



**HENRIQUE FONSECA ELIAS DE OLIVEIRA**

**SIA: MODELO SEMIEMPÍRICO PARA SIMULAÇÃO  
DA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO**

**LAVRAS-MG  
2012**

**HENRIQUE FONSECA ELIAS DE OLIVEIRA**

**SIA: MODELO SEMIEMPÍRICO PARA SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO  
POR ASPERSÃO**

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

Orientador

PhD. Alberto Colombo

**LAVRAS - MG**

**2012**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Oliveira, Henrique Fonseca Elias de.

SIA : modelo semiempírico para simulação da irrigação por  
aspersão / Henrique Fonseca Elias de Oliveira. – Lavras : UFLA,  
2012.

84 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Alberto Colombo.

Bibliografia.

1. Modelos computacionais. 2. Sistema autopropelido. 3. Vento.  
4. Modelagem. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.587

**HENRIQUE FONSECA ELIAS DE OLIVEIRA**

**SIA: MODELO SEMIEMPÍRICO PARA SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO  
POR ASPERSÃO**

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

APROVADA em 27 de março de 2012

Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista	(UFG)
Dr. Geraldo Magela Pereira	(UFLA)
Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	(UFLA)
Dra. Myriane Stella Scalco	(UFLA)

PhD. Alberto Colombo  
UFLA  
(Orientador)

**LAVRAS - MG**  
**2012**

A Deus, por sempre me acompanhar.

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

A minha filha, Ana Júlia, pela alegria de sua chegada.

A minha namorada, Eliene, pelo amor e compreensão.

A minha avó, Ana, pelos ensinamentos.

Aos meus parentes e amigos, pelo carinho.

**OFEREÇO**

A todas as pessoas especiais que deixaram um rastro de luz em nossas  
vidas e hoje estão ao lado de Deus e em nossas lembranças;

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

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

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

Ao professor Alberto Colombo pelos ensinamentos.

Aos professores Adão Wagner Pêgo Evangelista, Geraldo Magela Pereira, Luiz Fernando Coutinho de Oliveira e Myriane Stella Scalco, membros da banca examinadora, pelas sugestões e observações.

Aos colegas Samuel Beskow e família e Lessandro Coll Faria, pela valiosa amizade e grandiosa colaboração na elaboração deste trabalho.

Ao colega Giuliani do Prado, pela disponibilização dos dados.

A todos os amigos de infância, pela amizade sincera.

A todos os meus parentes, pela confiança e incentivo.

A minha sogra Terezinha, pelo auxílio de todos os momentos.

A todos os colegas Lavrenses, pela calorosa receptividade.

A todos os colegas de curso, em especial Anselmo Custódio, Bruno Leite, Joaquim A. de L. Júnior, Léo Ávila, Luciano Geisenhof, Marcelo Viola, Marcos Vinícius, Moisés Ribeiro pela amizade e convivência.

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

Aos amigos Álvaro Carlos, Antônio Carlos, Roger Toscan, Romário Melo, Rodrigo Ribeiro, pelas inúmeras histórias compartilhadas.

Ao colega Alexandre (*in memorian*), pela alegria e amizade sincera. Ao meu tio Vicente (*in memorian*), pela alegria, simplicidade e carinho de todas as horas.

## **AUTOBIOGRAFIA**

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

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

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

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

Após obtenção do título de mestre, em março de 2008, ingressou no Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras, área de concentração Engenharia de Água e Solo, concluindo-o em 27 de março de 2012.

## RESUMO GERAL

Modelos computacionais de simulação da aplicação de água possibilitam, de maneira rápida, efetuar a análise do desempenho de sistemas de irrigação nas mais diferentes condições operacionais e ambientais, antes e depois da sua instalação em campo. A uniformidade de aplicação de água de sistemas de irrigação por aspersão depende da combinação entre fatores climáticos, sobretudo velocidade e direção do vento e, fatores operacionais, incluindo: tipo de aspersor, diâmetro do bocal, pressão de serviço, ângulo do jato e ângulo do setor molhado; no caso específico de autopropelidos deve-se incluir ainda espaçamento entre carreadores e velocidade de deslocamento do aspersor. Devido à gama de fatores influenciando o desempenho dos sistemas de irrigação a modelagem computacional torna-se uma ferramenta extremamente útil na avaliação desses sistemas, na fase de projeto ou mesmo depois de instalados em campo. Porém, apesar da grande eficiência na utilização, a maioria dos modelos de simulação da aplicação de água exige uma quantidade excessiva de dados de entrada e de parâmetros para calibração, tornando tais modelos muitas vezes difíceis de serem aplicados. Visando superar tais dificuldades, neste trabalho, é descrito o desenvolvimento do modelo Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA), detalhando seus principais componentes, parâmetros e potencialidades. Esse modelo foi escrito em *Delphi* (ambiente *Windows*) e sua aplicação se dá por meio de uma abordagem simples, que tem como característica o uso de menos dados de entrada, sendo calibrado através da otimização de apenas seis parâmetros, utilizando para isso três ensaios de campo (um sob condições de vento calmo e dois sob condições de vento moderado). O SIA utiliza uma metodologia baseada no modelo semiempírico de Richards & Weatherhead, a qual faz uso de três parâmetros para representar a deriva pelo vento e três para representar a interrupção do fluxo de ar induzido, responsáveis pela distorção do padrão molhado de distribuição de água dos aspersores. No ajuste dos seis parâmetros, o SIA utiliza o método de otimização global *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)*, desenvolvido na Universidade do Arizona. Para a primeira aplicação do SIA utilizou-se o aspersor da marca Plona, modelo RL-250, sendo que na calibração além de ensaios de laboratório para caracterizar os perfis radiais de distribuição de água desse aspersor, cinquenta e três ensaios de campo, realizados sob diferentes condições operacionais e de vento, também foram utilizados. Posteriormente à calibração, os parâmetros otimizados nessa etapa foram mantidos constantes e utilizados em simulações para outras condições operacionais e de vento. Para avaliação da qualidade do ajuste os valores de intensidade de precipitação simulados pelo modelo foram comparados com valores de intensidade de precipitação obtidos em campo, pela

análise da raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado, tomados em relação aos valores não nulos (RMSE), do erro relativo entre valores de vazão simulados e observados (e) e do índice de confiança ou desempenho (c). A avaliação da simulação da uniformidade de aplicação de água foi realizada através da análise do desvio absoluto entre valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), simulados com dados obtidos pelo modelo e dados obtidos em ensaios de campo e, também, pela análise do coeficiente de determinação e do índice de confiança ou desempenho. Os valores médios encontrados de RMSE, erro relativo entre valores de vazão e índice de confiança ou desempenho foram respectivamente, 1,54 mm h<sup>-1</sup>, 0,97% e 0,88, durante a calibração e 1,36 mm h<sup>-1</sup>, 1,32% e 0,91 na etapa de validação. O valor médio do desvio absoluto entre valores de CUC foi 5,39%. A análise dos coeficientes estatísticos utilizados permite inferir que o método de otimização *Shuffled Complex Evolution* apresentou alta eficiência, quando implementado no SIA, com elevados índices de qualidade do ajuste, além de rápida convergência. Com base nos resultados obtidos nas fases de calibração e validação, conclui-se que o modelo SIA tem grande potencial para ser aplicado, no intuito de prever o comportamento dos sistemas autopropelidos de irrigação que operam com canhões hidráulicos, auxiliando na tomada de decisão quanto ao manejo desses equipamentos, operando em condições reais de trabalho, tanto na fase de projeto quanto para sistemas já instalados.

## GENERAL ABSTRACT

Computer simulation models of water application possible, quickly, making the performance analysis of irrigation systems in different operational and environmental conditions before and after they are installed at in field. The water application uniformity in sprinkler irrigation systems depends on the combination of climatic factors, especially wind speed and direction and operational factors, including: sprinkler type, nozzle size, operating pressure, jet angle and wetted sector angle, in the specific case of traveling irrigation machines, must also include: towpath spacing and travel speed of the sprinkler. Given the range of factors influencing the performance of irrigation systems, computational modeling becomes an extremely useful tool in the evaluation of these systems in the design phase or even after they are installed in the field. However, despite the wide use efficiency, most simulation models of water application, requires an excessive amount of input data and calibration parameters for making such models often difficult to apply. Aiming to overcome such difficulties, this report describes the development of simulation model for sprinkler irrigation (SIA), detailing its main components, parameters and capabilities. This model was written in Delphi (Windows environment) and its application is done through a simple approach, which is characterized by the use of less input data and calibrated by optimizing only six parameters, using this three field trials (in a still wind conditions and two under moderate wind conditions).The SIA uses a methodology based on semi-empirical model by Richards & Weatherhead, which uses three parameters to represent the wind drift and three to represent the interruption of the flow of induced air, responsible for the distortion of the water distribution wetted pattern of the sprinklers. In the adjustment of six parameters, the SIA uses the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) global optimization method, developed at the University of Arizona. For the first application of the SIA model was used the Plona sprinkler, model RL-250, being that calibration as well as laboratory test to characterize the water distribution of radial profiles of the sprinkler, fifty-three field experiments conducted under different operating conditions and wind were also used. Subsequently the calibration, the parameters optimized in this step were kept constant and used in simulations for other operating conditions and wind. To assess the quality of the fit, the values of rainfall intensity data simulated by the model were compared with values of rainfall intensity obtained in the field, through the analysis of the square root of the squared deviations, taken in relation to non-zero values (RMSE), the values of relative error between simulated and observed flow (e) and the index of confidence or performance (c). The evaluation of the simulation of water application uniformity was made by

examining the absolute deviation between the values of the Christiansen coefficient of uniformity (CUC) with simulated data obtained by the model and data from field trials and also by analysis of the coefficient of determination and the confidence index of performance. The values of RMSE, relative error between flow values and the index of confidence or performance, were respectively,  $1.54 \text{ mm h}^{-1}$ , 0.97% and 0.88, during calibration and  $1.36 \text{ mm h}^{-1}$ , 1.32% and 0.91 in the validation step. The mean absolute deviation between the values of CUC was 5.39%. The statistical analysis of the coefficients used allows to infer that the Shuffled Complex Evolution optimization method presented high efficiency, when implemented in the SIA, with high levels of quality adjustment, and fast convergence. Based on the results obtained in the calibration and validation phases, it is concluded that the SIA model has great potential to be applied in order to predict the behavior of travel irrigation machines that operate with gun sprinkler, assisting in decision making regarding management of equipment, operating in real conditions of work, both in the design phase and for systems already installed.

## SUMÁRIO

### Página

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Sistemas autopropelidos de irrigação.....	16
2.2	Modelagem da distribuição de água em sistemas de irrigação por aspersão.....	17
2.2.1	Classificação dos modelos.....	18
2.2.1.1	Modelo de Richards & Weatherhead.....	20
2.2	Procedimentos de calibração e validação.....	22
2.3	Métodos de otimização aplicados a modelos de simulação da irrigação por aspersão.....	23
2.3.1	<i>Shuffled Complex Evolution</i> (SCE – UA).....	24
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	28
	REFERÊNCIAS.....	29
	ARTIGO 1: SIA: Modelo semiempírico para simulação da irrigação por aspersão – Parte I: Descrição e aplicabilidade do modelo.....	33
	ARTIGO 2: SIA: Modelo semiempírico para simulação da irrigação por aspersão – Parte II: Calibração e validação do modelo.....	61
	ANEXO A.....	86

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

No cenário mundial tem se tornado cada vez mais evidente o crescimento da demanda por técnicas de manejo da irrigação, que se enquadrem nos conceitos intrínsecos ao tema sustentabilidade. Nesse contexto, se faz cada vez mais necessário, no meio agrícola, a busca por estratégias de manejo que possibilitem o uso racional de água e energia, visando reduzir os custos de produção, ao mesmo tempo em que possibilita a conservação dos recursos hídricos.

A agricultura irrigada caracteriza-se como um dos principais usos da água em todo o mundo, sendo o estudo dos efeitos da deriva pelo vento e das perdas por evaporação, o fator-chave para aumentar a eficiência de utilização da água na irrigação por aspersão.

Embora velocidade e direção do vento sejam as variáveis meteorológicas mais importantes afetando o desempenho do sistema de irrigação por aspersão, esse efeito também é condicionado às variáveis operacionais, destacando-se no caso de autopropelidos, trajetória do jato, tipo do bocal (cônico ou anel), regulagem do mecanismo setorial (ângulo de giro), características do perfil radial de aplicação de água do aspersor e variações da pressão de operação e da velocidade de deslocamento do aspersor ao longo do carreador (KELLER; BLIESNER, 1990; TARJUELO; GÓMEZ; PARDO, 1992).

Os efeitos tanto da velocidade quanto da direção do vento devem ser considerados, no projeto de sistemas de irrigação por aspersão, em áreas sujeitas à ação desse agente. Direção do vento e, particularmente, velocidade do vento, estão frequentemente sujeitas a uma grande variabilidade em um dado dia e entre dias. Essa variabilidade no tempo causa uma séria limitação para o

adequado projeto de um sistema de irrigação por aspersão e torna o manejo da água uma difícil tarefa.

Devido às dificuldades de se estudar os efeitos do vento sobre a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação por aspersão, em condições de campo, a modelagem computacional da distribuição de água de aspersores mostra-se como uma ferramenta de grande eficiência, sendo importante no auxílio às tomadas de decisões, em projetos de irrigação, na avaliação de sistemas de irrigação e no desenvolvimento de novos aspersores.

Tradicionalmente, duas aproximações muito importantes têm sido utilizadas nos modelos de simulação da distribuição de água de aspersores: uma aproximação determinística, com aplicação da teoria balística tradicional, para calcular a trajetória de voo de gotas individuais e, métodos empíricos, os quais envolvem extrapolação de medidas dos padrões de distribuição de água do aspersor, para várias velocidades e direções do vento, para o mesmo bocal, pressão e ângulo de trajetória do jato (SMITH et al., 2008).

No caso particular dos canhões hidráulicos, além das incertezas quanto aos valores dos coeficientes de arraste, existem dificuldades de se estabelecer as condições iniciais das gotas (posição em relação ao aspersor, velocidade e ângulo da trajetória), por isso, a modelagem baseada na teoria balística é mais frequentemente empregada na simulação do desempenho de pequenos (CONCEIÇÃO; COELHO, 2003) e médios aspersores (MONTERO; TARJUELO; CARRIÓN, 2001; PLAYÁN et al., 2006).

Por outro lado, recentemente, o modelo de Richards e Weatherhead (1993) vem recebendo a atenção de diversos pesquisadores interessados na simulação da distribuição de água de canhões hidráulicos, operando em condições de vento. Por se tratar de um modelo cujos autores o classificam em função da utilização de equações que têm forte embasamento teórico, como “semiempírico”, o modelo de Richards e Weatherhead (1993) requer um número

limitado de ensaios de campo para o ajuste de seus parâmetros empíricos. A utilização desse modelo está condicionada ao ajuste de seis parâmetros, que definem a deriva e a redução do raio de alcance do aspersor devido à influência do vento, responsáveis pela distorção do padrão molhado de aplicação de água do aspersor.

Na avaliação da eficiência de aplicação de água dos sistemas de irrigação, a uniformidade de aplicação de água é um dos parâmetros que refletem a qualidade do sistema e o incremento em produtividade para culturas irrigadas (FRIZZONE; DOURADO NETO, 2003). A determinação em campo dos coeficientes de uniformidade de aplicação de água para os sistemas de irrigação é um procedimento que exige grande dispêndio de tempo e mão de obra, além de ser difícil abranger toda a área irrigada.

Apesar das facilidades introduzidas pelos computadores terem permitido a disseminação dos tediosos processos de cálculo, necessários para prever a uniformidade dos sistemas de irrigação por aspersão, operando em condições de ausência de vento, tais facilidades não permitiram a mesma disseminação de aplicativos voltados ao estudo da uniformidade dos sistemas de irrigação por aspersão operando em condições reais de campo, sob a ação do vento. Logo, o conhecimento técnico a respeito das condições de uniformidade de aplicação de água desses sistemas, operando sob diferentes condições de vento, é ainda limitado e as estratégias de cálculo adotadas nos estudos envolvendo vento e distribuição de água requer um número excessivo de parâmetros.

