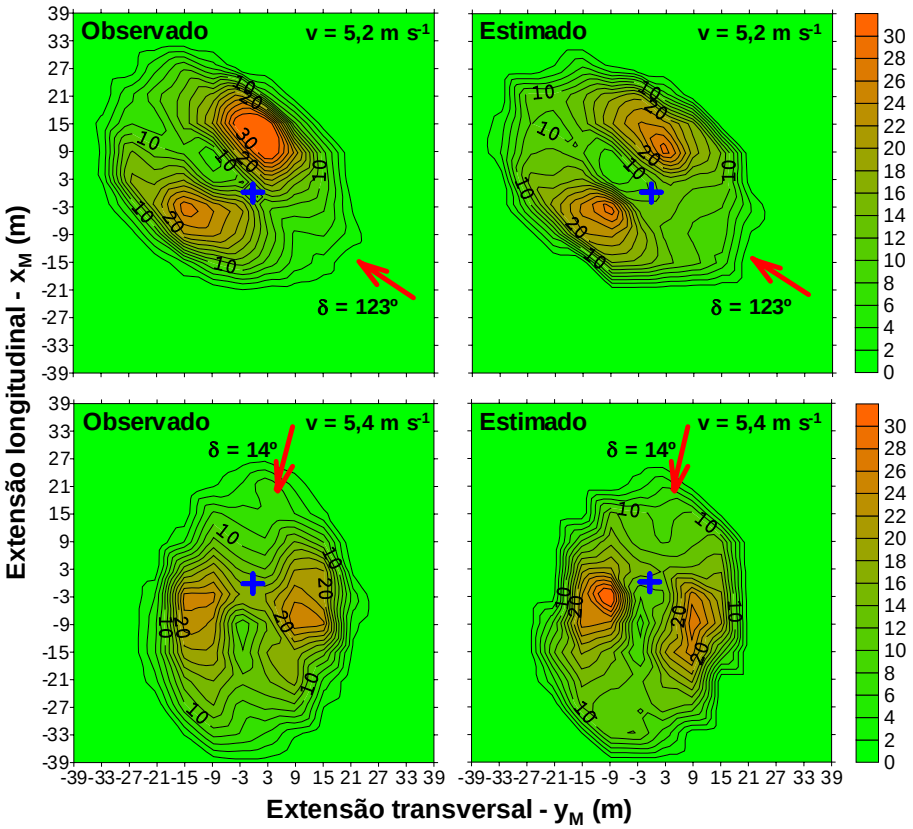


FIGURA 19 - Valores de intensidades de precipitação observadas nos ensaios de distribuição de água e estimadas pelo modelo, para o aspersor Plona-RL250 operando com os bocais 18 x 7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa.

# 4 CONCLUSÕES

i) A rotina computacional apresentada permite ajustar os parâmetros de distorção ocasionados pelo vento, utilizando até três ensaios de distribuição de água efetuados no campo.

ii) Os ensaios de distribuição de água no campo devem ser realizados, preferencialmente, para velocidades do vento entre 3 a 5 m $s^{-1}$.

iii) Os parâmetros ajustados pelo aplicativo computacional não garantem que o valor da função objetivo seja um ponto de mínimo global.

iv) Os parâmetros (A, B, C, D, E e F) ajustados podem ser utilizados para simular a distribuição de água de aspersores para qualquer direção do vento e para velocidade do vento que exceda aos valores observados nos ensaios de campo.

# 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ÁLVAREZ, J. F. O.; MARTIN-BENITO, J. M. T.; VALERO, J. A. J.; PÉREZ, P. C. Uniformity distribution and its economic effect on irrigation management in semiarid zones. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering,** New York, v. 130, n. 4, p. 257-268, 2004.

AZEVEDO, H. J.; BERNARDO, S.; RAMOS, M. M.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R. Influência de elementos do clima no desperdício de energia de um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 336-341, set./dez. 1999.

BEZ, E. T. **Procedimento de representação de soluções em otimização global**: aplicação em modelos de interação espacial. 2005. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade. Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 740 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.

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

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; FACI, J. M.; TEJERO, M.; BERCERO, A. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain II. Irrigation, evulation, simulation and scheduling. **Agricultural Water Management,** Amsterdam, v. 61, p. 93-109, 2003.

GRANIER, J.; MOLLE, B.; DEUMIER, J. M. IRRIPARC - Part 1: modeling water distribution under a sprinkler in windy conditions. In: EUROPEN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL COMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 20., 2003, Montpellier. **Anais...** Montpellier: AFEID, 2003.

HOLZAFEL, E. A.; PARDO, X. M.; PAZ, V. P. S.; RODRIGUEZ, A.; ORREGO, X. C.; LOPEZ, M. A. Análisis técnico-econômico para selección de

aspersores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 557-563, nov./dez. 2007.

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

MOTERO, J.; AGUADO, A.; GARCÍA, J. M.; CARRION, P.; TARJUELO, J. M. Characterization and improvement of the range of products (sprinklers and control valves) manufactured by COMETAL. In: EUROPEN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL COMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 20., 2003, Montpellier. **Anais...** Montpellier: AFEID, 2003.

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.

NEWELL, G. F.; FOLEY, J.; SMITH, R. **TRAVGUN-Travelling Gun Simulation model user's manual:** version 1.1. Toowooba, QLD. Austrália, 2003. 91.p.

NUNES, D.; PINTO, R. S.; TRENTO FILHO, E.; ELIAS, A. I. **Indicadores do setor sucroalcooleiro -** safras 2003/2004. Ribeirão Preto: Grupo IDEA, 2004. 111 p.

PAZ, V. P. S.; FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; FOLEGATTI, M. V. Otimização do uso da água em sistema de irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 404-408, set./dez. 2002.

PLAYÁN, E.; ZAPATA, N.; FACI, J. M.; TOLOSA, D.; LACUEVA, J. L.; PELEGRÍN, J.; SALVADOR, R.; SÁNCHEZ, I; LAFITA, A. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. **Agricultural Water Management,** Amsterdam, v. 84, p. 89-100, 2006.

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

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

REVISTA ITEM. Cerrados podem se tornar um imenso canavial, São Paulo, n. 69/70, p. 73-75. 2006

RICHARDS, P. J.; WEATHERHEAD, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 54, n. 4, p. 281-291. 1993.

SARAMAGO, S. F. P. **Método de otimização de otimização randômica**: algoritmos genéticos e "simulated annealing". São Carlos, SP: SBMAC, 2003, 37 p. (Notas em Matemática Aplicada, 6).

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.

ŠIMÙNEK, J.; HOPMANS J. W. Parameter optimization and nonlinear fitting, In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of soil analysis:** physical methods. 3.ed. Madison, WI: SSSA, 2002. Part 1, p. 139-157.