Frente a essas dificuldades, um modelo de abordagem simples, conduzido com menos dados de entrada e menos parâmetros de calibração, é preferível. Assim, antecedendo à implantação do projeto, ou mesmo depois de instalado o sistema de irrigação, a partir de modelos computacionais de simulação da distribuição de água é possível definir estratégias de manejo para esses sistemas, as quais proporcionam ganhos em termos de tempo e economia

de recursos materiais e financeiros, além de reduzirem o impacto ambiental dessa atividade, em função do aumento na produtividade das culturas irrigadas, evitando o desperdício de água, energia e fertilizantes.

Nesse contexto, tendo em vista o efeito prejudicial do vento sobre a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação por aspersão e as vantagens decorrentes da utilização da modelagem matemática na simulação dos efeitos do vento sobre o padrão de distribuição espacial da água aplicada por canhões hidráulicos, foi desenvolvido, neste trabalho, o programa computacional denominado Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA), o qual visa fornecer uma análise quantitativa dos efeitos de diferentes combinações operacionais e climáticas (velocidade e direção do vento) sobre o grau de uniformidade de aplicação de água dos sistemas autopropelidos operando com canhões hidráulicos.

Dessa forma, o presente trabalho foi estruturado de forma a atender aos seguintes objetivos:

- Artigo I: (a) descrever o programa computacional SIA, seus parâmetros, sua potencialidade e sua aplicabilidade; (b) apresentar os resultados oriundos de simulações, realizadas com o SIA, para uma determinada configuração do aspersor Plona-RL250.
- Artigo II: (a) calibrar os parâmetros adimensionais correspondentes à deriva e à interrupção do fluxo de ar induzido do modelo de Richards e Weatherhead (1993), utilizados no SIA; (b) validar o modelo computacional, confrontando dados de distribuição de água obtidos em ensaios de campo, com os respectivos dados simulados pelo programa, para o aspersor canhão Plona RL-250; (c) averiguar se o método de otimização SCE-UA pode ser empregado para o caso específico do programa computacional SIA.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Sistemas autopropelidos de irrigação**

No Brasil, a irrigação por aspersão figura como um dos métodos de irrigação mais empregados, principalmente pela facilidade operacional que o método oferece (PRADO, 2008). Atualmente, devido aos incentivos na produção de biocombustíveis e a consequente expansão do setor sucroalcooleiro, devido à produção de etanol (GOLDENBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008), houve um grande aumento na utilização dos sistemas de irrigação por aspersão, tipo autopropelidos, utilizados principalmente na aplicação da vinhaça, o principal efluente da produção de etanol de cana (COLOMBO; PRADO; OLIVEIRA, 2009).

Segundo a norma ISO 8224-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2004), equipamentos autopropelidos de irrigação são “máquinas projetadas para irrigar um campo sequencialmente, faixa por faixa, que provocam, através de várias técnicas de rebocamento, o deslocamento de um carrinho equipado com um sistema de distribuição de água (aspersor ou canhão aspersor, combinação de aspersores e canhões, barra com uma série de aspersores, sprayers ou outros tipos de dispositivos de distribuição de água) através de um campo, e que deve ser deslocada para, e operada a partir de diversos pontos pré-estabelecidos de suprimento de água”. Essa Norma também prevê três diferentes tipos de autopropelidos, destacando o Tipo 1, correspondente aos carretéis enroladores que operam estacionados recolhendo a mangueira de alimentação do sistema móvel de distribuição de água.

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, esse sistema apresenta facilidade de manejo da irrigação e adapta-se a diferentes tipos de cultura e condições topográficas.

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. 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.

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., 2008). Segundo Prado (2008) essa baixa uniformidade de aplicação de água é, em grande parte, consequência da utilização, por parte dos fabricantes, projetistas e usuários, de recomendações operacionais e de projeto inadequadas.

Tendo em vista as dificuldades inerentes ao estudo da uniformidade de aplicação de água de sistemas autopropelidos em campo, o uso da modelagem matemática torna-se uma ferramenta de grande aplicabilidade na avaliação desses sistemas.

## **2.2 Modelagem da distribuição de água em sistemas de irrigação por aspersão**

O uso da modelagem computacional, para efetuar a análise da distribuição de água na irrigação por aspersão, apresenta-se como uma ferramenta extremamente útil, devido à agilidade, precisão e segurança dos resultados obtidos (PRADO; COLOMBO, 2006). Desse modo, de acordo com Prado (2008), a modelagem computacional assume 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.

Em função da importância dos efeitos do vento sobre a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação por aspersão e das dificuldades de se estudar esses efeitos em condições de campo, a modelagem em computador da distribuição de água de aspersores, operando em condições de vento é muito utilizada (OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009).

Esses modelos consistem na simulação da distribuição espacial da água aplicada por aspersores de pequeno e médio porte (CONCEIÇÃO; COELHO, 2003; FARIA et al., 2012; MONTERO; TARJUELO; CARRIÓN, 2001; PLAYÁN et al., 2006) ou aspersores canhão (FARIA et al., 2009; OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009; PRADO et al., 2010a; SMITH et al., 2008), operando sob diferentes condições operacionais e climáticas.

Dentre os diversos fatores que afetam a distribuição espacial da água aplicada pelos sistemas de irrigação, além de velocidade e direção do vento, destacam-se também as variáveis operacionais tais como diâmetro dos bocais, pressão de serviço, características do perfil radial de aplicação de água e ângulo de giro do aspersor (PRADO; COLOMBO, 2010a, 2010b). No caso específico de autopropelidos acrescentam-se ainda variações da pressão de operação e da velocidade de deslocamento do aspersor ao longo do carreador (KELLER; BLIESNER, 1990; TARJUELO; GÓMEZ; PARDO, 1992).

### **2.2.1 Classificação dos modelos**

Han, Evans e Kroeger (1994) classificam os diversos modelos de simulação dos efeitos do vento sobre a distribuição espacial de água aplicada por aspersores em duas categorias: modelos físicos e modelos empíricos.

Os modelos físicos se baseiam na solução de sistemas de equações diferenciais que descrevem a trajetória das gotas, desde o momento em que deixam o aspersor até o momento em que atingem a superfície do solo (OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009).

No caso particular dos canhões hidráulicos, as simulações baseadas em modelos físicos, que são aplicadas com sucesso nos estudos da distribuição espacial da água aplicada por pequenos e médios aspersores, operando em diferentes condições de vento (CONCEIÇÃO; COELHO, 2003; PLAYÁN et al., 2006; ZAPATA et al., 2009), têm aplicação limitada. Além das incertezas quanto aos valores dos coeficientes de arraste, existem dificuldades de se estabelecer as condições iniciais das gotas (posição em relação ao aspersor, velocidade e ângulo da trajetória).

Os modelos empíricos são desenvolvidos a partir de resultados de ensaios de distribuição espacial de água de aspersores realizados em diferentes condições de vento (OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009). Os modelos propostos por Gat e Molle (2000), Han, Evans e Kroeger (1994), Richards e Weatherhead (1993) e Seginer e Kostrinsky (1975) se encaixam nessa categoria.

Mais recentemente, o modelo de Richards e Weatherhead (1993) vem recebendo a atenção de diversos pesquisadores interessados na simulação da distribuição de água de canhões hidráulicos operando em condições de vento (FARIA et al., 2009; OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009; PRADO et al., 2010a; SMITH et al., 2008). Por se tratar de um modelo cujos autores o classificam em função da utilização de equações que têm forte embasamento teórico, como “semiempírico”, o modelo de Richards e Weatherhead (1993) requer um número limitado de ensaios de campo para ajuste de seus parâmetros empíricos.

### 2.2.1.1 Modelo de Richards & Weatherhead

A modelagem da distorção causada pelo vento, proposta por Richards e Weatherhead (1993), utiliza do sistema de eixos  $(X_v, Y_v)$  orientados em relação ao sentido do vento, esquematizado na Figura 1.

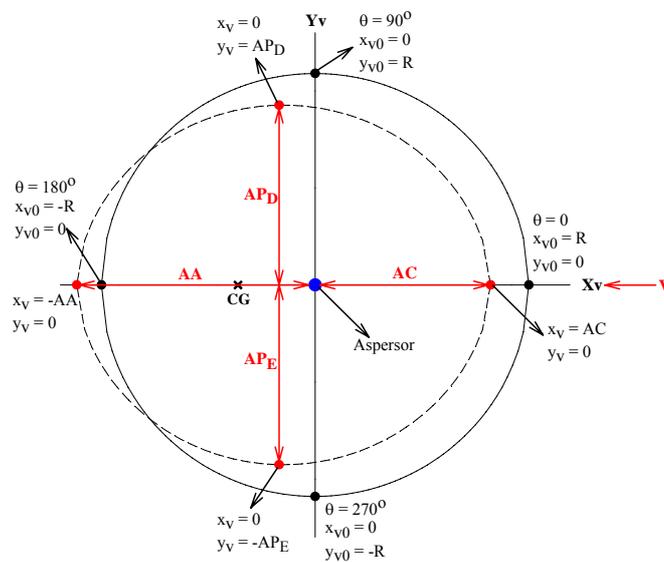


Figura 1 Distâncias do aspersor até a extremidade da área molhada tomadas em quatro diferentes afastamentos ( $AC$ ,  $AP_D$ ,  $AP_E$  e  $AA$ ) em relação à direção do vento

Nesse modelo, a relação entre as coordenadas  $(x_{v0}, y_{v0})$  de um ponto de impacto no solo que ocorre na condição de ausência de vento e as coordenadas  $(x_v, y_v)$  de impacto desse mesmo ponto sob condições de vento não nulo é dada, de acordo com Faria et al. (2012), pelas seguintes equações:

$$x_v = x_{v0} - [A + B \cdot (r/R) + C \cdot (r/R)^2] \cdot V - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + \dots + F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot \sqrt{\sin^2 e \cdot \left(\frac{x_{v0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{v0}}{r}\right)^2} \cdot \frac{x_{v0}}{r} \quad (1)$$

$$y_v = y_{v0} - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot \sqrt{\sin^2 e \cdot \left(\frac{x_{v0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{v0}}{r}\right)^2} \cdot \frac{y_{v0}}{r} \quad (2)$$

em que:

$x_v, y_v$  - coordenadas do ponto de impacto da água em condições de vento (m);

$x_{v0}, y_{v0}$  - coordenadas do ponto de impacto da água na ausência de vento (m);

$r = (x_{v0}^2 + y_{v0}^2)^{1/2}$  - distância radial do aspersor ao ponto de impacto sem vento (m);

R - raio de alcance do aspersor operando na ausência de vento (m);

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

e - ângulo de saída do jato de água em relação ao plano horizontal (graus);

A, B, C, D, E e F - parâmetros empíricos do modelo ( $s \cdot m^{-1}$ ).

Nas Eqs. 1 e 2 os termos  $(A+B(r/R)+C(r/R)^2)$  e  $(D(r/R)+E(r/R)^2+F(r/R)^3)$  representam, respectivamente, o efeito da deriva pelo vento e o efeito da interrupção do fluxo induzido de ar junto ao jato de água (OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009).

O cálculo da taxa de aplicação  $I_v$ , em  $x_v, y_v$  na presença de vento é realizado por meio da Eq. 3:

$$I_v = \frac{I(r/R)_0}{\left( \frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}} \cdot \frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}} \right)} \quad (3)$$

em que:

$I_v$  - intensidade de aplicação de água em  $x_v, y_v$  (condições de vento,  $\text{mm h}^{-1}$ ),

$I(r/R)_0$  - intensidade de aplicação de água em  $x_{v0}, y_{v0}$ , (baseada na curva de aplicação de água do aspersor operando na ausência de vento,  $\text{mm h}^{-1}$ ),

$\frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}}$  e  $\frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}}$  - obtidos diferenciando-se as Eqs. 1 e 2 em relação a  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$ .

## 2.2 Procedimentos de calibração e validação

De acordo com Beskow et al. (2011), um esforço de calibração é necessário para procurar um conjunto de parâmetros que represente um processo de forma adequada e gere resultados satisfatórios quanto à saída de interesse. Essa tarefa é alcançada buscando minimizar os erros e maximizar as medidas de eficiência, utilizando coeficientes tais como Raiz Quadrada da Média dos Desvios ao Quadrado (RMSE) e coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNs).

Beskow et al. (2011) sugerem ainda que após a escolha dos parâmetros de calibração há a necessidade de definir a faixa de variação a que cada parâmetro será submetido, para que o algoritmo de otimização seja capaz de buscar valores mais representativos. De acordo com os autores, enquanto alguns parâmetros têm seus valores estabelecidos na literatura, outros são desconhecidos e conseqüentemente recebem valores sugeridos de condições semelhantes.

Deve-se mencionar que alguns parâmetros podem ter variação ampla e inaceitável. Por essa razão, é importante realizar uma análise, em uma tentativa de reduzir os intervalos e as incertezas associadas aos parâmetros, evitando

assim um número exagerado de estimativas irreais e a ineficiência do algoritmo de otimização (BLASONE; MADSEN; ROSBJERG, 2008).

De acordo com Beskow, Mello e Norton (2011), a calibração pode ser empregada de forma manual ou automática. A calibração manual é subjetiva, demorada e potencialmente tendenciosa, sendo os procedimentos de calibração automática capazes de superar esses problemas (ECKHARDT; FOHRER; FREDE, 2005).

De acordo com Arabi et al. (2007), o modelo calibrado deve ser executado com um conjunto de dados medidos não utilizados na fase de calibração. Essa etapa é conhecida como validação e é útil para verificar se as previsões são aceitáveis mesmo em conjuntos de dados diferentes.

### **2.3 Métodos de otimização aplicados a modelos de simulação da irrigação por aspersão**

De acordo com Prado (2008), na tentativa de ajustar os parâmetros dos modelos de simulação da distribuição de água às condições operacionais dos aspersores vários métodos e procedimentos têm sido empregados.

Para ajuste dos seis parâmetros do modelo de Richards e Weatherhead (1993), os quais representam a distorção no padrão molhado do aspersor, ocasionada pelo vento, Prado (2008) fez uso de dois métodos: método das estimativas descendentes, para uma estimativa inicial dos valores dos parâmetros e método de Newton para sistemas de equações não lineares, para estimativa final dos parâmetros de ajuste.

De acordo com Simunek e 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, de acordo com Prado (2008), a partir da aproximação

inicial dos parâmetros do modelo, efetuada com o método das estimativas descendentes, deve ser utilizado o método de Newton para uma aproximação mais apropriada dos parâmetros.

Gillies e Smith (2005) e Smith et al. (2008) utilizaram uma rotina de otimização em que os parâmetros foram incrementados individualmente até o erro entre dados medidos e simulados não poder mais ser reduzido.

Faria et al. (2012) buscando calibrar os seis parâmetros empíricos do modelo de Richards e Weatherhead (1993), utilizaram o método de otimização global *Shuffled Complex Evolution (SCE – UA)*, desenvolvido na Universidade do Arizona (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). De acordo com os autores o método demonstrou ser eficaz no ajuste dos parâmetros do modelo, para aspersores de tamanho médio, reproduzindo de forma satisfatória a distorção do padrão de distribuição de água desses aspersores.

### **2.3.1 *Shuffled Complex Evolution (SCE – UA)***

O método *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)* é uma técnica de otimização global que combina os esforços de quatro conceitos necessários para a otimização global (DUAN; GUPTA; SOROOSHIAN, 1993). O método inclui uma combinação de abordagens aleatórias e determinísticas, o conceito de agrupamento, o conceito de evolução sistemática de um conjunto de dados no espaço amostral em conformidade com melhoria global e o conceito de evolução competitiva para otimização (BESKOW; MELLO; NORTON, 2011; FARIA et al., 2012).

Conforme descrito por Duan, Sorooshian e Gupta (1992), o SCE – UA é dividido em quatro etapas. Primeiramente, uma amostra inicial é gerada aleatoriamente dentro do espaço amostral de cada um dos parâmetros a serem ajustados, tendo cada parâmetro um valor de limite superior e um valor de limite inferior; sendo então todos os pontos classificados de acordo com a função

objetivo utilizada. Posteriormente, os pontos são agrupados em diferentes complexos, que são desenvolvidos separadamente, segundo o algoritmo *Shuffled Complex Evolution – SCE-UA*, de Nelder e Mead (1965 citado por DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). Os complexos são então misturados e outros subcomplexos são criados com base nas informações fornecidas pelos complexos anteriores. O último passo é verificar os critérios de convergência, de modo que os processos de evolução e substituição sejam repetidos até que os critérios de convergência sejam satisfatórios.

O método *SCE-UA* contém alguns parâmetros que têm influência sobre o seu desempenho (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1994), devendo ser dada atenção especial à escolha dos mesmos: (a)  $p$ , o número de complexos; (b)  $m$ , o número de pontos em um complexo ( $\geq 3$ ); (c)  $q$ , o número de pontos em um subcomplexo ( $2 \leq q \leq m$ ); (d)  $p_{\min}$ , o número mínimo de complexos ( $1 \leq p_{\min} \leq p$ ); (e)  $\alpha$ , o número consecutivo de valores gerados por cada subcomplexo ( $\geq 1$ ) e (f)  $\beta$ , o número de evoluções de cada complexo ( $\geq 1$ ).

O número de parâmetros ( $n$ ) está relacionado com a complexidade do problema (DUAN; GUPTA; SOROOSHIAN, 1993; DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). Duan, Sorooshian e Gupta (1994) recomendam alguns valores-padrão e equações para calcular parâmetros como: (a)  $m = 2n + 1$ , (b)  $q = n + 1$ ; (c)  $\alpha = 1$ , e (d)  $\beta = m$ .

O passo a passo do método *SCE-UA* é ilustrado nas Figuras 2 e 3, com o intuito de demonstrar a evolução das etapas relativas a esse algoritmo.

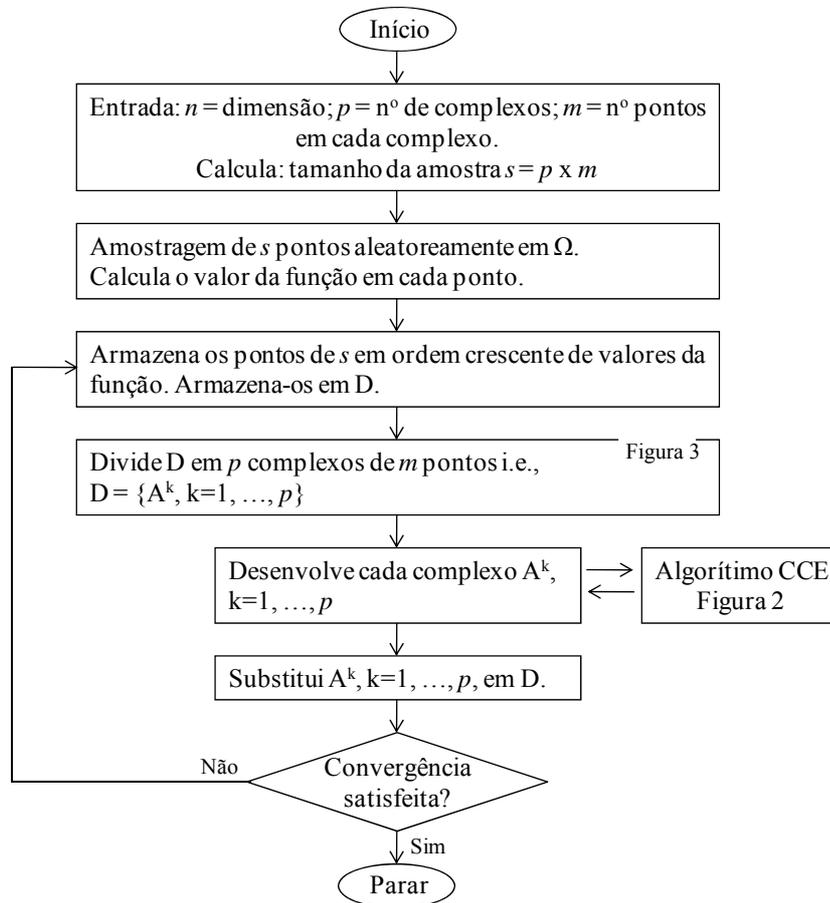


Figura 2 Fluxograma representativo do método *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)*

Fonte: Faria (2011)

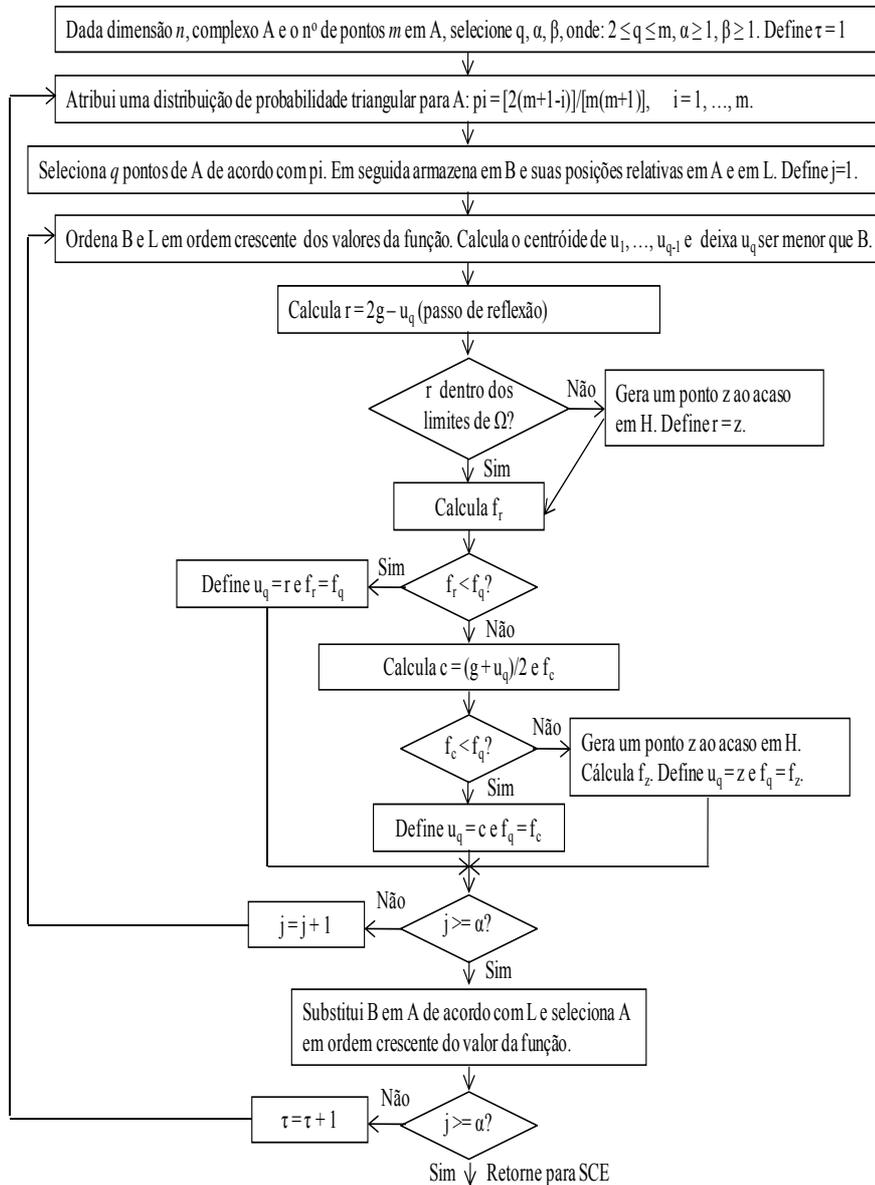


Figura 3 Fluxograma representativo do algoritmo *Competitive Complex Evolution (CCE)*

Fonte: Faria (2011)

### 3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. O modelo SIA foi capaz de prever a taxa de aplicação de água do aspersor e a uniformidade de distribuição de água do sistema de forma adequada em ambos os estágios: calibração e validação.
2. O *Método Shuffled Complex Evolution (SCE – UA)* demonstrou alta eficiência, apresentando elevados índices de qualidade do ajuste, além de rápida convergência.
3. O modelo permite simular, de forma eficiente, sob uma abordagem simples, a distribuição de água de aspersores operando sob condições de vento. Tais características tornam o SIA uma ferramenta eficaz no auxílio à tomada de decisão quanto ao manejo da irrigação, tanto para a fase de projeto quanto para sistemas já instalados.

## REFERÊNCIAS

- ARABI, M. et al. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 333, p. 459-471, 2007.
- BESKOW, S. et al. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, Amsterdam, v. 83, n. 6, p.160-171, Sept. 2011.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 265-274, May/June 2011.
- BLASONE, R.; MADSEN, H.; ROSBJERG, D. Uncertainty assessment of integrated distributed hydrological model using GLUE with Markov chain Monte Carlo sampling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 353, n. 1/2, p. 18-32, May 2008.
- COLOMBO, A.; PRADO, G.; OLIVEIRA, H. F. E. **Modeling wind effects on travelling gun sprinkler water application uniformity**. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009. Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=27276&t=2&redir=&redirType=>>>. Acesso em: 23 jan. 2012.
- CONCEIÇÃO, M. A. F.; COELHO, R. D. Simulating wind effect on micro sprinkler water distribution. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 205-209, 2003.
- DUAN, Q.; GUPTA, V.; SOROOSHIAN, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. **Journal of Optimization Theory and Applications**, New York, v. 76, n. 3, p. 501-521, May/June 1993.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, July/Aug. 1992.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 158, n. 3/4, p. 265-284, June 1994.

ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. Automatic model calibration. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 3, p. 651-658, Feb. 2005.

FARIA, L. C. et al. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 19-27, 2009.

FARIA, L. C. et al. Modelagem dos efeitos do vento na uniformidade da irrigação por aspersão: Aspersores de tamanho médio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 133-141, 2012.

FARIA, L.C. **Modelagem da aplicação de água de aspersores de tamanho médio operando em condições de vento**. 2011. 81p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola/Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

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

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

GILLIES, M. H.; SMITH, R. J. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. **Irrigation Science**, New York, v. 24, n. 1, p. 25-35, 2005.

GOLDENBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 36, p. 2086-2097, 2008.

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, 1994.

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

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

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

OLIVEIRA, H. F. E.; COLOMBO, A.; FARIA, L. C. Modelagem dos efeitos do vento sobre as dimensões do alcance do jato de um canhão hidráulico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p. 818-824, 2009. Supl.

PLAYÁN, E. et al. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 89-100, 2006.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Aplicativo computacional para simulação da distribuição espacial de água aplicada por canhões hidráulicos em sistemas autopropelidos de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16., 2006, Goiânia. **Anais...** Brasília: ABID, 2006. 1 CD ROM.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação: modelagem com o Simulasoft. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 51-62, 2010a. Parte I.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação: validação do Simulasoft. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 63-74, 2010b. Parte II.

PRADO, G. **Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento**. 2008. 121p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola/Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

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

ROCHA, F. A. et al. 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.; KOSTRINSKY, N. Wind, sprinkler pattern and system design. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 101, n. 4, p. 251-264, 1975.

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

SMITH, R. J. et al. A decision support model for travelling gun irrigation machines, **Biosystems Engineering**, London, v. 100, n. 1, p. 126-136, 2008.

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

ZAPATA, N. et al. Simulation of a collective solid-set sprinkler irrigation controller for optimum water productivity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 135, n. 1, p. 13-24, 2009.

## ARTIGO 1

### SIA: Modelo para simulação da irrigação por aspersão

#### Parte I: Descrição e aplicabilidade do modelo

**Resumo:** Modelos computacionais de simulação da aplicação de água possibilitam, de maneira rápida, efetuar a análise do desempenho de sistemas de irrigação nas mais diferentes condições operacionais e ambientais, antes e depois da instalação em campo. O objetivo deste trabalho é detalhar o programa computacional desenvolvido, denominado Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA), o qual emprega uma descrição semiempírica proposta por Richards & Weatherhead para prever a distorção do padrão molhado do aspersor causada pelo vento. O SIA foi desenvolvido em *Delphi* (ambiente *Windows*) e conta com o método de otimização global *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)*, no intuito de buscar um conjunto de parâmetros do modelo de Richards & Weatherhead, de modo a minimizar a função objetivo que calcula os desvios entre dados observados e simulados de distribuição de água de aspersores. Foi possível constatar que o modelo pode prever a taxa de aplicação de água do aspersor e a uniformidade de distribuição de água de sistemas autopropelidos de irrigação, caracterizando-se como uma ferramenta eficiente na simulação da aplicação de água de aspersores em condições de campo diferentes das observadas na calibração e na validação.

**Palavras-chave:** Vento. Modelagem. Sistema autopropelido.

**SIA: Semi empirical model for simulation of sprinkler irrigation****Part I: Model description and applicability**

**Abstract:** Computer simulation models of water application provides, quickly, making the performance analysis of irrigation systems in the most different operational and environmental conditions, before and after they are installed at the field. The objective of this paper was to detail the computer program that was developed called Simulation of Sprinkler Irrigation (SIA), which uses a semi empirical description proposed by Richards & Weatherhead to predict the distortion of the wetted pattern of sprinklers caused by wind. The SIA was developed in Delphi (Windows Environment) and counts on the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) global optimization method, in order to achieve a set of parameters by Richards & Weatherhead model, aiming for minimize the objective function which calculates the deviation of the observed data and simulated data of the water distribution from sprinklers. It was possible to see that the model can predict the rate of water application and the uniformity of travelling gun irrigation machines, characterized as an efficient tool to simulate the water application from sprinklers under different field conditions from those observed in calibration and validation.

**Keywords:** Wind. Modeling. Travel irrigation machines.

## INTRODUÇÃO

O tema recursos hídricos tem sido, indiscutivelmente, um dos mais abordados pela sociedade nos últimos anos. Em termos quantitativos sabe-se que tanto no Brasil quanto em outros países a maior parte da água é destinada para o setor da agricultura irrigada, onde se constata sérias preocupações com relação à eficiência da utilização da água.

Buscando utilizar de maneira mais eficiente os recursos hídricos disponíveis, na agricultura irrigada, modelos matemáticos de simulação da uniformidade de aplicação de água possibilitam efetuar, de maneira rápida, a análise do desempenho de sistemas de irrigação em diferentes condições operacionais e climáticas (Smith et al., 2008).

Nos últimos anos, diversos autores (Smith et al., 2008; Faria et al., 2009; Oliveira et al., 2009; Prado & Colombo, 2010a; Faria et al., 2012) têm se dedicado ao estudo de modelos que possibilitam a predição da distribuição de água dos sistemas de irrigação por aspersão, operando em condições de vento, visto que ensaios de campo são difíceis e morosos.

Em geral, duas abordagens principais têm sido utilizadas nesses modelos: i) abordagem determinística, em que se aplica a teoria balística tradicional para determinar a trajetória de voo individual das gotas de água; e ii) os métodos empíricos, que envolvem extrapolação a partir da medida da distribuição de água de aspersores, para várias velocidades e direções de vento, para o mesmo bocal, pressão de operação e ângulo de saída do jato de água (Smith et al., 2008).