SMITH, R.; BAILLE, C. GORDON, G. Performance of travelling gun irrigation machines. **Proc of the Australian Society Sugar Cane Technologists**, Sydney, v. 24, p. 235-240, 2002.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología**. 2.ed. Madrid. Mundi Prensa Libros, 1991. 529 p.

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.

ZAPATA, N.; PLAYÁN, E.; MARTINÉZ-COB, A.; SÁNCHEZ, I; FACI, J. M.; LECINA, S. From on-farm solid-set sprinkler irrigation desing to collective irrigation network desing in windy areas. **Agricultural Water Management,** Amsterdam, v. 87, p. 187-199, 2007.

# CAPÍTULO 5

# AJUSTE DE PARÂMETROS PARA DISTORÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA APLICADA POR CANHÕES HIDRÁULICOS EM CONDIÇÕES DE VENTO - MÉTODO DO AUTOPROPELIDO

## RESUMO

PRADO, Giuliani do. Ajuste de parâmetros para distorção da distribuição de água aplicada por canhões hidráulicos em condições de vento - Método do Autopropelido. In: _____. **Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento.** 2008. Cap. 5, p. 96-121. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.[9]

A distorção na aplicação de água de aspersores, devido ao vento, pode ser modelada por seis parâmetros empíricos, que definem a deriva e a redução do raio de alcance, descritos no modelo de Richards & Weatherhead (1993). A determinação desses parâmetros pode ser estabelecida mediante ensaios de distribuição de água de um aspersor operando em equipamentos autopropelidos de irrigação. O objetivo deste trabalho foi descrever um procedimento numérico de primeira ordem (método das estimativas descendentes) e de segunda ordem (método de Newton) para o ajuste de parâmetros de distorção devido ao vento. Com o modelo matemático, desenvolveu-se uma rotina computacional, em *Visual Basic 6*, para o ajuste dos seis parâmetros a partir de ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação. Os dados de distribuição de água, obtidos em duas diferentes condições de vento, para o aspersor Plona-RL250, operando em um equipamento autopropelido de irrigação com ângulo de giro de 240º, velocidade linear de 30 m $h^{-1}$, pressão de 392 kPa e bocais de 14 x 5 e 14 x 7 mm, foram utilizados para aplicação da rotina computacional desenvolvida. No ajuste dos parâmetros com a rotina computacional, foram encontrados valores de desvios médios de 1,521 e 2,307 mm, entre os valores de lâminas de precipitação estimadas e observadas. Com os parâmetros estimados é possível simular a distribuição espacial de água do aspersor para qualquer direção de vento e para velocidades do vento que não excedam aos valores nos quais os parâmetros foram determinados.

---

[9] Comitê Orientador: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Orientador) e Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

# CHAPTER 5

## ABSTRACT

PRADO, Giuliani do. Parameter adjustment for distortion of raingun water distribution under windy conditions - Traveller irrigation machine method. In: _____. **Modeling gun sprinkler water application under different wind conditions.** 2008. Chap. 5, p. 96-121. Thesis (Doctor Science in Agricultural Engineering) - Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.[10]

Distortions in water distribution through sprinklers due to windy conditions can be modeled by six empirical parameters. These parameters define the drift and range shortening in the Richards & Weatherhead (1993) model and can be determined through water distribution trials of rainguns mounted on traveling machines. The goal of this paper is to describe numerical first order (Steepest Descendt Method) and second order (Newton Method) procedures to adjust the wind distortion parameters. After developing a mathematical model, a computational routine was written in *Visual Basic 6* to adjust these parameters from data obtained by the water distribution trials of the traveling machines. As input to the computational routine, data from trials held under two different wind conditions of the PLONA-RL250 sprinkler operating with a working pressure of 392 kPa and nozzle sizes of 14 x 5 and 14 x 7 mm on a traveling machine with a wetted sector angle of 240° and a traveling speed of 30 m $h^{-1}$ were used. In the adjustments made by the routine, average deviations of 1.521 and 2.307 mm between the estimated and the observed water application depth values. From the parameters estimated by the routine it is possible to simulate sprinkler spatial water distribution for any wind direction and speed, as long as the speed does not exceed the values for which the parameters were determined.

[10] Guidance Commitee: Alberto Colombo - DEG/UFLA (Major Professor) and Élio Lemos da Silva - DEG/UFLA.

# 1 INTRODUÇÃO

A irrigação por aspersão com o uso de equipamentos autopropelidos de irrigação é uma prática intensivamente utilizada na cultura da cana-de-açúcar (Nunes et al., 2004). O uso desses equipamentos de irrigação não é adotado exclusivamente na irrigação da cana-de-açúcar. Na Europa, em função da facilidade com que os autopropelidos cobrem áreas irregulares, estes equipamentos são amplamente empregados. Segundo Lancey (2006), os canhões hidráulicos são empregados em, aproximadamente, 75% da área irrigada por aspersão na Inglaterra.

Nos sistemas autopropelidos de irrigação, a uniformidade de aplicação de água normalmente não é adequada, principalmente em condições de vento (Smith et al., 2002; Silva et al., 2003). Conforme Rocha et al. (2005) e Prado & Colombo (2007), a baixa uniformidade de aplicação de água dos equipamentos autopropelidos de irrigação está ligada à falta de critérios específicos de dimensionamento, capazes de proporcionar um desempenho satisfatório e competitivo desses sistemas de irrigação em diferentes condições operacionais.

O desconhecimento de uma combinação ótima dos fatores que podem ser controlados pelo operador do sistema de irrigação é a principal causa da inadequada uniformidade de aplicação de água. Dentre os fatores controlados pelo operador, destacam-se: ângulo de lançamento do jato de água, tipo de bocal, ângulo de giro do aspersor, características do perfil estacionário de aplicação de água do aspersor, sobreposição dos perfis transversais de aplicação de água e variações na pressão de serviço e na velocidade de deslocamento do aspersor ao longo do carreador (Collier & Rochester, 1980; Colombo, 1991; Prado et al., 2007). Dentre os fatores que fogem ao controle do operador, destacam-se a velocidade e a direção do vento em relação ao carreador (Shull & Dylla, 1976; Newell et al., 2003).

Assim, em função das várias possíveis combinações de fatores que influenciam na uniformidade de aplicação de água, o uso de modelos de simulação da distribuição espacial de água de aspersores é fundamental quando o objetivo é maximizar a uniformidade de aplicação de água (Prado & Colombo, 2006).

Segundo Vories & Von Bernuth (1986), Han et al. (1994) e Newell et al. (2003), o vento (velocidade e direção) é um dos fatores de maior relevância na distribuição de água de aspersores. Conforme estes autores, sob condições de vento, há distorção na aplicação de água do aspersor, ocorrendo alongamento da área molhada no sentido do vetor vento e achatamento da área molhada perpendicularmente ao sentido do vetor vento.

Richards & Weatherhead (1993) descreveram um procedimento empírico para modelar matematicamente a distorção ocasionada pelo vento na distribuição espacial de água de canhões hidráulicos. O emprego deste modelo está condicionado ao ajuste de seis parâmetros que definem a deriva e a redução do raio de alcance devido ao vento. Para o ajuste dos seis parâmetros são necessários ensaios de distribuição de água no campo com o aspersor operando de forma isolada (método da malha).

A realização de ensaios de distribuição de água no campo com o aspersor operando isoladamente (método da malha) nem sempre é viável, pois, normalmente, há a necessidade de se montar uma área experimental para este fim. Dessa maneira, Newell et al. (2003) adaptaram o modelo de Richards & Weatherhead (1993) para aspersores em deslocamento linear com velocidade constante. A esta metodologia, os referidos autores denominaram de método inverso e, para o ajuste dos parâmetros, é necessária a realização de pelo menos três ensaios de distribuição de água do aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação (um sem vento e dois com vento).

Na metodologia apresentada por Newell et al. (2003) não há uma descrição do procedimento de cálculo para a estimativa dos parâmetros de ajuste de distorção devido ao vento. Os autores apenas comentam que é utilizado um procedimento numérico de primeira ordem no ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento. Dessa forma, este trabalho foi realizado com os seguintes objetivos: i) descrever um modelo de ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção ocasionados pelo vento, de Richards & Weatherhead (1993), a partir de ensaios de equipamentos autopropelidos de irrigação, que envolva um procedimento numérico de primeira ordem (método das estimativas descendentes) e de segunda ordem (método de Newton); ii) desenvolver uma rotina computacional para ajustar os parâmetros de distorção ocasionados pelo vento; e iii) aplicar a rotina computacional no ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento para ensaios de campo do aspersor Plona-RL250 operando em um equipamento autopropelido de irrigação.

# 2 MATERIAL E MÉTODOS

## 2.1 Descrição do modelo

Os parâmetros que definem a deriva ocasionada pelo vento (Dv) e a redução do raio de alcance ocasionado pelo vento (Ra) podem ser estabelecidos a partir de ensaios de campo de distribuição de água de um aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação. Esta metodologia, segundo Newell et al. (2003), é denominada de método inverso para a obtenção dos parâmetros de distorção devido ao vento.

Conforme Newell et al. (2003), para uma adequada estimativa dos parâmetros que definem a deriva e a redução do raio de alcance devido ao vento, os ensaios de distribuição de água no campo devem ser realizados em, pelo menos, três condições de vento (uma sem vento e duas com vento). Também, para uma boa representação da distribuição de água do aspersor, o espaçamento entre coletores ($\Delta e$ em m) não deve exceder a 3 m e, durante os ensaios de campo, os valores de velocidade e de direção do vento, preferencialmente, não devem apresentar coeficiente de variação (CV) superior a 25%.

### 2.1.1 Distribuição de água em condições de campo

Como mostrado na Figura 20, a distribuição de água de um aspersor operando com um ângulo de giro ($\theta$ em graus) e em movimento linear com velocidade constante (V em m $h^{-1}$) ao longo do carreador é avaliada, de acordo com a norma ISO 8224-1 (International Organization for Standardization, 2003), com auxílio de um dado número ($N_C$) de coletores de água dispostos ao longo do eixo "$y_M$", situado perpendicularmente ao sentido de deslocamento do aspersor.

O número de pontos de amostragem (coletores de água), representados pelo índice $k_C$ e espaçados em $\Delta e$ (Figura 20), necessários para representar a

distribuição de água do aspersor e a posição de cada coletor em relação ao carreador ($y_M$ em m) são estabelecidos, respectivamente, pelas expressões 30 e 32.

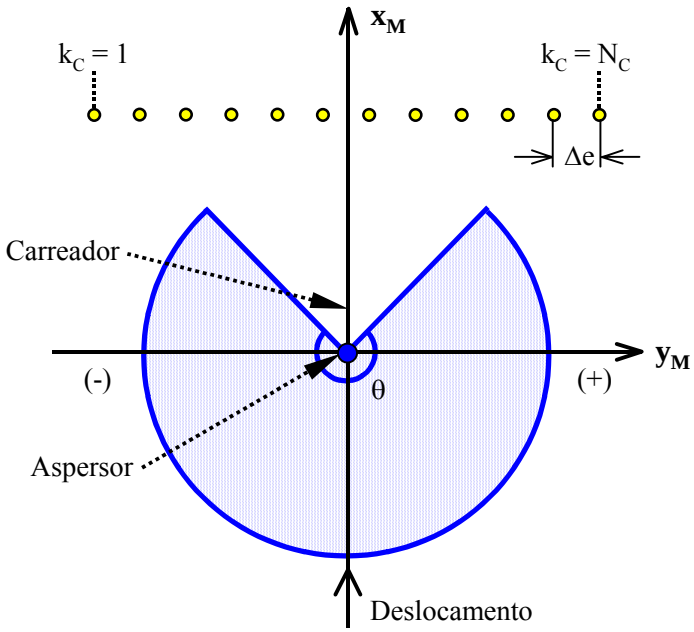


FIGURA 20 - Disposição dos pontos de amostragem para a determinação da distribuição de água de um aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação.

Nos ensaios de distribuição de água, além dos valores de lâminas aplicadas pelo aspersor e coletadas ao final, durante a sua realização, os valores médios de velocidade e direção do vento devem ser monitorados.

A partir das lâminas coletadas nos ensaios de distribuição de água, observa-se que sempre há perdas de água por evaporação e arraste. Richards & Weatherhead (1993) e Granier et al. (2003) comentam que, para canhões hidráulicos, esta perda é pequena e pode ser negligenciada. Entretanto, para que

não haja problemas volumétricos, os valores de lâminas de precipitação observadas em cada ensaio de distribuição de água são corrigidos por:

$$I'_{k_E k_C} = I_{k_E k_C} \cdot \frac{Q_{a+p}}{Q_E}$$

$$\text{sendo}: \; Q_E = \sum_{k_C=1}^{N_C} \left( \frac{I_{k_E k_C} \cdot \Delta e \cdot V}{1000} \right) \tag{73}$$

$$\text{com}: \; 1 \le k_E \le N_E \;\; ; \;\; 1 \le k_C \le N_C$$

em que $I'_{k_E k_C}$ é a lâmina de precipitação corrigida observada no ensaio de distribuição de água no campo (mm); $I_{k_E k_C}$ é a lâmina de precipitação observada no ensaio de distribuição de água no campo (mm); $Q_{a+p}$ é a vazão do conjunto de bocais auxiliar e principal do aspersor ($m^3\ h^{-1}$); $Q_E$ é a vazão determinada no ensaio de distribuição de água no campo ($m^3\ h^{-1}$); $\Delta e$ é o espaçamento entre coletores (m); V é a velocidade de deslocamento linear do aspersor ($m\ h^{-1}$); $k_E$ é o índice que identifica o número do ensaio e $N_E$ é a quantidade de ensaios de distribuição de água.