Simulações baseadas na teoria balística já foram aplicadas com sucesso em estudos de distribuição espacial da água aplicada por pequenos e médios aspersores (Playán et al., 2006; Zapata et al., 2009). No entanto, para canhões hidráulicos, as dificuldades de se aplicar o modelo balístico fizeram com que diversos pesquisadores (Granier et al., 2003; Smith et al., 2008, Faria et al.,

2009, Oliveira et al., 2009, Prado & Colombo, 2010a) optassem pela adoção do modelo semiempírico de Richards & Weatherhead (1993), que é composto por um pequeno número de parâmetros de calibração e baseado em pelo menos três ensaios de campo de distribuição de água do canhão (um sem vento e dois com vento).

A calibração desses modelos visa à otimização de parâmetros, característicos do aspersor, que possa representar uma ampla faixa de condições operacionais e climáticas. Na literatura, diversos tipos de métodos de otimização, bem como diferentes classificações, são encontradas, uma vez que nas últimas décadas as diversas aplicabilidades desses métodos têm sido amplamente discutidas.

Duan et al. (1992) descrevem uma classe intitulada “métodos de otimização global”, na qual se destaca o *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)*. Esse método emprega uma técnica de otimização que combina os esforços de quatro conceitos necessários para a otimização global (Duan et al., 1993). O *SCE-UA* inclui uma combinação de abordagem aleatória e determinística, o conceito de agrupamento, o conceito de evolução sistemática de um conjunto de dados no espaço amostral, em conformidade com a melhoria global e o conceito de evolução competitiva para otimização (Beskow et al., 2011; Faria et al., 2012).

O objetivo deste trabalho foi descrever o modelo SIA, seus parâmetros e sua aplicabilidade e apresentar os resultados oriundos da simulação para uma determinada configuração do aspersor Plona-RL250.

## MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foi desenvolvido um programa computacional denominado Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA), baseado no modelo semiempírico de Richards & Weatherhead (1993), o qual foi desenvolvido com o objetivo de identificar as configurações dos sistemas autopropelidos de irrigação, operando sob diferentes combinações de velocidade e direção de vento, que proporcionam maior uniformidade de distribuição da água aplicada pelo sistema.

A seguir são apresentadas as principais equações que descrevem o modelo matemático proposto por Richards & Weatherhead (1993) e que serviram como base para o cálculo da distorção do padrão molhado do aspersor no SIA. As Eqs. 1 e 2 foram utilizadas para descrever as coordenadas do ponto de impacto da água na ausência de vento ( $x_{v0}, y_{v0}$ ) e as coordenadas do ponto de impacto na presença de vento ( $x_v, y_v$ ).

$$x_v = x_{v0} - [A + B \cdot (r/R) + C \cdot (r/R)^2] \cdot V - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + \dots + F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot \sqrt{\text{sen}^2 e \cdot \left(\frac{x_{v0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{v0}}{r}\right)^2} \cdot \frac{x_{v0}}{r} \quad (1)$$

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

em que:

$x_v, y_v$  - coordenadas do ponto de impacto da água em condições de vento (m),

$x_{v0}, y_{v0}$  - coordenadas do ponto de impacto da água na ausência de vento (m),

$r = (x_{v0}^2 + y_{v0}^2)^{1/2}$  - distância radial do aspersor ao ponto de impacto sem vento (m),

R - raio de alcance do aspersor operando na ausência de vento (m),

V - velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

e - ângulo de saída do jato de água em relação ao plano horizontal (graus)

A, B, C, D, E e F - parâmetros empíricos do modelo

Nas Eqs. 1 e 2 os termos  $(A+B(r/R)+C(r/R)^2)$  e  $(D(r/R)+E(r/R)^2+F(r/R)^3)$  representam, respectivamente, o efeito da deriva pelo vento e o efeito da interrupção do fluxo induzido de ar junto ao jato de água (Oliveira et al., 2009).

O cálculo da taxa da aplicação  $I_v$ , em  $x_v, y_v$  na presença de vento é realizado

por meio da Eq. 3:

$$I_v = \frac{I(r/R)_0}{\left( \frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}} \cdot \frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}} \right)}$$

(3)

Excluído: ¶

em que:

$I_v$  - intensidade de aplicação de água em  $x_v, y_v$  (condições de vento,  $\text{mm h}^{-1}$ )

$I(r/R)_0$  - intensidade de aplicação de água em  $x_{v0}, y_{v0}$ , (baseada na curva de aplicação de água do aspersor operando na ausência de vento,  $\text{mm h}^{-1}$ )

$\frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}}$  e  $\frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}}$  - obtidos diferenciando-se as Eqs. 1 e 2 em relação a  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$ .

Mais detalhes desse modelo podem ser encontrados em Richards & Weatherhead (1993).

O SIA foi implementado em *Delphi* (ambiente *Windows*), sendo constituído por uma interface interativa e fácil de usar por parte de usuários. Visando armazenar dados de ensaios de campo com diferentes configurações de aspersores, também foi implementado no SIA um banco de dados onde o usuário pode criar, editar, salvar e excluir dados referentes a perfis radiais de aspersores, bem como vazão, raio de alcance, dentre outros.

Atualmente, o SIA é constituído de uma base de dados com 160 perfis radiais de aplicação de água do aspersor Plona - RL250, correspondente às possíveis combinações entre 8 bocais principais (14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 e 28 mm), 3

bocais auxiliares (5, 6 e 7 mm) mais a possibilidade de trabalhar sem bocal auxiliar e 5 pressões de serviço (294, 392, 490, 580 e 686 kPa) desse aspersor. As características operacionais, obtidas em ensaios de laboratório, foram obtidas por Prado & Colombo (2007).

Seguindo metodologia descrita por Prado & Colombo (2005), cada perfil radial deve constar de 20 valores de intensidade de precipitação adimensional, tomados em vinte distâncias adimensionais (que variam desde 0,025 até 0,975 do raio de alcance, em intervalos regulares de 0,05). Os valores de vazão e raio de alcance, necessários para converter o perfil de aplicação de água para sua forma dimensional, também compõem a base de dados do modelo.

Para este estudo o SIA conta ainda com 53 ensaios de campo, do Plona-RL250, realizados pelo método da malha, sob condições de vento ( $V > 0,9 \text{ m s}^{-1}$ ), com o auxílio de uma matriz (14x14) de coletores, espaçados de 6 m, perfazendo uma área de 84 x 84 m, em cujo centro foi instalado o aspersor do Plona-RL250.

Além do módulo de cadastramento das condições operacionais de aspersores, o SIA é composto por outros três módulos de aplicação: calibração, validação e simulação. Esses módulos podem ser executados sequencialmente ou em etapas específicas, conforme necessidade do usuário.

### **Calibração**

O modelo SIA emprega, conforme descrito por Oliveira et al. (2009), a teoria semiempírica baseada no modelo de Richards & Weatherhead (1993) no intuito de ajustar, com base em ensaios de campo da distribuição da água aplicada por aspersores, os seis parâmetros empíricos adimensionais (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R) do referido modelo.

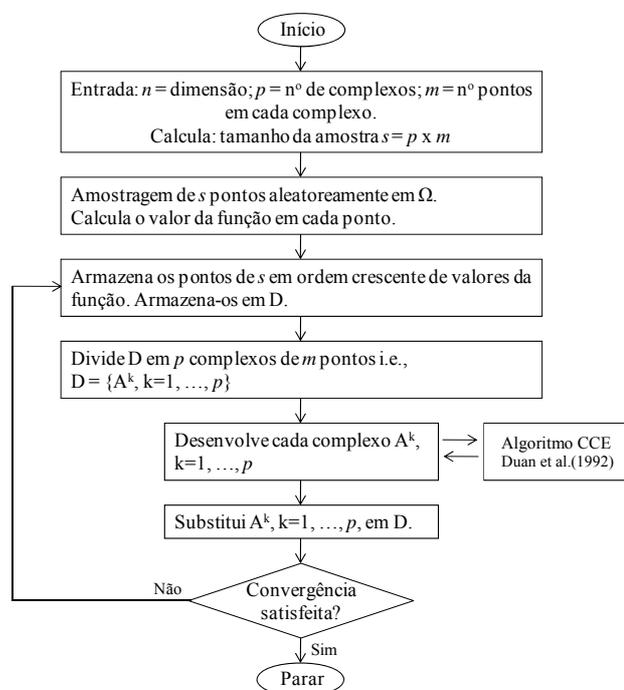
O método de calibração automático conhecido como *Shuffled Complex Evolution - SCE-UA* (Duan et al., 1992) foi implementado no SIA, no sentido de otimizar os parâmetros empíricos do modelo, através do cálculo do valor de uma função objetivo, a qual busca minimizar os desvios entre valores de intensidade de aplicação de água observados nas matrizes de ensaios de campo e estimados pelo modelo.

O *Shuffled Complex Evolution - SCE-UA*, contém alguns parâmetros que têm influência direta sobre o seu desempenho (Duan et al., 1994), devendo segundo observações feitas por Beskow et al. (2011) e Faria et al. (2012) ser dada atenção especial à escolha dos mesmos.

- a)  $p$  - o número de complexos,
- b)  $m$  - o número de pontos em um complexo ( $m = 2n + 1$ ; logo  $m \geq 3$ ),
- c)  $q$  - o número de pontos em um subcomplexo ( $q = n + 1$ ; logo  $2 \leq q \leq m$ ),
- d)  $p_{\min}$  - o número mínimo de complexos ( $1 \leq p_{\min} \leq p$ ),
- e)  $\alpha$  - o número consecutivo de valores gerados por cada subcomplexo ( $\geq 1$ ),
- f)  $\beta$  - o número de evoluções de cada complexo ( $\beta = m$ ).

O número de parâmetros ( $n$ ) está relacionado com a complexidade do problema (Duan et al., 1992, 1993), sendo os valores-padrão e as equações para cálculo dos parâmetros, descritos anteriormente, os recomendados por Duan et al. (1994).

Resumidamente, conforme descrito por Beskow et al. (2011) ao utilizar o método *Shuffled Complex Evolution - SCE-UA* (Duan et al., 1992) na área de Hidrologia e por Faria et al. (2012) ao utilizá-lo no ajuste de parâmetros de distribuição de água de aspersores de tamanho médio, esse método se desenvolve conforme as etapas descritas no fluxograma a seguir:



**Figura 1.** Fluxograma representativo do método *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)*

Fonte: Faria (2011)

## Validação

Neste módulo, os parâmetros adimensionais do modelo de Richards & Weatherhead (1993) correspondentes à deriva (A/R, B/R e C/R) e à interrupção do fluxo de ar induzido (D/R, E/R e F/R), obtidos a partir da calibração, são mantidos constantes e utilizados para simular a distribuição espacial da água aplicada pelo aspersor, para condições climáticas diferentes das utilizadas na calibração.

### Análise dos ajustes

Para a etapa de calibração os critérios de convergência são estabelecidos com o objetivo de maximizar os coeficientes de eficiência, minimizando a medida dos erros, através da análise dos desvios entre malhas de intensidade de aplicação de água observadas em ensaios de campo e simuladas pelo modelo. Cabe salientar que os mesmos índices estatísticos são utilizados para a etapa de validação, porém não como critério de convergência, haja vista que a calibração já foi realizada anteriormente. Para tal, foram computadas a soma do quadrado dos desvios (SQD,  $\text{mm}^2 \text{h}^{-2}$ ) e a raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado (RMSE,  $\text{mmh}^{-1}$ ), tomados em relação aos valores não nulos, correspondentes aos três pares de matrizes (estimados vs. observados), conforme Eqs. 4 e 5, respectivamente.

$$\text{SQD} = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} (I_{(i,j)\text{sim}} - I_{(i,j)\text{obs}})^2 \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} [(I_{(i,j)\text{sim}} - I_{(i,j)\text{obs}})^*]^2 \right\} / n_0} \quad (5)$$

em que:

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

$I_{(i,j)\text{obs}}$  - intensidade de aplicação de água no ponto de coordenadas (i,j) da malha observada em campo ( $\text{mm h}^{-1}$ ),

$n_0$  - número de pontos com desvio diferente de zero,

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

De forma complementar ao cálculo da SQD e da RMSE, a qualidade dos parâmetros do modelo de Richards & Weatherhead (1993) frente à aplicação de água de aspersores operando sob condições de vento, também é avaliada calculando-se o erro relativo entre valores de vazão simulados e observados (e,%), Eq.6, e o índice de confiança ou desempenho (c), Eq. 7, adaptado de Camargo & Sentelhas (1997).

$$e = (Q_{sim} - Q_{obs})/Q_{obs} \quad (6)$$

$$c = r \cdot d \quad (7)$$

com

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} (I_{(i,j)sim} - I_{(i,j)obs})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} (|I_{(i,j)sim} - \bar{I}_{obs}| + |I_{(i,j)obs} - \bar{I}_{obs}|)^2} \right] \quad (8)$$

em que:

$Q_{sim}$  – vazão total simulada ( $m^3h^{-1}$ ),

$Q_{obs}$  – vazão total observada ( $m^3h^{-1}$ ),

r – coeficiente de correlação,

d – índice de *Willmott*,

$\bar{I}_{obs}$  – média dos valores de intensidade de aplicação de água observados ( $mm h^{-1}$ ).

## Simulação

O SIA permite que nas simulações sejam feitas alterações nas configurações operacionais (bocais, pressão de serviço e ângulo de giro do aspersor) e nas condições de velocidade e direção do vento, sob as quais o sistema irá operar no

intuito de definir sob qual combinação o sistema proporcionará maior uniformidade de aplicação de água.

A simulação da distribuição de água de aspersores pode ser avaliada no SIA sob duas abordagens distintas:

a) condição de vento predominante: definida a configuração operacional do aspersor e as condições de velocidade média e direção predominante do vento, o aplicativo simula, com base nos parâmetros de calibração do modelo de Richards & Weatherhead (1993), correspondentes à deriva (A/R, B/R e C/R) e à interrupção do fluxo de ar induzido (D/R, E/R e F/R), a intensidade de aplicação de água em uma malha de 14 x 14, de coletores fictícios, com espaçamento previamente definido.

A partir da simulação do padrão de aplicação de água do aspersor o aplicativo possibilita transformar os valores de intensidade de precipitação das matrizes, simuladas ou observadas, em valores de lâminas de água aplicada ao longo de uma linha perpendicular à trajetória infinita de deslocamento linear de um aspersor. O passo seguinte consiste em simular a uniformidade de distribuição da água aplicada por equipamentos autopropelidos, operando sob diferentes espaçamentos de carregadores, sobrepondo lateralmente os valores da lâmina aplicada na linha perpendicular ao deslocamento do aspersor.

b) Condição de vento variável: o SIA permite a utilização de condições variáveis de vento (velocidade e direção), típicas da região para a qual se deseja fazer a simulação. Nesse caso, definida a configuração de operação do aspersor, é necessário indicar as condições de velocidade e direção do vento, registradas durante o período para o qual se deseja fazer a simulação, informando o intervalo de tempo sob o qual tais informações foram coletadas.

Seguindo metodologia descrita por Smith et al. (1993), os dados informados foram agrupados em 25 classes, compostas por combinações de velocidade e

direção de vento, derivadas da associação entre 8 direções (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO), cada qual associada a três intervalos de velocidades de vento (0 a 2; 2 a 4 e 4 a 6 m s<sup>-1</sup>), mais a condição de ausência de vento.

As intensidades de precipitação para uma determinada configuração do sistema são calculadas para cada classe (velocidade vs. direção do vento), incluindo a condição de ausência de vento. Tais combinações são então quantificadas de acordo com a porcentagem de ocorrência de cada evento e somadas junto, utilizando a Eq. 9, adaptada de Smith et al. (2008), para prever a aplicação de água do aspersor durante o evento avaliado.

$$i_k = \sum_{j=1}^n p_j \cdot i_{jk} \quad (9)$$

em que:

$i_k$  – intensidade sazonal de aplicação de água no ponto  $k$  para todas as condições de vento, mm h<sup>-1</sup>,

$p_j$  – frequência de ocorrência da combinação de velocidade e direção do vento, decimal,

$i_{jk}$  – intensidade individual de aplicação de água no ponto  $k$  para a condição de vento  $j$ , mm h<sup>-1</sup>,

$n$  – número de classes.

### **Modelagem da lâmina de água aplicada por sistemas autopropelidos**

Na Figura 2 está esquematizada a metodologia utilizada para transformar os valores de intensidade de precipitação das matrizes simuladas ou observadas, que representam a distribuição espacial da água aplicada pelo aspersor, operando de forma estacionária no centro da malha de coletores, em valores de lâminas de água aplicada ao longo de uma linha perpendicular à trajetória infinita de deslocamento linear de um aspersor. Essa metodologia, que é semelhante à

utilizada por Smith et al. (2008), tem como base a aplicação da Eq. 10, cujos elementos geométricos são definidos no esquema demonstrado na Figura 2.

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} (I_{0(i,j)} \cdot \Delta x)}{v} \quad (10)$$

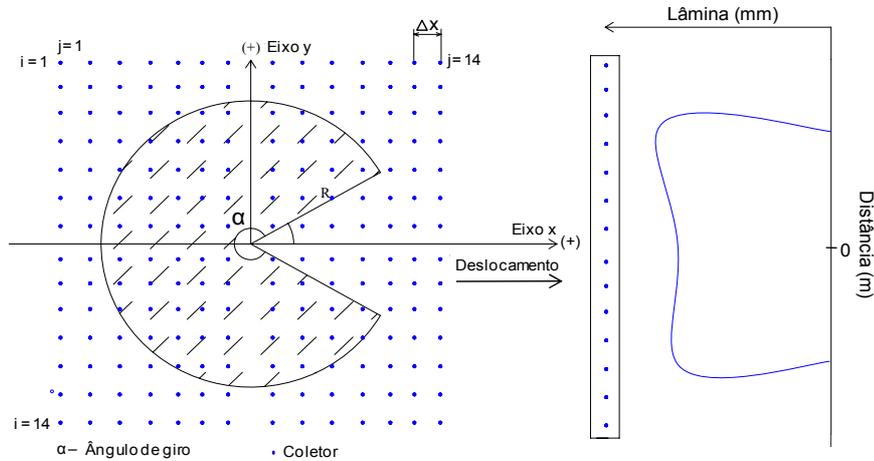
em que:

$L_i$  – lâmina, de índice  $i$  aplicada ao longo da linha perpendicular ao deslocamento linear do aspersor (mm),

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

$\Delta x$  – espaçamento regular entre coletores (m),

$v$  – velocidade de deslocamento linear do aspersor ( $\text{m h}^{-1}$ ).



**Figura 2.** Simulação das lâminas aplicadas em um perfil transversal através da integração dos valores de intensidade de precipitação observados na operação estacionária do aspersor

Nas simulações considera-se que o aspersor, com ângulo de giro  $\alpha$  ( $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ ), se desloca com velocidade linear ( $v$ ,  $m\ h^{-1}$ ) constante, ao longo de uma trajetória infinita, paralela ao eixo  $x$  do sistema de coordenadas dos ensaios de campo.

Para o perfil de aplicação de água de autopropelidos, o efeito do ângulo de giro menor que  $360^\circ$  sobre os valores de intensidade de precipitação da malha estacionária de distribuição de água é reproduzido de acordo com o seguinte esquema: (i) nos pontos de amostragem situados fora do setor molhado, os valores de intensidade de precipitação são zerados; (ii) nos pontos de amostragem situados no interior do setor molhado, os valores de intensidade de precipitação são corrigidos, conforme a Eq. 11

$$I_{0(i,j)} = \frac{360 \cdot I_{(i,j)}}{\alpha} \quad (11)$$

em que:

$I_{0(i,j)}$  – taxa de aplicação de água, no ponto de amostragem  $(i,j)$  da malha estacionária do aspersor operando com ângulo menor que  $360^\circ$  ( $mm\ h^{-1}$ )

$I_{(i,j)}$  – taxa de aplicação de água, no ponto de amostragem  $(i,j)$  da malha estacionária do aspersor operando com ângulo de  $360^\circ$  ( $mm\ h^{-1}$ )

$\alpha$  – ângulo do setor molhado pelo aspersor (graus).

Para simulação da uniformidade de distribuição da água aplicada por equipamentos autopropelidos operando sob diferentes espaçamentos de carregadores, os valores de lâmina aplicada na linha perpendicular ao deslocamento do aspersor são sobrepostos lateralmente, seguindo metodologia preconizada pela Norma ISO 8224-1 (ISO, 2004).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme o modelo e os procedimentos de cálculo descritos na metodologia, o aplicativo Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA) permite a simulação da distribuição de água de canhões hidráulicos, operando em sistemas autopropelidos de irrigação, deslocando-se com velocidade linear ( $v$ ,  $m\ h^{-1}$ ) ao longo de uma trajetória infinita, no sentido positivo do eixo  $x$  do sistema de coordenadas de campo.

O SIA é composto pelos seguintes módulos de aplicação: calibração, validação, simulação e cadastro das condições operacionais de aspersores. As etapas de aplicação do SIA podem ser executadas sequencialmente ou de forma específica, de acordo com as necessidades do usuário.

### Calibração

No menu calibração, o usuário seleciona, a partir das características operacionais e climáticas cadastradas no banco de dados do aplicativo, sob quais condições o modelo será ajustado. A evolução do modelo ocorre a partir de três etapas distintas, as quais são descritas a seguir.

Etapa I. As configurações operacionais do aspersor são dadas a partir do banco de dados do SIA, o qual as disponibiliza na medida em que o usuário vai selecionando as opções. Para esse estudo o SIA armazenou em seu banco de dados diversas combinações (diâmetro dos bocais e pressão de serviço) para o aspersor Plona – RL250, de modo que até 160 diferentes perfis radiais de distribuição de água podem ser testados. Em função dos parâmetros selecionados, o aplicativo determina a vazão, o raio de alcance, a intensidade de aplicação de água e o perfil radial do aspersor. Na Figura 3 pode ser observada a escolha das três configurações do aspersor (16 x 0 mm x 490 kPa, 16 x 6 mm x 392 kPa e 18 x 5 mm x 490 kPa, respectivamente) utilizadas para a calibração do modelo, realizada neste estudo.

**Figura 3.** Formulário para seleção das três configurações do aspersor Plona RL-250 a serem utilizadas para calibração do SIA

Etapa II. No formulário representado na Figura 4 são demonstradas as malhas de ensaios de campo, cadastradas no banco de dados do SIA e selecionadas para calibração. Podem-se visualizar ainda os valores dos parâmetros do modelo que melhor ajustam as malhas simuladas às malhas observadas em ensaios de campo.

**Figura 4.** Formulário para seleção da velocidade e direção do vento e malhas de coletores, empregados no ajuste do modelo e parâmetros empíricos adimensionais (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R), malhas simuladas e coeficientes estatísticos para verificação do ajuste

Etapa III. Na Figura 5 são demonstrados os parâmetros de simulação utilizados pelo método *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)*, bem como a amplitude dos valores sob a qual os parâmetros do modelo serão ajustados. Observa-se ainda, a seleção dos critérios de parada da rotina, dados no SIA pelo número máximo de iterações ou ainda por um valor limiar da função objetivo utilizada.

**Figura 5.** Formulário para seleção dos parâmetros de simulação utilizados pelo método *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)* e da amplitude dos valores sob a qual os coeficientes do modelo são ajustados

Sequencialmente, a partir das evoluções da rotina o aplicativo fornece, conforme demonstrado na Figura 4, os valores dos seis parâmetros empíricos adimensionais (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R) do modelo de Richards & Weatherhead (1993), bem como a análise estatística, referente aos desvios entre valores de intensidade de aplicação de água estimados pelo modelo e observados em ensaios de campo. Cabe salientar que o SIA fornece as estatísticas não somente para o melhor conjunto de parâmetros, mas para todas as iterações testadas pelo modelo.

Conforme visualizado na Figura 4, para os ensaios selecionados, os parâmetros de Richards & Weatherhead (1993) calibrados pelo SIA (A/R =

0,0354 s.m<sup>-1</sup>, B/R = 0,0105 s.m<sup>-1</sup>, C/R = 0,0009 s.m<sup>-1</sup>, D/R = 0,0103 s.m<sup>-1</sup>, E/R = 0,3598 s.m<sup>-1</sup>, F/R = -0,2923 s.m<sup>-1</sup>) resultaram em uma SQD igual a 1579,54 mm<sup>2</sup> h<sup>2</sup> e RMSE iguais a 1,10, 1,18 e 1,88 mm h<sup>-1</sup>, para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.

### **Validação**

As etapas desenvolvidas pelo aplicativo na validação são bastante similares ao demonstrado na Figura 4, com a diferença que na validação somente é necessário escolher a configuração para um aspersor e importar uma única malha. Além disso, na validação o usuário ou seleciona a opção de usar os coeficientes ajustados na etapa de calibração ou utiliza outro conjunto de parâmetros para teste.

### **Simulação**

O módulo Simulação também pode ser dividido em três etapas distintas, as quais indicam uma sequência adequada em que os dados de entrada devem ser inseridos para a execução das simulações:

Etapa I. Nessa etapa são inseridos os dados básicos a respeito da configuração de operação do aspersor (marca, modelo, diâmetro do bocal principal, diâmetro do bocal auxiliar, pressão de serviço, ângulo de saída do jato de água e ângulo de giro), obtidos em ensaios de laboratório. Além disso, também são definidas as condições de velocidade e direção do vento sob as quais a simulação será realizada. Por último, selecionam-se os parâmetros do modelo de Richards & Weatherhead (1993), obtidos na calibração ou mesmo valores advindos de literatura especializada.

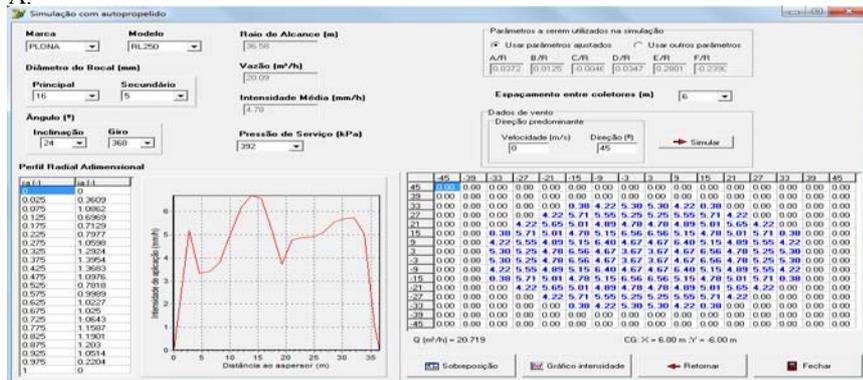
Etapa II. Após a simulação dos valores de intensidade de precipitação das matrizes estacionárias, as mesmas são transformadas em valores de lâminas de água aplicada ao longo de uma linha perpendicular à trajetória infinita de

deslocamento linear de um aspersor. Para tal, é necessário informar a velocidade de deslocamento sob a qual o aspersor se movimenta ao longo do carreador.

Etapa III. A partir do perfil transversal de aplicação de água do aspersor, obtido na etapa anterior, calcula-se, para diversos espaçamentos entre carreadores, a uniformidade de aplicação das lâminas simuladas.

Seguindo as etapas anteriormente descritas, as simulações podem ainda ser executadas sob duas perspectivas diferentes: condição de vento predominante (Figura 6 A) e condição de vento variável (Figura 6 B).

A.



B.

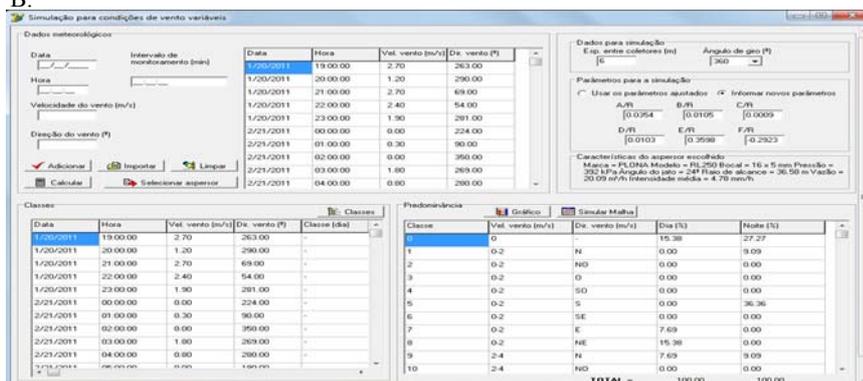


Figura 6. Formulário de simulação da distribuição de água do aspersor para a condição de vento predominante (A) e para a condição de vento variável (B)

Diferentemente da primeira condição, em que se considera a velocidade média e a direção predominante do vento para um determinado ensaio, na condição de vento variável, as condições de velocidade e direção do vento utilizadas advêm de uma série histórica com as leituras obtidas a partir de uma estação meteorológica, ou mesmo a partir de um arquivo em *Excel*, contendo além dos valores de velocidade e direção do vento, uma relação com dia, hora e intervalo de coleta dos dados.

Para o caso da condição de vento variável o SIA apresenta, seguindo recomendações de Yacoubi et al. (2010), os valores de intensidade de precipitação, lâmina de água e coeficiente de uniformidade de Christiansen, para os períodos diurno (06:00 às 18:00 h) e noturno (18:00 às 06:00 h), separadamente, ampliando a gama de recomendações do aplicativo.

A partir dos parâmetros de calibração demonstrados na Figura 4 foi realizada uma simulação, com o auxílio do SIA, para a condição de vento variável e o aspersor Plona-RL250 operando em condições distintas de bocal e pressão de serviço (16 x 0 mm x 392 kPa). Os dados horários de velocidade e direção de vento utilizados foram os da região da Estação de Monitoramento Convencional Rio Verde – GO, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o período compreendido entre as 19:00 horas do dia 20/01/2011 e as 19:00 horas do dia 21/01/2011.

Na Figura 7 A, é possível visualizar as malhas de distribuição de água do aspersor Plona RL-250, resultante das simulações realizadas a partir das condições operacionais e climáticas citadas anteriormente. Na Figura 7 B, são demonstradas as lâminas da água aplicada ao longo de uma linha perpendicular à trajetória infinita de deslocamento linear do aspersor, considerando o aspersor deslocando-se a  $50 \text{ m h}^{-1}$ , bem como o coeficiente de Christiansen (CUC - %), simulado em função do espaçamento entre carregadores, expresso em porcentagem do diâmetro molhado (DM - %) do aspersor.

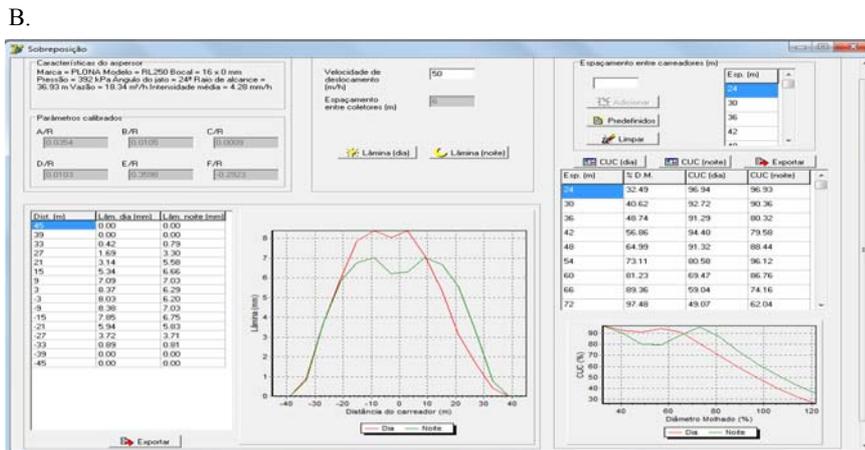
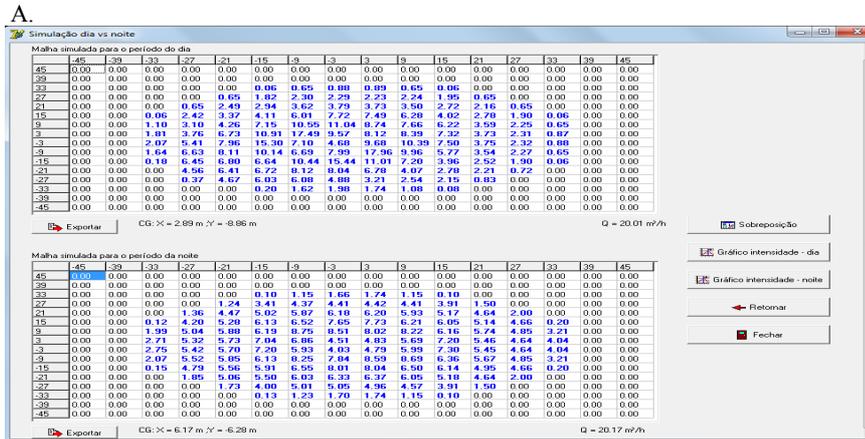
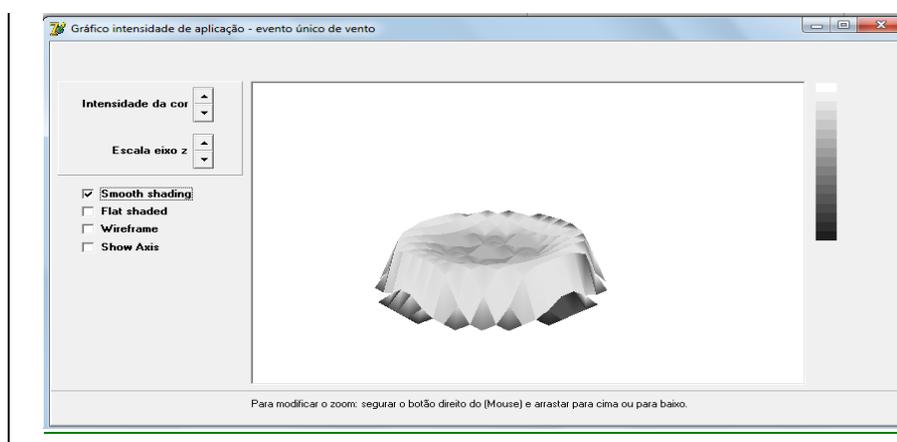


Figura 7. Formulários de simulação das malhas de distribuição de água (A) e da sobreposição das lâminas de água aplicadas ao longo de uma linha perpendicular à trajetória infinita de deslocamento linear do aspersor juntamente com uniformidade de aplicação de água do sistema (B)

A partir das malhas de distribuição de água observadas nas Figuras 6 A e 7 A, visando demonstrar graficamente a influência do vento no padrão de distribuição de água do Plona RL-250, operando sob condições de campo, o SIA plota superfícies tridimensionais da distribuição espacial da aplicação de água do aspersor (Figura 8).



**Figura 4.** Superfície tridimensional do padrão de aplicação de água do aspersor Plona-RL250

## CONCLUSÕES

O modelo Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA) permite simular, de forma eficiente, sob uma abordagem simples, a distribuição de água de aspersores operando sob condições de vento e a uniformidade de aplicação de água de sistemas autopropelidos de irrigação. O modelo permite ainda caracterizar irrigações para períodos distintos. Tais características tornam o SIA uma ferramenta de grande aplicabilidade para auxílio à tomada de decisão quanto à seleção das condições operacionais de sistemas autopropelidos de irrigação, tanto para a fase de projeto quanto para sistemas já instalados.

## **AGRADECIMENTOS**

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pela bolsa de estudos do primeiro autor.

Aos coautores, professor PhD. Alberto Colombo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), aos professores Dr. Samuel Beskow e Dr. Lessandro Coll Faria da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e ao professor Dr. Giuliani do Prado da Universidade Estadual de Maringá (UEM), pela valiosa colaboração na execução deste trabalho.

**LITERATURA CITADA**

- Beskow, S.; Mello, C. R.; Norton, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.68, n.3, p.265-274, May/June 2011.
- Camargo, A. P. de; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- Duan, Q.; Gupta, V.; Sorooshian, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, New York, v. 76, n. 3, p. 501-521, May/June 1993.
- Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, Washington, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, July/Aug. 1992.
- Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 158, n. 3/4, p. 265-284, June 1994.
- Faria, L. C.; Colombo, A.; Oliveira, H. F. E. de; Prado, G. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.1, p.19-27, 2009.
- Faria, L. C. Modelagem da aplicação de água de aspersores médios operando em condições de vento. Lavras: UFLA, 2011. 90p. Tese Doutorado
- Faria, L. C.; Beskow, S.; Colombo, A.; Oliveira, H. F. E. de. Modelagem dos efeitos do vento na uniformidade da irrigação por aspersão: Aspersores de tamanho médio. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.16, n.2, p.133-141, 2012.

- Granier, J.; Molle, B.; Deumier, J. M. IRRIPARC-Part 1: Modeling spatial water distribution under a sprinkler in windy conditions. International workshop, Montpellier, 2003. p.14-19.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Estações meteorológicas. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 20/03/2011
- ISO - International Organization for Standardization. ISO 8224-1. Traveller irrigation machines: part 1: operational characteristics and laboratory and field test methods, 2004. 36 p.
- Oliveira, H. F. E.; Colombo, A.; Faria, L. C. Modelagem dos efeitos do vento sobre as dimensões do alcance do jato de um canhão hidráulico. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, (Suplemento), p.818-824, 2009.
- Playán, E.; Zapata, N.; Faci, J.M.; Tolosa, D.; Lacuerva, J.L.; Pelegri, J. Salvador, R.; Sanches, I.; Lafita, A. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agricultural Water Management*, v.84, n.1, p.89-100. 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.; 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. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação - Parte I: Modelagem com o Simulasoft. *Irriga, Botucatu*, v.15, n.1, p.51-62, 2010
- Richards, P. J.; Weatherhead, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research*. v.54, p.281-291. 1993.

Shull, H.; Dylla, A. S. Wind effects on water application patterns from a large, single nozzle sprinkler. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, v. 19, n. 3, p. 501-504, may/June 1976.

Smith, R. J.; Gillies, M. H.; Newell, G.; Foley, J. P. A decision support model for travelling gun irrigation machines, Biosystems Engineering, v.100, n.1, p.126-136, 2008.

Yacoubi, S.; Zayani, K.; Zapata, N.; Zairi, A.; Slatni, A.; Salvador, R. Playán, E. Day and night time sprinkler irrigated tomato: Irrigation performance and crop yield, Biosystems Engineering, v.107, p.25-35, 2010.

Zapata, N.; Playán, E.; Skhiri, A.; Burguete, J. Simulation of a collective solid-set sprinkler irrigation controller for optimum water productivity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.135, n.1, p.13-24, 2009

“Este artigo é uma versão preliminar, considerando que o conselho editorial da revista poderá sugerir alterações para adequá-lo ao seu próprio estilo”.

## ARTIGO 2

### SIA: Modelo para simulação da irrigação por aspersão

#### Parte II: Calibração e validação do modelo<sup>1</sup>

**Resumo:** A maioria dos modelos matemáticos de simulação da aplicação de água de aspersores requer laboriosos trabalhos de calibração e validação, além de exigirem dos computadores elevada capacidade de processamento. Este estudo foi realizado com o objetivo de calibrar e validar o modelo Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA), no que se refere à operação de canhões hidráulicos em condições reais de campo. O método de otimização global *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)* foi implementado no SIA, no intuito de ajustar os parâmetros de calibração, baseados no modelo semiempírico de Richards & Weatherhead, utilizando ensaios de campo do canhão Plona - RL250. Os parâmetros obtidos na calibração, para uma determinada configuração do aspersor, foram mantidos constantes e posteriormente usados na validação, para diferentes condições operacionais e de vento. Os valores médios encontrados de raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado, erro relativo entre valores de vazão ( $e$ ) e índice de confiança ou desempenho ( $c$ ) foram respectivamente 1,54 mm h<sup>-1</sup>, 0,97% e 0,88 durante a calibração e 1,36 mm h<sup>-1</sup>, 1,32% e 0,91 na etapa de validação.

**Palavras-chave:** Canhão hidráulico. Uniformidade. Modelo computacional.

**SIA: Semi empirical model for simulation of sprinkler irrigation****Part II: Application of model**

**Abstract:** The most of mathematical simulation models of water application from sprinklers requires calibration and validation laborious tasks and high processing power from computers as well. This study was conducted in order to calibrate and validate the simulation model for sprinkler irrigation (SIA), in referring to the operation of rain guns in real field conditions. The Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) global optimization method was implemented in the SIA, aiming for adjusting the calibration parameters, based on the semi empirical model by Richards & Weatherhead, using tests field from PLONA - RL250 rain gun. The parameters obtained through calibration, for a given configuration of the sprinkler, were kept constant and, subsequently, used in validation for different wind and operating conditions. The average values from RMSE, relative error between values of flow (e) and performance index (c) were respectively 1.54 mm h<sup>-1</sup>, 0.97% and 0.88 during calibration and 1.36 mm h<sup>-1</sup>, 1.32% and 0.91 in the validation step.

**Keywords:** Gun sprinkler. Uniformity. Computational model.

## INTRODUÇÃO

No cenário atual, a agricultura irrigada tem alcançado expressividade no setor produtivo mundial, tornando fundamental a utilização de equipamentos de irrigação e técnicas de manejo que propiciem o uso racional de água e energia.

Nesse contexto, em que a proteção ambiental e a conservação dos recursos hídricos são enfatizadas e os custos da água e energia estão em ascensão, a uniformidade de aplicação de água é uma preocupação crescente para fabricantes de equipamentos, projetistas e usuários de sistemas de irrigação. A desuniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação reduz o retorno econômico que pode ser obtido em áreas irrigadas e aumenta o impacto ambiental dessa atividade (Ortega et al., 2004), em função da redução na produtividade das culturas irrigadas e do desperdício de água, energia e fertilizantes (Oliveira et al., 2009).

No Brasil, a irrigação por aspersão figura como um dos métodos mais empregados, principalmente pela facilidade operacional que o método oferece (Prado, 2008). Atualmente, devido aos incentivos na produção de biocombustíveis, o setor sucroalcooleiro tem apresentado grande expansão, com a produção de etanol alcançando 18 milhões de metros cúbicos no período 2006/2007 (Goldenberg et al., 2008), o que alavancou a utilização dos sistemas autopropelidos de irrigação, utilizados principalmente para a aplicação da vinhaça. A sustentabilidade do descarte da vinhaça na cana-de-açúcar pelos sistemas autopropelidos de irrigação depende da uniformidade de aplicação dessas máquinas (Colombo et al., 2009).

Modelos de simulação permitem a análise da distribuição de água de sistemas de irrigação por aspersão operando sob condições reais, sendo desenvolvidos

com o objetivo de evitar a realização de laboriosos testes de campo e auxiliar no projeto de sistemas de irrigação (Carrión et al., 2001).

Tradicionalmente, duas aproximações muito importantes têm sido utilizadas nos modelos de simulação da distribuição de água de aspersores: a teoria balística tradicional e os métodos empíricos.

De acordo com Smith et al. (2008), métodos empíricos requerem uma quantidade substancial de dados de distribuição de água para cada configuração operacional do aspersor, enquanto a teoria balística pode ser empregada para simular uma maior gama de configurações sem a necessidade de coleta repetitiva de dados. Entretanto, segundo os mesmos autores, métodos baseados na teoria balística requerem equipamentos com alto custo agregado para coleta da distribuição do tamanho das gotas, enquanto os modelos empíricos podem produzir resultados adequados sem a necessidade de realização desse tipo de teste.

No caso particular dos canhões hidráulicos, além das incertezas quanto aos valores dos coeficientes de arraste, existem dificuldades de se estabelecer as condições iniciais das gotas (posição em relação ao aspersor, velocidade e ângulo da trajetória); por isso a modelagem baseada na teoria balística é mais frequentemente empregada na simulação do desempenho de pequenos (Conceição & Coelho, 2003) e médios aspersores (Montero et al., 2001; Playán et al., 2006).

Contudo, no caso dos canhões hidráulicos, o modelo de Richards & Weatherhead (1993) vem recebendo nos últimos anos a atenção de diversos pesquisadores interessados na simulação da distribuição de água desses aspersores operando em condições de vento (Granier et al., 2003; Newell, 2003; Smith et al., 2008; Faria et al., 2009). De acordo com Oliveira et al. (2009), por se tratar de um modelo classificado pelos autores, em função da utilização de equações que tem forte embasamento teórico, como “semiempírico”, o modelo

de Richards & Weatherhead (1993) requer um número limitado de ensaios de campo para ajuste de seus parâmetros.

No ajuste dos parâmetros de um modelo, de acordo com Beskow et al. (2011 a), a calibração manual pode ser empregada, no entanto, a qualidade dos resultados depende da habilidade do modelador em lidar com o modelo matemático e suas abordagens fundamentais. Eckhardt et al. (2005) enfatizam ainda que esse tipo de calibração é subjetiva, demorada e potencialmente tendenciosa, sendo que procedimentos de calibração automática podem superar esses problemas.

Dentre os métodos de otimização automática encontrados na literatura, o *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)* desenvolvido na Universidade do Arizona por Duan et al. (1992) tem sido atualmente, amplamente empregado, demonstrando ser robusto e computacionalmente eficiente. Tradicionalmente, o *SCE-UA* tem sido mais comumente aplicado com sucesso a modelos hidrológicos (Beskow et al., 2011 a), mas recentemente também foi aplicado com resultados promissores a modelos de simulação da irrigação por aspersão (Faria et al., 2012).

De acordo com Arabi et al. (2007), um modelo após calibrado deve ser executado com um conjunto de dados medidos não utilizados na fase de calibração. Esse passo é conhecido como validação e é útil para verificar se as previsões são aceitáveis, mesmo a partir de conjuntos de dados diferentes daqueles utilizados na fase de calibração.

Tendo em vista as vantagens decorrentes da utilização de modelos de simulação na análise dos efeitos do vento sobre o padrão de distribuição espacial da água aplicada por canhões hidráulicos (Smith et al., 2008; Faria et al., 2009; Oliveira et al., 2009; Prado & Colombo, 2010 a, b) propôs-se, neste trabalho: (i) calibrar os parâmetros adimensionais correspondentes à deriva (A/R, B/R e C/R) e à interrupção do fluxo de ar induzido (D/R, E/R e F/R) do modelo de Richards

& Weatherhead (1993); (ii) validar o modelo computacional confrontando dados de distribuição de água obtidos em ensaios de campo com os respectivos dados simulados pelo aplicativo computacional, para o aspersor canhão Plona RL-250; (iii) averiguar se o método de otimização *SCE-UA* pode ser empregado para o caso específico do modelo SIA.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido visando calibração e validação do programa computacional denominado Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA), baseado no modelo semiempírico de Richards & Weatherhead (1993), o qual foi criado com o objetivo de identificar as configurações dos sistemas autopropelidos de irrigação, operando sob diferentes combinações de velocidade e direção de vento, que proporcionam maior uniformidade de distribuição da água aplicada pelo sistema. A descrição do SIA, na íntegra, pode ser consultada na Parte I deste artigo, intitulada: Descrição e aplicabilidade do modelo.

Para calibrar e validar o aplicativo SIA, ensaios de laboratório e de campo foram utilizados a fim de caracterizar a distribuição espacial de água do aspersor marca Plona, modelo RL250, operando sob diferentes condições operacionais e de velocidade e direção de vento.

O aspersor Plona - RL250 é um canhão hidráulico de reversão lenta, com ângulo de inclinação do lançamento do jato de água de 24°, flange de acoplamento de 2 ½” e giro proporcionado pelo impacto de um de seus dois braços oscilantes. As características operacionais desse aspersor, obtidas em ensaios de laboratório e disponibilizadas por Prado & Colombo (2007), podem ser consultadas na Tabela 1 A do Anexo.

Na Tabela 1 podem ser verificados dados registrados em 53 ensaios de campo do aspersor Plona - RL250 (Tabela 2A do Anexo), realizados sob diferentes condições de velocidade e direção do vento e combinações de bocais e pressão de serviço, os quais foram utilizados na calibração e validação do SIA.

**Tabela 1.** Velocidades médias do vento registradas nos 53 ensaios de distribuição de água do aspersor Plona-RL250 para as diferentes combinações de bocais e pressão de serviço

Bocal Auxiliar (mm)	Bocal Principal (mm)									
	14		16		18		20		22	
	Pressão de serviço (kPa)									
	392	490	392	490	392	490	392	490	392	490
	Velocidade média do vento durante cada ensaio (m s <sup>-1</sup> )									
Sem Bocal	1,77	1,15	1,58	0,99	2,03	1,17	-	-	-	-
	4,13	4,00	2,24	1,90	-	2,39	-	-	-	-
	-	-	-	2,25	-	-	-	-	-	-
5	1,71	1,61	1,05	1,56	2,27	2,48	-	-	-	-
	4,11	3,92	1,39	1,72	-	4,13	-	-	-	-
	-	-	1,82	-	-	-	-	-	-	-
6	0,96	-	2,61	1,83	2,01	1,34	1,00	2,04	-	2,74
	0,97	-	2,79	-	2,54	3,39	1,73	2,71	-	2,87
	1,76	-	-	-	3,57	-	2,43	-	-	-
7	2,96	3,45	2,95	2,84	4,74	4,64	-	-	-	-
	4,96	4,72	-	3,13	5,32	5,83	-	-	-	-

Os ensaios foram realizados seguindo os procedimentos recomendados pela norma ISO 7749-2 (ISO 1990), sendo utilizada uma malha composta por coletores plásticos, de 8 cm de diâmetro, espaçados de 6 m, perfazendo uma área de 84 x 84 m, na qual o canhão hidráulico foi instalado exatamente no centro. A velocidade e direção do vento durante os ensaios foram registradas, em intervalos regulares de 5 minutos, utilizando um anemômetro, modelo Weather Monitor II, da Davis, instalado a 2 m do solo.

A rotina de ajuste dos parâmetros adimensionais (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R) do modelo, baseada no método *Shuffled Complex Evolution* (Duan et al., 1992) e utilizada no SIA, visa minimizar simultaneamente para três pares de matrizes (simuladas vs. observadas), a raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado (RMSE), Eq. 2, entre valores de intensidade de aplicação de água simulados pelo aplicativo e obtidos em ensaios de campo. Para tal, dos 53

ensaios de campo citados na Tabela 1, os quais compõem o banco de dados do aplicativo, três foram selecionados ao acaso para calibrar o modelo. Entre os 50 ensaios restantes, outros três foram selecionados, ao acaso, para validação.

Os ensaios selecionados para calibração foram:

- (1) 16 x 0 mm x 490 kPa, vento de  $0,99 \text{ m s}^{-1}$  e direção  $321,5^\circ$
- (2) 16 x 6 mm x 392 kPa, vento de  $2,79 \text{ m s}^{-1}$  e direção  $2,4^\circ$
- (3) 18 x 5 mm x 490 kPa, vento de  $4,13 \text{ m s}^{-1}$  e direção  $107,3^\circ$

Para validação, os seguintes ensaios foram os selecionados:

- (4) 14 x 0 mm x 392 kPa, vento de  $1,77 \text{ m s}^{-1}$  e direção  $354,4^\circ$
- (5) 16 x 7 mm x 490 kPa, vento de  $2,84 \text{ m s}^{-1}$  e direção  $4,3^\circ$
- (6) 18 x 6 mm x 392 kPa, vento de  $3,57 \text{ m s}^{-1}$  e direção  $55,5^\circ$

Devido às incertezas em relação ao valor dos coeficientes empíricos do modelo (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R), foram estabelecidos limites bastante abrangentes (-1 a 1) para os parâmetros, seguindo recomendações de Beskow et al. (2011b). Essa observação do possível limite inferior e superior é pertinente visto que o processo de calibração poderia avaliar muitos conjuntos de parâmetros que produziriam resultados irrealistas.

A adequada utilização do *Shuffled Complex Evolution (SCE – UA)* depende da correta seleção dos parâmetros de calibração do método, dos quais se pode destacar:

- i)  $p$ , o número de complexos,
- ii)  $m$ , o número de pontos em um complexo ( $m = 2n + 1$ ),
- iii)  $q$ , o número de pontos em um subcomplexo ( $q = n + 1$ ),
- iv)  $p_{\min}$ , o número mínimo de complexos ( $1 \leq p_{\min} \leq p$ ),
- v)  $\alpha$ , número consecutivo de valores gerados por cada subcomplexo ( $\alpha \geq 1$ ),
- vi)  $\beta$ , o número de evoluções de cada complexo ( $\beta = m$ ),

onde “n” é o número de parâmetros a serem ajustados, sendo necessário estabelecer previamente o limite inferior e superior do espaço amostral para cada parâmetro.

Todas as simulações realizadas foram avaliadas quantificando as diferenças entre os valores de intensidade de precipitação de água simulados pelo SIA e aqueles obtidos em ensaios de campo, conforme os seguintes índices estatísticos:

- i) soma do quadrado dos desvios (SQD,  $\text{mm}^2 \text{h}^{-2}$ ),

$$\text{SQD} = \sum (I_{(i,j)\text{sim}} - I_{(i,j)\text{obs}})^2 \quad (1)$$

- ii) raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado (RMSE,  $\text{mm h}^{-1}$ ), tomados em relação aos valores não nulos

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} [(I_{(i,j)\text{sim}} - I_{(i,j)\text{obs}})^*]^2 \right\} / n_0} \quad (2)$$

- iii) erro relativo entre valores de vazão simulados e observados (e, %),

$$e = (Q_{\text{sim}} - Q_{\text{obs}}) / Q_{\text{obs}} \quad (3)$$

- iv) índice de confiança ou desempenho (c), proposto por Camargo & Sentelhas (1997),

$$c = r \cdot d \quad (4)$$

com

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} (I_{(i,j)sim} - I_{(i,j)obs})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} (|I_{(i,j)sim} - \bar{I}| + |I_{(i,j)obs} - \bar{I}|)^2} \right] \quad (5)$$

em que:

$I_{(i,j)sim}$  - intensidade de aplicação de água no ponto de coordenadas (i,j) da malha simulada pelo modelo ajustado,  $mm\ h^{-1}$ ,

$I_{(i,j)obs}$  - intensidade de aplicação de água no ponto de coordenadas (i,j) da malha observada em campo,  $mm\ h^{-1}$ ,

$n_0$  - número de pontos com desvio diferente de zero,

$n$  = número de linhas da malha que é igual ao número de colunas,

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

$Q_{sim}$  - vazão total da malha simulada,  $m^3\ h^{-1}$ ,

$Q_{obs}$  - vazão total da malha observada,  $m^3\ h^{-1}$ ,

$r$  - coeficiente de correlação,

$d$  - índice de *Willmott*,

$\bar{I}$  - média dos valores de intensidade de aplicação de água observados,  $mmh^{-1}$ .

O índice de confiança ou desempenho foi avaliado segundo a escala proposta por Camargo & Sentelhas (1997) como: Ótimo ( $c > 0,85$ ); Muito Bom ( $0,76 \leq c \leq 0,85$ ); Bom ( $0,66 \leq c \leq 0,75$ ); Mediano ( $0,61 \leq c \leq 0,65$ ); Sofrível ( $0,51 \leq c \leq 0,60$ ); Mau ( $0,41 \leq c \leq 0,50$ ) e Péssimo ( $c \leq 0,40$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos coeficientes empíricos adimensionais (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R) do modelo de Richards & Weatherhead (1993), utilizados como parâmetros de calibração do SIA, que melhor se ajustaram aos ensaios de campo do aspersor Plona – RL250, foram determinados testando aleatoriamente diferentes combinações entre condições operacionais desse aspersor (bocais *vs.* pressão de serviço) e condições climáticas (velocidade e direção do vento).

A qualidade do ajuste entre os valores de intensidade de aplicação de água simulados pelo modelo e os observados em ensaios de campo pode ser comprovada através da análise dos coeficientes estatísticos demonstrada na Tabela 2. Para cada um dos 3 pares de ensaios (malhas simuladas *vs.* malhas observadas), contendo os valores de intensidade de aplicação de água do Plona - RL250, observou-se para as etapas de calibração e validação, os valores da raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado (RMSE, mm h<sup>-1</sup>), tomados em relação aos valores não nulos, o erro relativo entre valores de vazão simulados e observados (e, %) e o índice de confiança ou desempenho (c).

**Tabela 2.** Qualidade do ajuste entre dados de intensidade de aplicação de água simulados pelo SIA e observados em ensaios de campo

	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	RMSE	e	c	RMSE	e	c	RMSE	e	C
Calibração	1,12	0,60	0,87	1,40	0,99	0,90	2,10	-1,31	0,87
	Ensaio 4			Ensaio 5			Ensaio 6		
	RMSE	e	c	RMSE	e	c	RMSE	e	C
Validação	0,71	1,36	0,94	1,76	-0,14	0,89	1,60	-2,45	0,90

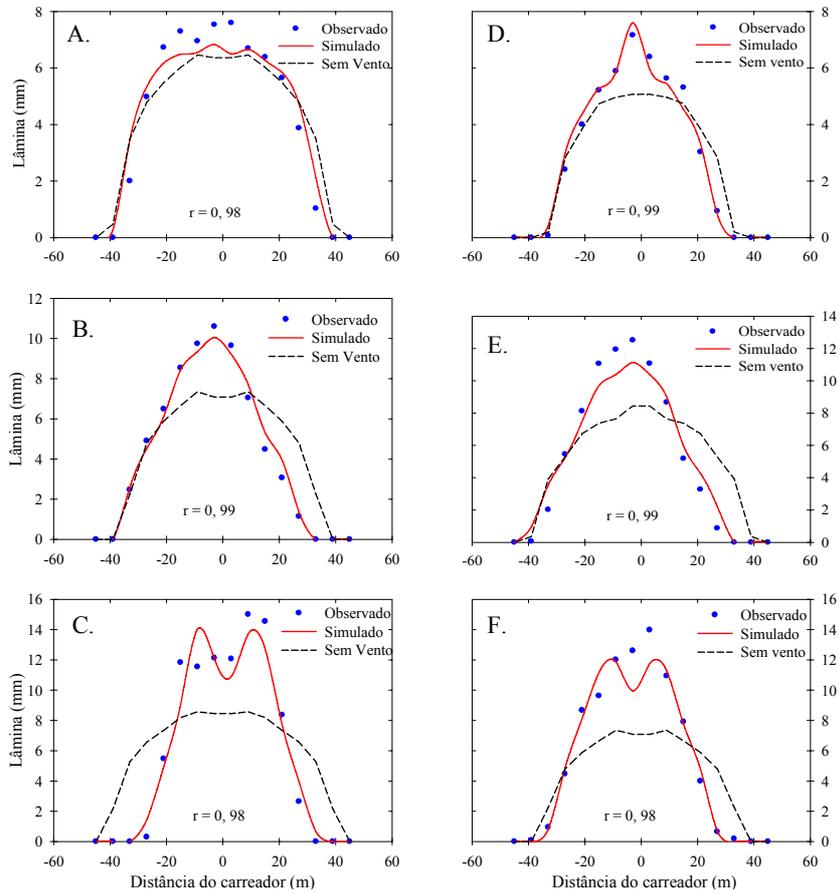
Conforme demonstrado na Tabela 2, para a etapa de calibração os valores médios encontrados de RMSE, erro relativo entre valores de vazão (e) e índice de confiança ou desempenho (c) foram  $1,54 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $0,97\%$  e  $0,88$ , respectivamente. Para a validação os valores foram  $1,36 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $1,32\%$  e  $0,91$ , respectivamente.

Na otimização dos parâmetros do modelo de Richards & Weatherhead (1993), Smith et al. (2008) encontraram um valor médio de RMSE igual a  $2,62 \text{ mm h}^{-1}$ . Utilizando o mesmo modelo e para o aspersor Plona-RL250 operando nas pressões de 392 e 490 kPa, com bocais de  $18 \times 5$  e  $18 \times 7$  mm, Prado (2008) encontrou um desvio médio dos valores de intensidade de aplicação de água variando entre  $2,17$  e  $3,61 \text{ mm h}^{-1}$ .

Granier et al. (2003) utilizando o canhão Komet Twin 101/Plus com bocal de 22 mm e pressão de 450 kPa, encontraram um desvio médio de  $3,38 \text{ mm h}^{-1}$  no ajuste dos parâmetros do modelo de Richards & Weatherhead. No trabalho pioneiro Richards & Weatherhead (1993), utilizando o canhão Nelson P150, com o bocal de 25,4 mm, sob diferentes pressões, verificaram desvios médios que variaram entre  $1,4$  e  $3,4 \text{ mm h}^{-1}$ .

Na Figura 1, se verifica boa similaridade entre os valores das lâminas simuladas pelo SIA e observadas em ensaios de campo. Na referida Figura é possível verificar a qualidade com que o modelo ajustado foi capaz de prever as lâminas aplicadas ao longo de linhas perpendiculares à trajetória de deslocamento de um autopropelido isolado, operando sob condições de vento.

Os ensaios selecionados para essas simulações são os mesmos utilizados para calibração e validação do modelo, citados anteriormente (ensaio (1) – Figura A, ensaio (2) – Figura B, ensaio (3) – Figura C, ensaio (4) – Figura D, ensaio (5) – Figura E e ensaio (6) – Figura F), considerando o aspersor deslocando-se com velocidade linear constante de  $50 \text{ m h}^{-1}$  ao longo do carreador.



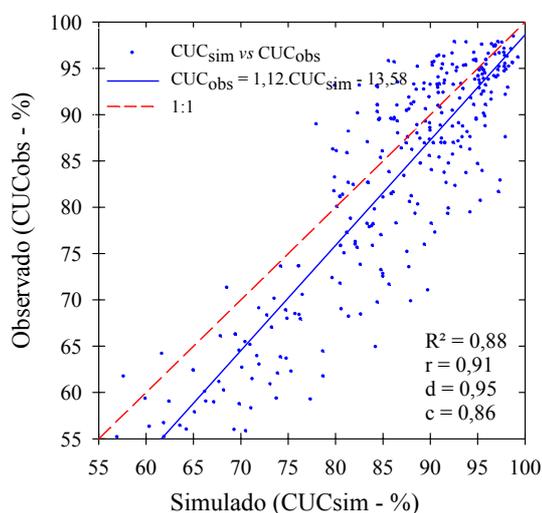
**Figura 1.** Lâminas de água (simuladas vs. observadas) para o aspersor Plona – RL250, deslocando-se ao longo de uma trajetória infinita, paralela ao eixo  $x$  do sistema de coordenadas dos ensaios de campo ((A) 16x0 mm x 490 kPa,  $vv = 0,99 \text{ m s}^{-1}$  e  $dv = 321,5^\circ$ ; (B) 16x6 mm x 392 kPa,  $vv = 2,79 \text{ m s}^{-1}$  e  $dv = 2,4^\circ$ ; (C) 18x5 mm x 490 kPa,  $vv = 4,13 \text{ m s}^{-1}$  e  $dv = 107,3^\circ$ ; (D) 14x0 mm x 392 kPa,  $vv = 1,77 \text{ m s}^{-1}$  e  $dv = 354,4^\circ$ ; (E) 16x7 mm x 490 kPa,  $vv = 2,84 \text{ m s}^{-1}$  e  $dv = 4,3^\circ$ ; (F) 18x6 mm x 392 kPa,  $vv = 3,57 \text{ m s}^{-1}$  e  $dv = 55,5^\circ$ )

Os valores dos desvios absolutos médios encontrados na comparação entre lâminas de água simuladas com base em dados de ensaios de campo e dados simulados pelo SIA foram de 0,76 e 0,66 mm para calibração e validação, respectivamente. Na aplicação de uma rotina computacional para ajuste dos parâmetros de Richards & Weatherhead (1993), Prado (2008) utilizando o canhão Plona-RL250, encontrou valores de desvio médio entre 1,52 e 2,31 mm.

Os valores de “r”, demonstrados na Figura 1, indicam haver uma forte correlação entre os valores de lâmina simulados com base em dados de ensaios de campo com os de dados obtidos pelo SIA.

A relação entre 326 valores de CUC gerados a partir de simulações oriundas do aplicativo SIA e 326 valores de CUC simulados a partir de dados obtidos em ensaios de campo, para o sistema operando com o aspersor Plona-RL250 sob condições de vento, é demonstrada na Figura 2. Nas simulações foram utilizados espaçamentos entre carregadores variando de 24 a 90 metros, abrangendo uma faixa que representa de 20 a 100% do diâmetro molhado (% D.M) do aspersor, de acordo com a configuração (bocal vs. pressão) selecionada.

O elevado valor encontrado para o índice de confiança dos valores simulados ( $c = 0,86$ ), que de acordo com a escala de Camargo & Sentelhas (1997) corresponde à classificação do tipo ótimo ( $c > 0,85$ ), demonstra a adequação das simulações. Observa-se uma forte correlação ( $r = 0,91$ ) entre os valores de CUC simulados pelos dois processos e uma boa distribuição de pontos em relação à reta 1:1 que, quando comparada com a linha de tendência ajustada aos pontos, demonstra que os valores de CUC simulados com malhas geradas pelo SIA tendem a ser ligeiramente superiores aos valores simulados com malhas medidas em campo.

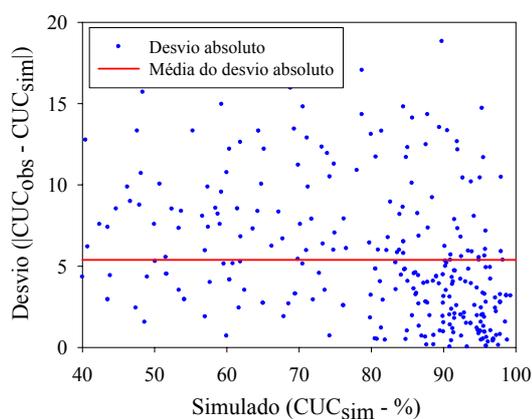


**Figura 2.** Relação entre valores de CUC simulado com dados de precipitação de água gerados pelo modelo (SIA) e CUC simulado com dados de precipitação observados em ensaios de campo

O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,88$ ) do ajuste linear, entre valores de CUC simulados com dados de distribuição de água observados em ensaios de campo e dados simulados pelo SIA, foi superior aos valores encontrados por Oliveira (2008) e Prado & Colombo (2010 b), os quais ao ajustaram seus modelos de simulação da irrigação por aspersão encontraram valores de  $R^2$  iguais a 0,72 e 0,83, respectivamente. Montero et al. (2001) e Faria et al. (2009) em avaliações com aspersores de tamanho médio obtiveram, ambos, valor médio de  $R^2$  igual a 0,73.

Na Figura 3 são apresentados os valores absolutos da diferença entre valores de CUC, expressos em percentagem, oriundos de simulações e de ensaios de

campo. Constatou-se que o valor médio das diferenças absolutas, representado pela linha vermelha (tracejada), foi 5,39%, valor esse muito próximo dos 5,38% encontrados por Oliveira (2008) em simulações semelhantes.



**Figura 3.** Diferenças absolutas entre estimativas de CUC obtidas com dados de ensaios de campo ( $CUC_{obs}$  - %) e com dados de ensaios simulados ( $CUC_{sim}$  - %) do aspersor Plona - RL250

Conforme observações de Faria et al. (2009), na análise do desempenho do modelo ajustado não se pode deixar de considerar que as diferenças nas estimativas de CUC encontradas neste trabalho não refletem apenas as deficiências do modelo ajustado, mas também refletem a dificuldade de se obter, ao longo do período de duração dos ensaios de campo, o mesmo grau de estabilidade nos valores dos parâmetros climáticos considerados nas simulações.

De acordo com Carrión et al. (2001), existem vários tipos de erros intrínsecos em testes e processos de simulação, os quais podem afetar o ajuste entre valores

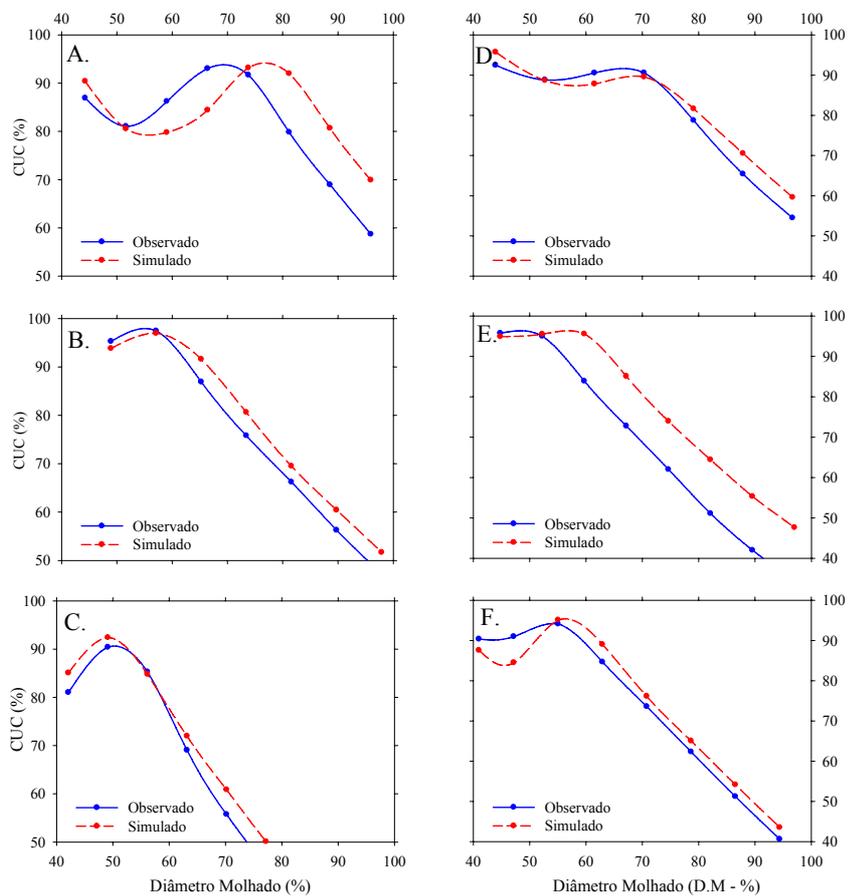
Excluído: ¶

observados e simulados. Para esses autores, erros nas medidas de vazão, pressão, volume coletado, dentre outros, são típicos desse tipo de análise experimental. Os autores incluem ainda a variabilidade das condições climáticas (velocidade e direção do vento) durante os testes, enfatizando que nas simulações as condições são fixas e invariáveis.

Na Figura 4 são apresentados os valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC - %) simulados em função do espaçamento entre carreadores, expressos em porcentagem do diâmetro molhado (DM - %) do aspersor, os quais foram obtidos a partir de valores de distribuição de água simulados pelo SIA e valores de distribuição de água oriundos de observações de ensaios de campo, utilizados na calibração e validação do modelo.

Nas simulações foi considerado o aspersor Plona - RL250, com ângulo de giro de  $360^{\circ}$ , operando em condições distintas de bocal e pressão de serviço, sendo que os ensaios de aplicação de água apresentaram as seguintes características: (A) 16 x 0 mm x 90 kPa, vento de  $0,99 \text{ m s}^{-1}$  e direção de  $321,5^{\circ}$ ; (B): 16 x 6 mm x 392 kPa, vento de  $2,79 \text{ m s}^{-1}$  e direção  $2,4^{\circ}$ ; (C): 18 x 5 mm x 490 kPa, vento de  $4,13 \text{ m s}^{-1}$  e direção de  $107,3^{\circ}$ ; (D) 14 x 0 mm x 392 kPa, vento de  $1,77 \text{ m s}^{-1}$  e direção de  $354,4^{\circ}$ ; (E) 16 x 7 mm x 490 kPa, vento de  $2,84 \text{ m s}^{-1}$  e direção  $4,3^{\circ}$  e (F) 18 x 6 mm x 392 kPa, vento de  $3,57 \text{ m s}^{-1}$  e direção  $55,5^{\circ}$ .

Apesar das diferenças nos valores absolutos das estimativas de CUC demonstrados na Figura 4, observa-se que o comportamento da uniformidade de aplicação de água em função do aumento do espaçamento entre carreadores, determinado com base nos dados de ensaios de campo, foi adequadamente representado nas seis condições de velocidade e direção de vento simuladas, tanto para os ensaios utilizados na calibração quanto para os ensaios utilizados na validação.



**Figura 4.** Variação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen - CUC em função do espaçamento entre carreadores para os ensaios utilizados na calibração e validação do modelo

## CONCLUSÕES

1. O modelo SIA foi capaz de prever a taxa de aplicação de água do canhão hidráulico Plona-RL250 e a uniformidade de distribuição de água do sistema de forma adequada tanto no estágio de calibração quanto no de validação.
2. O Método *Shuffled Complex Evolution* (SCE – UA) demonstrou uma boa convergência quando implementado no SIA, apresentando elevados índices de qualidade do ajuste, além de rápida convergência.
3. O modelo SIA se mostra capaz de atender às necessidades de fabricantes de equipamentos, projetistas e usuários de sistemas de irrigação que utilizam canhões hidráulicos. O modelo é capaz de prever o comportamento do sistema de irrigação antes e depois da instalação em campo, vistas à seleção de canhões hidráulicos, dimensionamento do sistema e horário de funcionamento.

### **AGRADECIMENTOS**

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pela bolsa de estudos do primeiro autor.

Aos coautores, professor PhD. Alberto Colombo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), aos professores Dr. Samuel Beskow e Dr. Lessandro Coll Faria da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e ao professor Dr. Giuliani do Prado da Universidade Estadual de Maringá (UEM), pela valiosa colaboração na execução deste trabalho.

**LITERATURA CITADA**

- Arabi, M.; Govindaraju, R. S.; Sophocleous, M.; Koelliker, J. K. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 459-471, 2007.
- Beskow, S.; Mello, C. R.; Norton, L. D.; Silva, A. M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. 2011a. *Catena* 86 (6), 169-171.
- Beskow, S.; Mello, C. R.; Norton, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.68, n.3, p.265-274, May/June 2011b.
- Camargo, A. P. de; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria*, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- Carrión, P.; Tarjuelo, J. M; Motero J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. Part I: Description of model. *Irrigation Science, New York*, v. 20, n. 2, p. 73-84, May. 2001.
- Conceição, M. A. F.; Coelho, R. D. Simulating wind effect on microsprinkler water distribution. *Scientia Agricola*, v.60, n.2, p.205-209, 2003.
- Colombo, A.; Prado, G.; Oliveira, H. F. E. Modeling wind effects on travelling gun sprinkler water application uniformity. *St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2009.
- Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research, Washington*, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, July/Aug. 1992.
- Eckhardt, K.; Fohrer, N.; Frede, H. Automatic model calibration. *Hydrological Processes, Chichester*, v. 19, n. 3, p. 651-658, Feb. 2005.

- Faria, L. C.; Colombo, A.; Oliveira, H. F. E. de; Prado, G. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.1, p.19-27, 2009.
- Faria, L. C.; Beskow, S.; Colombo, A.; Oliveira, H. F. E. de. Modelagem dos efeitos do vento na uniformidade da irrigação por aspersão: Aspersores de tamanho médio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.16, n.2, p.133-141, 2012.
- Granier, J.; Molle, B.; Deumier, J. M. IRRIPARC-Part 1: Modeling spatial water distribution under a sprinkler in windy conditions. International workshop, Montpellier, 2003. p.14-19.
- Goldenberg, J. Coelho, S.T., Guardabassi, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Police*. v. 36 (6) p. 2086– 2097, 2008.
- ISO - International Organization for Standardization. ISO 7749- 2. Irrigation equipment – Rotating sprinklers – part 2: Uniformity of distribution and test methods, 1990. 6p.
- Montero, J.; Tarjuelo, J. M.; Carrión, P. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. Part II: Calibration and validation of the model. *Irrigation Science*, v.20, n.2, p.85-98, 2001.
- Newell, G. Traveling gun simulation model TRAVGUN: User's manual and technical documentation. Toowoomba: National Centre for Engineering in Agriculture-NCEA. University of Southern Queensland-USQ, 2003. 89p.
- Oliveira, H. F. E. Modelagem semi-empírica da distribuição de água de aspersores autopropelidos sob diferentes condições de vento. Lavras: UFLA, 2008. 74p. Dissertação Mestrado
- Oliveira, H. F. E.; Colombo, A.; Faria, L. C. Modelagem dos efeitos do vento sobre as dimensões do alcance do jato de um canhão hidráulico. *Revista*

- Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, (Suplemento), p.818-824, 2009.
- Ortega, J. F. A.; Tarjuelo, J. M. M.; De Juan, J. A. V.; Cárrión, P. P. Uniformity distribution and its economic effect on irrigation management in semiarid zones. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.130, n.4, p.257-347, 2004.
- Playán, E.; Zapata, N.; Faci, J.M.; Tolosa, D.; Lacuerva, J.L.; Pelegri, J. Salvador, R.; Sanches, I.; Lafita, A. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agricultural Water Management*, v.84, n.1, p.89-100. 2006.
- Prado, G.; Colombo, A. Análise da uniformidade de aplicação de água pelo aspersor Plona-RL250 em sistemas autopropelidos de irrigação. *Irriga*, v.12, n.2, p.249-262, 2007.
- PRADO, G. Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento. Lavras: UFLA, 2008. 121p. Tese Doutorado
- Prado, G.; Colombo, A. Composição de perfis radiais de distribuição de água de aspersores. *Irriga, Botucatu*, v. 14, n. 1, p. 41-53, jan./mar. 2009.
- Prado, G.; Colombo, A. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação - Parte I: Modelagem com o Simulasoft. *Irriga, Botucatu*, v.15, n.1, p.51-62, Jan. / mar 2010 a.
- Prado, G.; Colombo, A. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação - Parte II: Validação do Simulasoft. *Irriga, Botucatu*, v.15, n.1, p.63-74, Jan. / mar 2010 b.
- Richards, P. J.; Weatherhead, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research*. v.54, p.281-291. 1993.

Smith, R. J.; Gillies, M. H.; Newell, G.; Foley, J. P. A decision support model for travelling gun irrigation machines, *Biosystems Engineering*, v.100, n.1, p.126-136, 2008.

“Este artigo é uma versão preliminar, considerando que o conselho editorial da revista poderá sugerir alterações para adequá-lo ao seu próprio estilo”.

**ANEXO A**

	<b>Página</b>
TABELA 1A Valores de raio de alcance e vazão, em função das combinações entre pressão de serviço e diâmetro dos bocais, para o aspersor PLONA-RL250, os quais compõe o banco de dados do SIA... ..	83
TABELA 2A Variação da velocidade e direção do vento para os 53 ensaios de campo realizados, sob diferentes combinações entre pressão de serviço e diâmetro dos bocais do aspersor PLONA-RL250, os quais compõe o banco de dados do SIA.....	84

TABELA 1A Valores de raio de alcance e vazão, em função das combinações entre pressão de serviço e diâmetro dos bocais, para o aspersor PLONA-RL250, os quais compõe o banco de dados do SIA

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

...continua...

TABELA 1A, Cont.

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

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

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

..continua...

TABELA 2A, Cont.

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