### 2.1.2 Estimativa das lâminas aplicadas

Como mostrado na Figura 21, a estimativa das lâminas aplicadas por um aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação, com um ângulo de giro ($\theta$) e velocidade constante ao longo do carreador, pode ser realizada a partir das lâminas aplicadas em torno do aspersor operando de forma estacionária (método da malha). Dessa forma, é necessário estabelecer, com auxílio da expressão 30, o número de coletores de água, na linha ($N_L$) e na coluna ($N_C$), necessários para representar a distribuição de água do aspersor operando isoladamente (Figura 21).

Na malha de coletores apresentada na Figura 21, as coordenadas "$x_M$" e "$y_M$" dos pontos de amostragem em relação ao aspersor são estabelecidas, respectivamente, com auxílio das expressões 31 e 32.

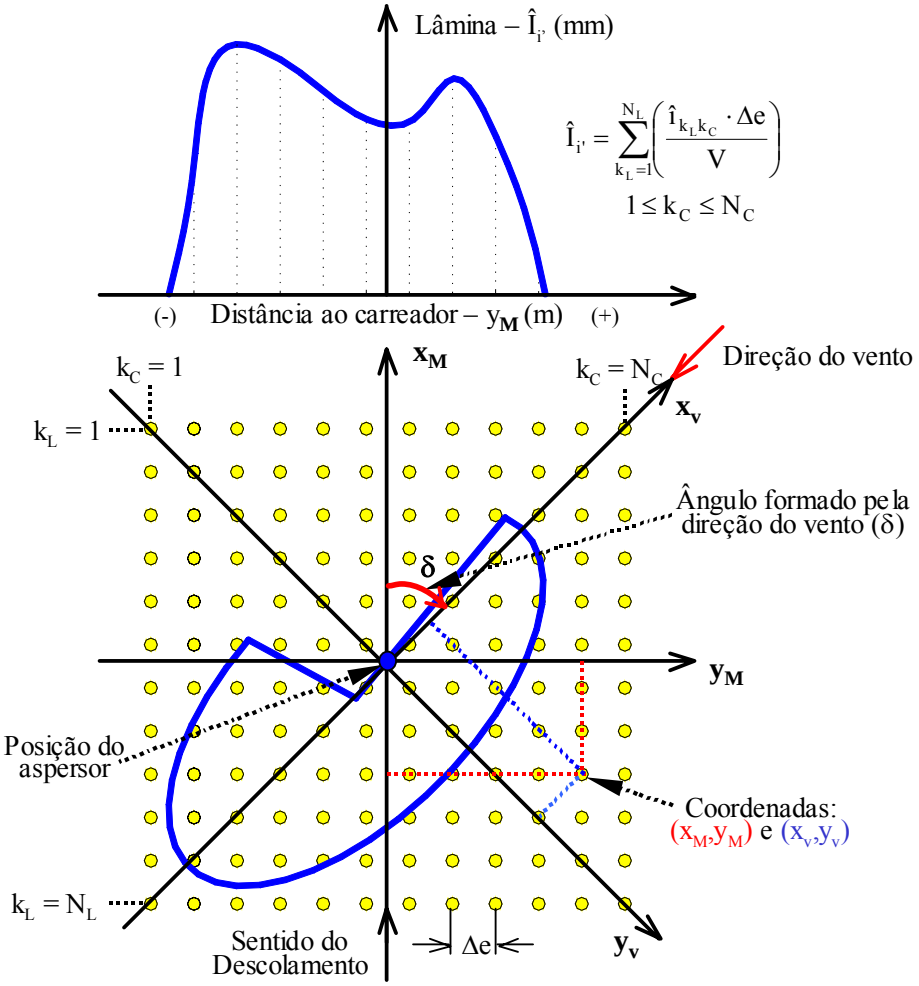


FIGURA 21 - Disposição dos pontos de amostragem para estimativa das lâminas aplicadas por um aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação.

De forma análoga ao que foi apresentado no capítulo 4, é estabelecido um sistema de coordenadas cartesianas ($x_v$, $y_v$) a partir do ângulo $\delta$ (em graus) formado entre a direção predominante do vetor vento e o eixo $x_M$ da malha de coletores. Como mostrado na Figura 21, nesse sistema de coordenadas cartesianas, o eixo "$x_v$" é alocado de forma a coincidir com a direção predominante do vetor vento e o eixo "$y_v$" é alocado perpendicularmente em relação à direção predominante do vetor vento. A posição dos coletores de água em relação aos eixos "$x_v$" e "$y_v$" é calculada pelas expressões 33 e 34, respectivamente.

Com os valores das coordenadas "$x_v$" e "$y_v$" de cada coletor em relação ao aspersor, na condição de vento, e a partir das estimativas dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), é possível determinar, pelo modelo de Richards & Weatherhead (1993), as coordenadas ($x_{v0}$, $y_{v0}$) de cada coletor, na condição da ausência de vento. Essa determinação é efetuada de maneira iterativa pelo método de Newton (Burden & Faires, 2003), resolvendo, pela regra de Cramer, o sistema de equações apresentado na expressão 39.

Conhecendo-se a posição de cada coletor em relação ao aspersor, na ausência de vento ($x_{v0}$, $y_{v0}$), determina-se, no perfil radial de distribuição de água do aspersor, a intensidade de precipitação de água. Dessa forma, corrigindo-se o valor da intensidade de precipitação obtida para a ausência de vento, conforme o modelo de Richards & Weatherhead (1993), é possível estabelecer a intensidade de precipitação ocorrida em cada ponto de amostragem na condição de vento.

Com os valores de intensidades de precipitação aplicados por um aspersor operando de forma estacionária, na malha de coletores apresentada na Figura 21 são estimadas as lâminas aplicadas pelo aspersor em movimento. Esta estimativa é feita integrando-se os valores de intensidades de precipitação estimados em cada coluna da malha de coletores por:

$$\hat{I}_{k_E k_C} = \sum_{k_C=1}^{N_C} \left( \frac{\hat{i}_{k_E k_C k_L} \cdot \Delta e}{V} \right)$$

$$\text{sendo: } \hat{i}_{k_E k_C k_L} = \frac{i_0}{\frac{\partial x_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} \cdot \frac{\partial y_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}} \tag{74}$$

$$\text{com: } 1 \le k_E \le N_E \ ; \ 1 \le k_L \le N_L$$

em que $\hat{I}_{k_E k_C}$ é a lâmina de precipitação estimada aplicada pelo aspersor em movimento no carreador (mm); $\hat{i}_{k_E k_C k_L}$ é a intensidade de precipitação estimada pelo modelo (mm $h^{-1}$); $i_0$ é a intensidade de precipitação na ausência de vento, obtida no perfil radial de distribuição de água do aspersor (mm $h^{-1}$); $\frac{\partial x_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}}$ é a derivada parcial da equação 35, que é calculada pela equação 40 e $\frac{\partial y_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}$ é a derivada parcial da equação 36, que é calculada pela equação 43.

### 2.1.2 Ajuste dos parâmetros de distorção

No ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), que definem a deriva ocasionada pelo vento (Dv) e a redução do raio de alcance ocasionado pelo vento (Ra), é utilizado o método dos mínimos quadrados. Dessa forma, é necessário estabelecer uma função objetivo da diferença ao quadrado, entre os valores de lâmina de precipitação corrigidos determinados nos ensaios distribuição de água no campo ($I'_{k_E k_C}$) e os valores de lâmina de precipitação estimados ($\hat{I}_{k_E k_C}$). A função que objetiva ajustar os parâmetros (A, B, C, D, E e F) do modelo é dada por:

$$g_A(\mathbf{x}) = \sum_{k_E=1}^{N_E}\sum_{k_C=1}^{N_C}\left(I'_{k_E k_C} - \hat{I}_{k_E k_C}\right)^2 \qquad (75)$$

$$\text{com}: 1 \le k_E \le N_E \;;\; 1 \le k_C \le N_C$$

em que $g_A(\mathbf{x})$ é a função objetivo ($mm^2$) e $\mathbf{x} = (x_1 = A, x_2 = B, x_3 = C, x_4 = D, x_5 = E, x_6 = F)^t$ é o vetor que contém os parâmetros de ajuste.

Para começar o processo de cálculo da estimativa dos parâmentos, inicialmente, são efetuadas duas estimativas da função objetivo: uma com os parâmetros (A, B, C, D, E e F) obtidos pelo trabalho de Richards & Weatherhead (1993) e outra com os parâmetros (A, B, C, D, E e F) obtidos pelo trabalho de Granier et al. (2003). Assim, os parâmetros escolhidos para iniciar o processo de cálculos são aqueles que proporcionam o menor valor da função objetivo.

No ajuste dos seis parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção ocasionada pelo vento são utilizados dois métodos: i) método das estimativas descendentes, para uma estimativa inicial dos valores de A, B, C, D, E e F e ii) método de Newton para de sistemas de equações não lineares, para estimativa final dos parâmetros de ajuste. A descrição e os critérios de parada do método das estimativas descendentes e do método de Newton são descritos detalhadamente no capítulo 4.

Nas estimativas dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), o desvio médio entre os valores de precipitação estimada ($\hat{I}_{k_E k_C}$) e observada ($I'_{k_E k_C}$) são calculados pela expressão 72.

## 2.2 Aplicação do modelo matemático

O modelo matemático descrito foi aplicado aos ensaios de distribuição de água do aspersor Plona-RL250 operando com os bocais 14 x 5 mm e 14 x 7

mm sob a pressão de serviço de 392 kPa. Esses ensaios foram realizados nas condições sem e com vento.

Os ensaios de distribuição de água (perfil radial de distribuição de água), em condições de ausência de vento (ventos menores que 0,9 m $s^{-1}$), foram determinados na bancada de ensaios de aspersores da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, de acordo com o procedimento descrito por Prado & Colombo (2005).

Para a determinação da distribuição de água, em condições de vento, foram conduzidos ensaios com o aspersor Plona-RL250, operando em um carretel enrolador da marca Metal Lavras, modelo Hidro Roll 63/150 (Figura 22). Estes ensaios foram realizados para duas condições de vento (velocidade e direção) distintas, no Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) de Uberaba, MG, em um terreno com declividade de 2%, no sentido do deslocamento do aspersor, observando-se as seguintes condições operacionais: i) bocais de 14 x 5 mm, ângulo de giro de 240° e velocidade de 30 m $h^{-1}$ ii) bocais de 14 x 7 mm, ângulo de giro de 240° e velocidade de 30 m $h^{-1}$.

Conforme mostra a Figura 22, nos ensaios de campo, transversalmente ao sentido de deslocamento do aspersor, a uma distância maior que 45 m dos pontos de início e parada do deslocamento linear do aspersor no carreador, foram instaladas três linhas de coletores, espaçadas de 6 m. Em cada lado destas linhas, 20 coletores de plástico, com 8 cm de diâmetro, espaçados em 2 m, foram instalados.

Durante os ensaios, a pressão de operação, medida na base do aspersor, foi monitorada a cada 10 minutos e as condições de velocidade média e direção do vento foram monitoradas a cada 5 minutos, com um anemômetro de canecas, instalado a 2 m de altura do solo (Figura 22).

FIGURA 22 - Ensaios de distribuição de água do aspersor Plona-RL250 operando em um sistema autopropelido de irrigação.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1 Rotina computacional

A partir do algoritmo descrito foi desenvolvida, em linguagem de programação *Visual Basic 6* e incorporada ao programa Simulasoft (Prado, 2004), uma rotina computacional para ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção devido ao vento (Figura 23). Estes parâmetros são determinados por até três ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação, obtidos na condição de vento.

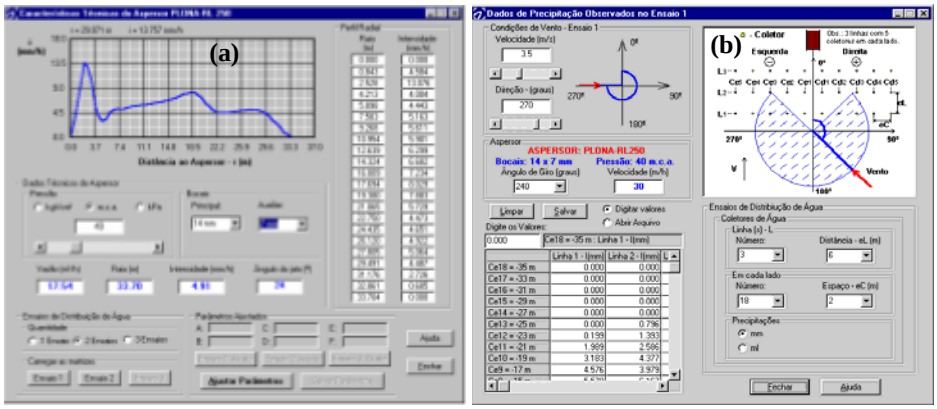


FIGURA 23 - Telas da rotina computacional para entrada de dados: (a) dados técnicos do aspersor e ajustes dos parâmetros de vento e (b) dados dos ensaios de distribuição de água em condições de vento.

Como mostrado na Figura 23a, na tela inicial da rotina computacional é necessário definir as condições operacionais do aspersor. Para os aspersores Plona RL250, RL300 e RL400, ao selecionar a combinação de pressão de serviço e bocais, o programa apresenta os dados técnicos de vazão, raio de alcance, intensidade de precipitação média e perfil radial de distribuição de água do aspersor operando na ausência de vento. Nessa janela, também é necessário

assinalar o número de ensaios (um, dois ou três) de distribuição de água realizados com o aspersor operando em condições de vento.

Na definição do número de ensaios de distribuição de água realizados em condições de vento (Figura 23a), na tela seguinte (Figura 23b) é necessário entrar com os seguintes valores de ensaio de campo: i) velocidade média do vento; ii) direção média do vento; iii) ângulo de giro do aspersor; iv) velocidade de deslocamento do aspersor no carreador e v) lâminas de precipitação observadas. A entrada desses valores pode ser por meio de digitação ou abertura de arquivo, que deve estar na extensão *.TXT, separado por tabulações.

Com os dados de ensaio de distribuição de água determinados em condições de vento, o programa determina os valores dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), buscando minimizar a diferença dos valores entre as lâminas de precipitação estimadas e observadas. Os valores de intensidades de precipitação estimados na malha de coletores e utilizados para gerar os valores de lâminas de precipitação estimadas são representados por um gráfico de superfície. Já as lâminas de precipitação estimadas e observadas são representadas por um gráfico de linhas, conjuntamente com o valor do desvio médio das estimativas (Figura 24). Caso seja do interesse do usuário, o programa também apresenta os valores numéricos de intensidades de precipitação estimadas.

Os parâmetros ajustados, para combinação de bocal e pressão de serviço do aspersor, podem ser salvos e utilizados no Simulasoft (Prado, 2004) para simulação da distribuição espacial de água do aspersor operando em sistemas autopropelidos de irrigação. Estas simulações podem ser efetuadas para outras condições de velocidade de deslocamento e ângulo de giro do aspersor. Dessa forma, é possível estabelecer, de modo a maximizar a uniformidade de aplicação de água, as melhores condições operacionais de ângulo de giro e espaçamento entre carreadores para as condições de vento predominantes na região.

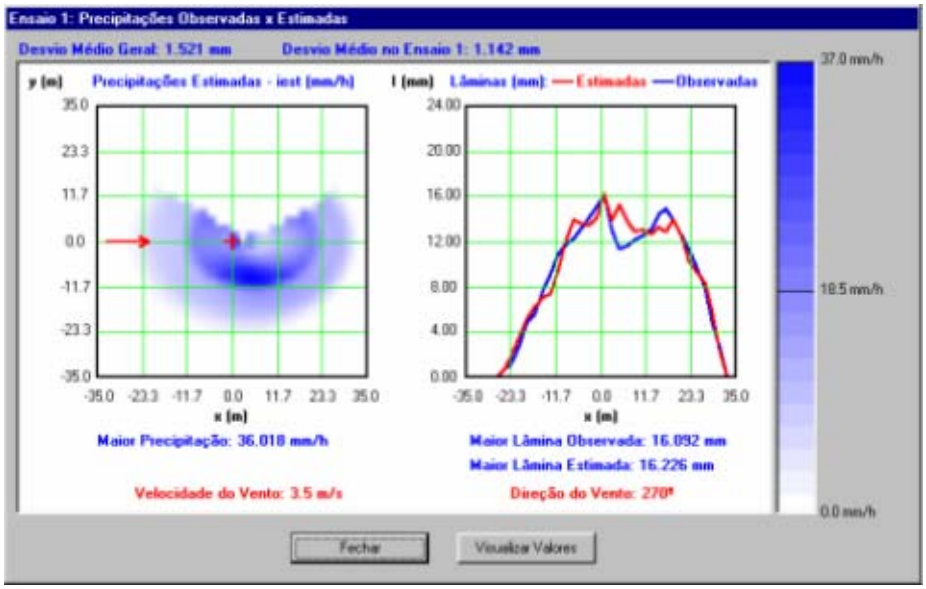


FIGURA 24 - Apresentação gráfica do ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento a partir de ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação.

### 3.2 Ajuste dos parâmetros

As duas formas geométricas dos perfis radiais de distribuição de água obtidas em laboratório na condição de ausência de vento são apresentadas pela Figura 25. Esses dois perfis radiais foram determinados para as mesmas combinações de bocal e pressão de serviço utilizadas nos ensaios de distribuição de água no campo, em condições de vento.

Os perfis radiais apresentados na Figura 17 assemelham-se aos perfis radiais E e F descritos por Christiansen (1942). Conforme Keller & Bliesner (1990), canhões hidráulicos apresentam, normalmente, perfis radiais de distribuição de água com as formas geométricas típicas D e E de Christiansen. De acordo com Vories & Von Bernuth (1986), Kincaid (1991) e Montero et al. (2003), aspersores que apresentam perfil radial de distribuição de água com

formato geométrico semelhante aos perfis apresentados na Figura 25 sofrem menor influência do vento, em relação àqueles que com a forma geométrica tendendo para o triangular.

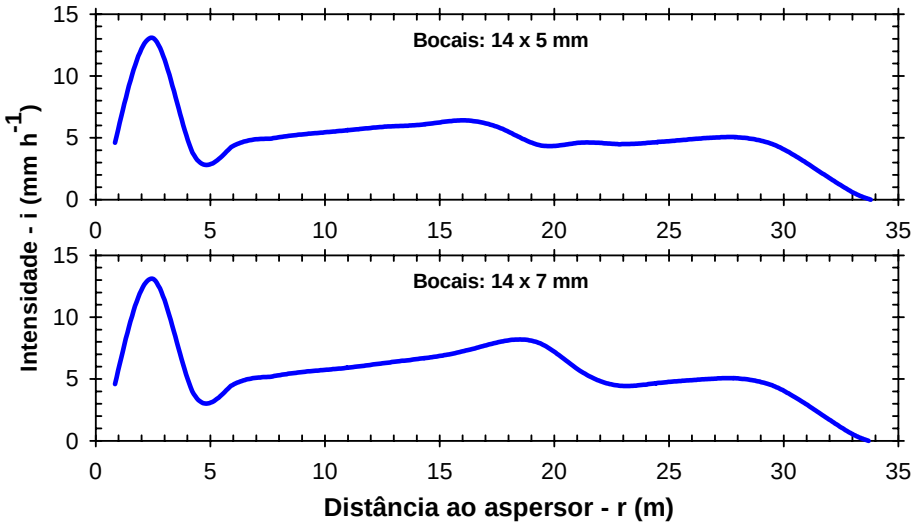


FIGURA 25 - Perfis radiais de distribuição de água do aspersor Plona-RL250, obtidos na ausência de vento, em função dos bocais e da pressão de serviço de 392 kPa.

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios de velocidade e de direção do vento observados nos ensaios de distribuição de água no campo. Conforme a classificação de Tarjuelo (1991), em três ensaios, os valores de velocidade média de vento são medianos (2 a 4 m $s^{-1}$) e, em um ensaio, o valor de velocidade média do vento é forte (acima de 4 m $s^{-1}$). Segundo este autor, para valores de velocidades médias do vento superiores a 4 m $s^{-1}$, a irrigação deve ser suspensa, devido ao comprometimento da uniformidade de aplicação de água. Dessa forma, ensaios de distribuição de água com valores de velocidade média do vento que excedam muito (maior que 5 m $s^{-1}$) ao valor de 4 m $s^{-1}$ são

desnecessários, pois, na prática, não seria adequada a utilização de sistemas de irrigação por aspersão nessas condições.

Os coeficientes de variação dos valores médios de velocidade e direção do vento, apresentados na Tabela 6, variaram de 0,03 a 0,55. O maior valor de coeficiente de variação, tanto para velocidade como para direção do vento, foi observado no ensaio em que a velocidade média do vento foi igual a 1,8 m $s^{-1}$. Para velocidades médias de vento mais baixas (menor que 3,0 m $s^{-1}$), a constância do vetor vento é mais difícil, devendo os ensaios de distribuição de água ser realizados quando a velocidade média do vento supera o valor de 3,0 m $s^{-1}$. Newell et al. (2003) recomendam que os ensaios de distribuição de água no campo para o ajuste dos parâmetros de distorção do vento sejam realizados quando as velocidades do vento estejam entre 4,0 a 5,0 m $s^{-1}$.

TABELA 6 - Condições médias de vento (velocidade e direção) observadas durante a realização dos ensaios de distribuição de água.

| **Bocais (mm)** | **Pressão (kPa)** | **Ensaio** | **Condições de vento** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **Velocidade (m $s^{-1}$)** | **Velocidade CV* (%)** | **Direção (graus)** | **Direção CV (%)** |
| 14 x 5 | 392 | 1 | 3,5 | 0,22 | 270 | 0,31 |
| | | 2 | 4,4 | 0,20 | 193 | 0,03 |
| 14 x 7 | 392 | 1 | 1,8 | 0,55 | 332 | 0,37 |
| | | 2 | 3,5 | 0,24 | 270 | 0,23 |

* Coeficiente de variação (CV).

Conforme as observações de Shull & Dylla (1976), nos ensaios de distribuição de água de aspersores operando em equipamentos autopropelidos de irrigação, a dificuldade na obtenção da constância do vetor vento é muito mais acentuada, em relação a ensaios de distribuição de água com o aspersor operando isoladamente (método da malha). Nos ensaios de distribuição de água

do aspersor operando isoladamente, o tempo de ensaio é em torno de uma hora; já para equipamentos autopropelidos de irrigação; dependendo do diâmetro molhado e da velocidade de deslocamento do aspersor, o tempo de ensaio pode durar várias horas.

Na Tabela 7 são mostrados os parâmetros de distorção ajustados, o desvio médio entre as lâminas de precipitação observadas nos ensaios de campo e estimadas pelo modelo e o valor da função objetivo. Estes valores foram obtidos para o aspersor deslocando-se com velocidade linear de 30 m $h^{-1}$ no carreador, com ângulo de giro 240º, na pressão de 392 kPa e com os bocais de 14 x 5 mm e 14 x 7 mm, para duas diferentes condições de vento (velocidade e direção). Concordando com as observações de Richards & Weatherhead (1993), observa-se, na Tabela 7, que o maior valor de desvio médio ($D_M$ = 2,307 mm $h^{-1}$) no ajuste dos parâmetros foi observado nos ensaios de campo que apresentaram as maiores velocidades médias de vento (Tabela 6).

O ajuste dos parâmetros de distorção devido ao vento, mostrado na Tabela 7, não garante que o valor da função objetivo seja um valor com um mínimo global; ele pode ser um mínimo local. Segundo Saramago (2003), raramente pode-se garantir a existência e a unicidade de um ponto ótimo global; isso ocorre devido à existência de várias soluções, ao mau condicionamento numérico ou à lenta convergência.

Conforme Šimùnek & Hopmans (2002), uma estratégia para alcançar um valor com um mínimo global da função objetivo seria iniciar o processo de otimização a partir de diferentes configurações dos parâmetros. Caso se encontre o mesmo valor final dos parâmetros, tem-se alguma garantia de mínimo global. A utilização deste procedimento no ajuste dos parâmetros de distorção pelo vento, mediante ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação, seria inviável, pois exigiria grande esforço computacional e o tempo para encontrar a solução ótima seria também muito grande.

TABELA 7 - Parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção do vento ajustados para o aspersor Plona-RL250 operando em um equipamento autopropelido de irrigação com os bocais 14 x 5 e 14 x 7 mm sob a pressão de 392 kPa, ângulo de giro 240º e velocidade linear de 30 m $h^{-1}$ no carreador.

| **Ajuste dos parâmetros** | **Bocal 14 x 5 mm** | **Bocal 14 x 7 mm** |
|---|---|---|
| | **Pressão 392 kPa** | **Pressão 392 kPa** |
| **A (m $m^{-1}$ s)** | 0,250 | 0,694 |
| **B (m $m^{-1}$ s)** | 3,473 | 3,773 |
| **C (m $m^{-1}$ s)** | -2,926 | -3,610 |
| **D (m $m^{-1}$ s)** | 1,673 | 1,182 |
| **E (m $m^{-1}$ s)** | 4,946 | 10,199 |
| **F (m $m^{-1}$ s)** | -3,793 | -9,034 |
| **$D_M$* (mm $h^{-1}$)** | **2,307** | **1,521** |
| **$g_A$(A,B,C,D,E,F) ($mm^2$ $h^{-2}$)** | **276,65** | **143,34** |

* Desvio médio ($D_M$).

Na Figura 26 são mostrados os valores de lâminas de precipitação observados nos ensaios de distribuição de água obtidos no campo e os valores de lâminas de precipitação estimados com os parâmetros (A, B, C, D, E e F) ajustados. Observa-se que, para as duas condições operacionais de bocais e pressão de serviço do aspersor Plona-RL250, os perfis de distribuição de água do aspersor em movimento linear com velocidade linear constante de 30 m $h^{-1}$ e com ângulo de giro 240º, observados nos ensaios de campo, apresentaram boa semelhança com os perfis de distribuição de água estimados pelo modelo.

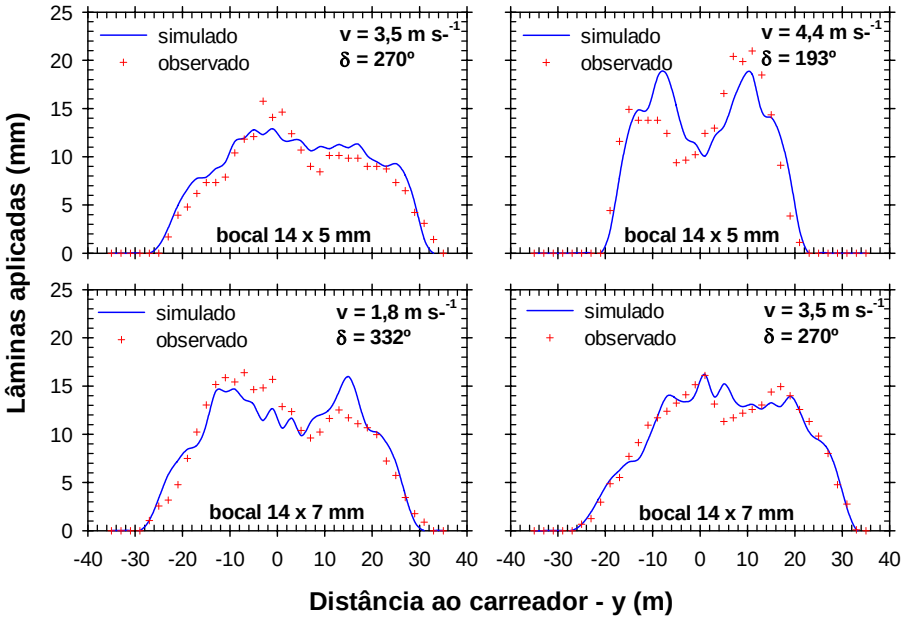


FIGURA 26 - Valores de lâminas de precipitação observadas nos ensaios de distribuição de água e estimadas pelo modelo, para o aspersor Plona-RL250 operando com os bocais 14 x 5 mm e 14 x 7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa, ângulo de giro 240º e velocidade linear de 30 m $h^{-1}$ no carreador.

Fazendo-se um comparativo da metodologia de ajuste dos parâmetros de distorção que utiliza ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação com a metodologia que utiliza o método da malha (Capítulo 4), verifica-se que, para a utilização dessa metodologia, são exigidos muito mais critérios para a coleta de dados de campo e um maior esforço computacional para a determinação dos parâmetros, pois se utiliza uma malha de coletores muito mais adensada. Entretanto, a obtenção dos valores de lâminas aplicadas no campo é muito mais fácil, visto que eles podem ser obtidos diretamente no local onde o sistema de irrigação foi implantado e não há necessidade de montar um campo experimental para ensaiar o aspersor.

# 4 CONCLUSÕES

i) A rotina computacional permite ajustar os parâmetros de distorção ocasionados pelo vento a partir de até três ensaios de distribuição de água de aspersores operando em equipamentos autopropelidos de irrigação.

ii) Os ensaios de distribuição de água no campo devem ser realizados, preferencialmente, para velocidades do vento maiores que 3 m $s^{-1}$.

iii) Os parâmetros ajustados pelo aplicativo computacional não garantem que o valor da função objetivo seja um ponto de mínimo global.

iv) Os parâmetros (A, B, C, D, E e F) ajustados podem ser utilizados para simular a distribuição de água de aspersores para qualquer direção do vento e para velocidade do vento que excedam aos valores observados nos ensaios de campo.

# 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 740 p.

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

COLLIER, R. L.; ROCHESTER, E. W. Water application uniformity of hose towed traveler irrigators. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,** St. Joseph, v. 23, n. 5, p. 1135-1138, Mar./Apr. 1980.

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

GRANIER, J.; MOLLE, B.; DEUMIER, J. M. IRRIPARC - Part 1: modeling water distribution under a sprinkler in windy conditions. In: EUROPEN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL COMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 20., 2003, Montpellier. **Anais...** Montpellier: AFEID, 2003.

HAN, S.; EVANS, R. G.; KROEGER, M. W. Sprinkler distribution patterns in windy conditions. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,** St. Joseph, v. 37, n. 5, p. 1481-1489, Sep./Oct.. 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8224-1 **Traveller irrigation machines**. Part1: Operational characteristics and laboratory and field test methods. Switzerland. 2003. 36p.

KELLER, J., BLIESNER, R. D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990. 652 p.

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

LANCEY, T. **Improving Irrigation Efficiency:** Optimising raingun performance in field-scale vegetable production. Cranfield University, February 2006. Disponível em

<http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/iwe/students/timlacey.htm>. Acesso em: 20 maio. 2006.

MOTERO, J.; AGUADO, A.; GARCÍA, J. M.; CARRION, P. TARJUELO, J. M. Characterization and improvement of the range of products (sprinklers and control valves) manufactured by COMETAL. In: EUROPEN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL COMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 20., 2003, Montpellier. **Anais...** Montpellier: AFEID, 2003.

NEWELL, G. F.; FOLEY, J.; SMITH, R. **TRAVGUN-Travelling Gun Simulation model user's manual:** version 1.1. Toowooba, QLD. Austrália, 2003. 91.p.

NUNES, D.; PINTO, R. S.; TRENTO FILHO, E.; ELIAS, A. I. **Indicadores do setor sucroalcooleiro - safras 2003/2004**. Ribeirão Preto, Grupo IDEA, 2004, 111 p.

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

PRADO, G.; COLOMBO, A.; BIAGIONI, P. F. Análise da uniformidade de aplicação de água pelo aspersor PLONA-RL400 em sistemas autopropelidos de irrigação. **Revista de Engenharia,** Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 346-353, mai./ago. 2007.

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

PRADO, G; COLOMBO, A. Aplicativo computacional para simulação da distribuição espacial de água aplicada por canhões hidráulicos em sistemas autopropelidos de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16., 2006, Goiânia. **Anais...** Brasília: ABID, 2006.

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

RICHARDS, P. J.; WEATHERHEAD, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 54, n. 4, p. 281-291. 1993.

ROCHA, F. A.; PEREIRA, G. M. ROCHA, F. S.; SILVA, J. O. Análise da uniformidade de distribuição de água de um equipamento autopropelido. **Irriga,** Botucatu, v. 10, n. 1, p. 96-106, Jan./Abr. 2005.

SARAMAGO, S. F. P. Método de otimização de otimização randômica: algoritmos genéticos e "simulated annealing". São Carlos, SP: SBMAC, 2003, 37 p. (Notas em Matemática Aplicada; 6).

SHULL, H.; DYLLA, A. S. Traveling gun application uniformity in high winds. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,** St. Joseph, v. 19, n. 2, p. 254-258, Nov./Dec. 1976.

SILVA, L. L.; SANTOS, N.; SERRALHEIRO, R. Hose-drawn traveler with a line of sprinklers, an alternative to the gun-sprinkler traveler system. In: EUROPEN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL COMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 20., 2003, Montpellier. **Anais...** Montpellier: AFEID, 2003.

ŠIMÙNEK, J.; HOPMANS J. W. Parameter Optimization and Nonlinear Fitting, In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods.** Third edition, SSSA, Madison, WI, p. 139-157, 2002.

SMITH, R.; BAILLE, C. GORDON, G. Performance of travelling gun irrigation machines. **Proc of the Australian Society Sugar Cane Technologists**, Sydney, v. 24, p. 235-240, 2002.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología**. 2. ed. Madrid. Mundi Prensa Libros, 1991. 529 p.

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

# Livros Grátis

( http://www.livrosgratis.com.br )

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo