

AJUSTE DE PARÂMETROS PARA DISTORÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA APLICADA POR CANHÕES HIDRÁULICOS EM CONDIÇÕES DE VENTO

Giuliani do Prado; Alberto Colombo

*Departamento do Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG.
CEP 37200-000, e-mail: gprado@uem.br*

1 RESUMO

Em condições de vento, a distribuição de água aplicada por sistemas de irrigação por aspersão pode ficar comprometida. Na modelagem da distribuição de água de canhões hidráulicos, operando em condições de vento, os procedimentos empíricos oferecem melhores aproximações. No modelo de Richards & Weatherhead (1993), a deriva e a redução no raio de alcance do aspersor devido ao vento são descritos por seis parâmetros. O objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo matemático e uma rotina computacional, escrita em *Visual Basic 6*, para o ajuste destes seis parâmetros a partir de ensaios de distribuição de água determinados em campo. Os dados de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250 operando em condições de vento, nas pressões de 392 e 490 kPa e com os bocais de 18x5 e 18x7 mm, foram utilizados para aplicação da rotina computacional desenvolvida. No ajuste dos parâmetros com a rotina computacional, verificou-se uma variação no desvio médio de 2,168 a 3,611 mm h⁻¹, entre os valores de intensidades de precipitação estimados e observados. A partir dos parâmetros estimados é possível simular a distribuição espacial de água do aspersor para qualquer direção de vento e para velocidades do vento que não excedam os valores nos quais os parâmetros foram determinados.

UNITERMOS: procedimentos empíricos, deriva pelo vento, redução do alcance

**PRADO, G. do; COLOMBO, A.
PARAMETER ADJUSTMENT FOR DISTORTION OF RAINGUN WATER
DISTRIBUTION UNDER WINDY CONDITIONS.**

2 ABSTRACT

In windy conditions, water distribution through sprinklers systems may be compromised. Empirical procedures used to model water distribution by rain guns in windy conditions offer the best results. In the Richard & Weatherhead (1993) model, drift and range shortening in the sprinkler due to wind is described by six parameters. The aimed was to develop a mathematical model and a computational routine, written in *Visual Basic 6*, to adjust these parameters from data obtained in field tests of water distribution. To test the model and the application developed, data from field tests of the PLONA-RL250 operating in windy conditions with working pressures of 392 and 490 kPa and nozzle sizes of 18x5 mm and 18x7 mm were used. In the parameter adjustment done by the computational routine developed, variations between 2.168 and 3.611 mm h⁻¹ were observed when comparing the measured and the estimated values. It is important to note that from the estimated parameters, it is possible

to simulated water distribution values for the sprinkler operating under any wind direction or speed, as long as the speed is lower than the speed used to determine the set parameters.

KEYWORDS: empirical procedures, wind drift, range shorting

3 INTRODUÇÃO

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

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

Normalmente, projetistas e usuários de sistemas de irrigação por aspersão, em condições de vento, reduzem, sem nenhum critério, o espaçamento entre aspersores. Esta redução no espaçamento entre aspersores implica em aumento nos custos de implantação, operacionais e, conseqüentemente, nos custos totais do sistema de irrigação (Holzapfel et al., 2007). Para Playán et al. (2006) e Zapata et al. (2007), há uma combinação ótima entre as condições operacionais e as condições ambientais, de modo a proporcionar adequados valores de uniformidade de aplicação de água. A determinação desta condição ótima de trabalho do sistema de irrigação pode ser estabelecida de forma mais precisa a partir de modelos de simulação calibrados (Dechmi et al., 2003).

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

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

empíricos para simular a distorção causada pelo vento na distribuição espacial de água aplicada.

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

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

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição do modelo

Na análise da distribuição de água do aspersor pelo modelo empírico de Richards & Weatherhead (1993), o vetor vento, como mostrado na Figura 1, atua no mesmo sentido do eixo x_v e perpendicularmente ao eixo y_v . A distorção causada pelo vetor vento, segundo esses autores, pode ser computada pelas expressões que definem a deriva causada pelo vento (D_v em m) e a redução do raio de alcance do aspersor causada pelo vento (RA em m), dadas por:

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

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

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

em que, v é a velocidade do vento ($m \cdot s^{-1}$); R o raio de alcance do aspersor (m); r a distância radial do coletor ao aspersor (m); x_{v0} e y_{v0} coordenadas para vento igual a zero (m); S o seno do ângulo entre o vetor velocidade do vento e a direção do jato do aspersor; α o ângulo de lançamento do jato do aspersor ($^\circ$); ϕ ângulo entre a direção do vento e a direção do jato do aspersor no plano horizontal ($^\circ$); A, B, C, D, E e F constantes de ajuste das expressões (s).

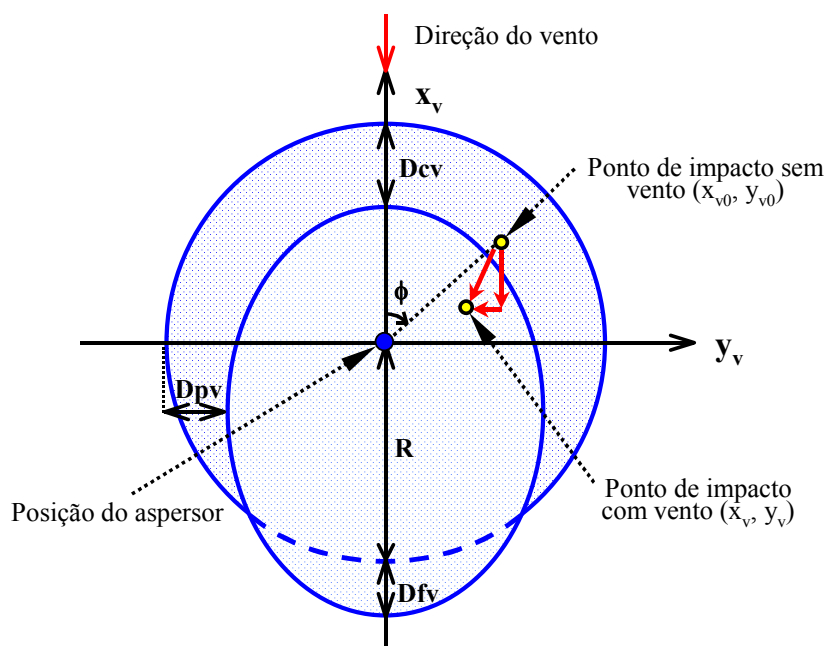


Figura 1. Representação da distorção causada pelo vento no modelo empírico Richards & Weatherhead (1993).

Conforme descrito por Richards & Weatherhead (1993), as coordenadas do ponto de impacto do jato d'água (x_v , y_v) sob ação do vento, mostradas na Figura 1, podem ser determinadas a partir das coordenadas em que cada ponto de impacto do jato d'água se encontra na condição de ausência de vento (x_{v0} , y_{v0}) e dos efeitos da deriva e da redução do raio de alcance ocasionados pelo vetor vento, dadas por:

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

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

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

O valor de intensidade de precipitação ocorrida em cada ponto de impacto do jato d'água do aspersor, em condições de vento, pode ser determinada por:

$$i_v = \frac{i_0}{\frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}} \cdot \frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}}} \quad (5)$$

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

Os seis parâmetros de Richards & Weatherhead (1993) não apresentam nenhum significado físico, entretanto, o conjunto de seus valores, aplicados nas expressões 3 e 4, como apresentado por Newell et al. (2003), definem os achatamentos provocados pelo vetor vento na distribuição espacial de água do aspersor e definidos na Figura 1 por: i) Distância

contra o vento (Dcv); ii) Distância perpendicular ao vento (Dpv) e; Distância a favor do vento (Dfv).

4.1.1 Posição dos pontos de amostragem de água

A distribuição de água de um aspersor operando isoladamente é analisada por uma série de pontos de amostragem (coletores de água) dispostos em torno do aspersor (Figura 2), caracterizando o método da malha. O número de coletores de água, na linha (N_L) e na coluna (N_C), necessários para representar a distribuição de água do aspersor, é dado por:

$$N_L = 2 \cdot \text{Int}(\tau) + 4 \quad \text{e} \quad N_C = N_L$$

$$\text{sendo: } \tau = \frac{R}{\Delta e} \quad (6)$$

Em que, Δe é o espaçamento entre pontos de amostragem (m) e; $\text{Int}(\square)$ a função matemática que retorna a parte inteira de \square .

No campo de ensaios, conforme indicado na malha de coletores da Figura 2, os pontos de amostragem de água são dispostos em um sistema de coordenadas cartesianas (x_M, y_M). A coordenada " x_M ", identificada pelo índice " k_L ", é dada pela equação 7 e a coordenada " y_M ", identificada pelo índice " k_C ", é dada pela equação 8.

$$x_M = \left[\left(\frac{N_L}{2} - 0,5 \right) - (k_L - 1) \right] \cdot \Delta e \quad (7)$$

$$y_M = \left[\left(-\frac{N_C}{2} + 0,5 \right) + (k_C - 1) \right] \cdot \Delta e \quad (8)$$

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

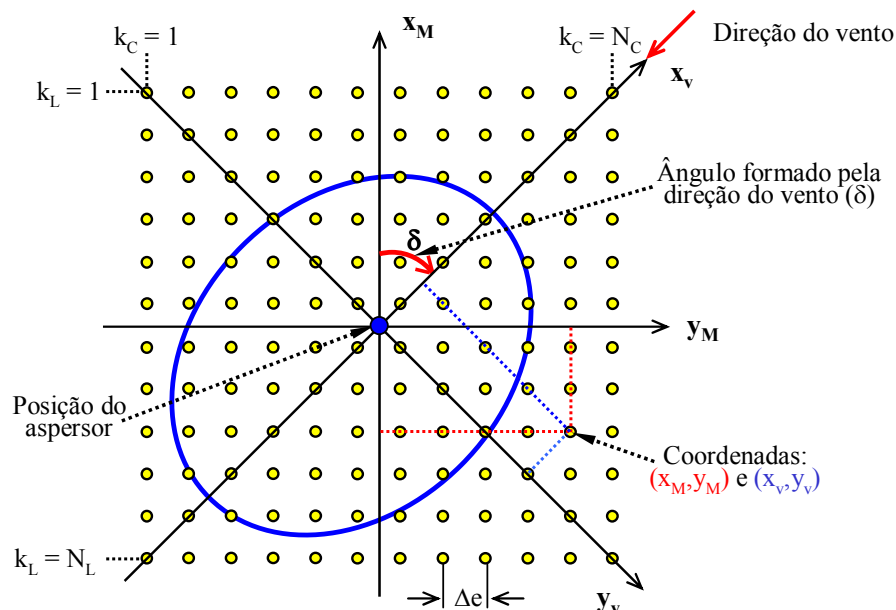


Figura 2. Disposição dos pontos de amostragem para a determinação da distribuição de água de um aspersor operando isoladamente.

A partir do ângulo (δ em graus) formado entre a direção predominante do vetor vento e o eixo x_M da malha de coletores, é estabelecido um sistema de coordenadas cartesianas (x_v, y_v). Como mostrado na Figura 2, nesse sistema de coordenadas cartesianas, o eixo “ x_v ” é alocado de forma a coincidir com a direção predominante do vetor vento e o eixo “ y_v ” é alocado perpendicularmente em relação à direção predominante do vetor vento. Dessa forma, a posição em relação ao aspersor das coordenadas “ x_v ” e “ y_v ” do sistema cartesiano são determinadas por:

$$x_v = x_M \cdot \cos(\delta) + y_M \cdot \sin(\delta) \quad (9)$$

$$y_v = y_M \cdot \cos(\delta) - x_M \cdot \sin(\delta) \quad (10)$$

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

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

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

$$f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ x_{v0} - \left[A + B \cdot \left(\frac{r}{R} \right) + C \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot v - \dots \right. \\ \left. \dots - \left[D \cdot \left(\frac{r}{R} \right) + E \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 + F \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right] \cdot \frac{x_{v0}}{r} \cdot S \cdot v \right\} - x_v \quad (11)$$

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

$$f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ y_{v0} - \left[D \cdot \left(\frac{r}{R} \right) + E \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 + F \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right] \cdot \frac{y_{v0}}{r} \cdot S \cdot v \right\} - y_v \quad (12)$$

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

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

A determinação dos fatores de correção “ Δx_{v0} ” e “ Δy_{v0} ”, calculados com base em aproximações de $f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})$ e $f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})$, é efetuada de acordo com a série de Taylor truncada (Burden & Faires, 2003) assumindo que os valores de “ Δx_{v0} ” e “ Δy_{v0} ” são suficientes para resultar em $f_{x_{v0}}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = 0$ e $f_{y_{v0}}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = 0$. Os valores de “ Δx_{v0} ” e “ Δy_{v0} ”, escritos em termos de álgebra matricial, são determinados por:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} & \frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \\ \frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} & \frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{v0} \\ \Delta y_{v0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) \\ -f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Em que $\square_{x_{v0}}$ é o fator de correção para x_{v0} (m) e; $\square_{y_{v0}}$ o fator de correção para y_{v0} (m).

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} = & 1 - \frac{x_{v0} \cdot v}{R} \cdot \left\{ \left(\frac{B}{r} + \frac{2 \cdot C}{R} \right) + \left(\frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S \cdot x_{v0} + \dots \right. \\ & \left. \dots + \left[\left(\frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{x_{v0} \cdot \text{sen}^2(\alpha)}{S} \right] + \left[D + E \cdot \left(\frac{r}{R} \right) + F \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot \frac{S}{x_{v0}} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

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

$$\frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} = -\frac{y_{v0} \cdot v}{R} \cdot \left[\left(\frac{B}{r} + \frac{2 \cdot C}{R} \right) + \left(\frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S \cdot x_{v0} + \left(\frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{x_{v0}}{S} \right] \quad (15)$$

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

$$\frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} = -\frac{x_{v0} \cdot y_{v0} \cdot v}{R} \cdot \left[\left(\frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S + \left(\frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{\text{sen}^2(\alpha)}{S} \right] \quad (16)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} = & 1 - \frac{y_{v0} \cdot v}{R} \cdot \left\{ \left(\frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S \cdot y_{v0} + \dots \right. \\ & \left. \dots + \left(\frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{y_{v0}}{S} + \left[D + E \cdot \left(\frac{r}{R} \right) + F \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot \frac{S}{y_{v0}} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

A resolução do sistema de equações apresentado na expressão 13 pode ser realizada pela Regra de Cramer. Esta resolução, para encontrar os incrementos dos fatores de correção, “ $\square_{x_{v0}}$ ” e “ $\square_{y_{v0}}$ ”, é efetuada por até 20 iterações, ou de modo que a soma algébrica dos valores absolutos das funções $f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})$ e $f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})$ assumam valor suficientemente próximo de zero (<0,01). Dessa forma, os novos valores das coordenadas “ x_{v0} ” e “ y_{v0} ” serão dados por:

$$x_{v0}^{(k+1)} = x_{v0}^{(k)} + \Delta x_{v0} \quad (18)$$

$$y_{v0}^{(k+1)} = y_{v0}^{(k)} + \Delta y_{v0} \quad (19)$$

Em que k é o índice que identifica a iteração.

4.1.2 Ajuste dos parâmetros de distorção

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

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{k_E=1}^{N_E} \sum_{k_C=1}^{N_C} \sum_{k_L=1}^{N_L} (i_{k_E k_C k_L} - \hat{i}_{k_E k_C k_L})^2 \quad ; \quad \text{sendo: } \hat{i}_{k_E k_C k_L} = \frac{i_0}{\frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}} \cdot \frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}}} \quad (20)$$

Em que $g(\mathbf{x})$ é a função objetivo (mm h^{-1})²; $\mathbf{x} = (x_1 = A, x_2 = B, x_3 = C, x_4 = D, x_5 = E, x_6 = F)^t$ o vetor que contém os parâmetros de ajuste; $i_{k_E k_C k_L}$ a intensidade de precipitação determinada no ensaio de campo (mm h^{-1}); $\hat{i}_{k_E k_C k_L}$ a intensidade de precipitação estimada (mm h^{-1}); k_E o índice que identifica o número do ensaio e; N_E a quantidade de ensaios de distribuição de água.

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

4.1.2.1 Método das estimativas descendentes

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

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

$$\nabla g(\mathbf{x}^{(k)}) = \left(2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial A}, 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial B}, 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial C}, \right. \\ \left. 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial D}, 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial E}, 2 \cdot g(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial F} \right)^t \quad (21)$$

fazendo: $\nabla g(\mathbf{x}^{(k)}) = \mathbf{z} = (z_A, z_B, z_C, z_D, z_E, z_F)^t$

Em que $\nabla g(\mathbf{x}^{(k)})$ é o gradiente da função e $\mathbf{z} = (z_A, z_B, z_C, z_D, z_E, z_F)^t$ é o vetor que contém os valores de gradiente da função.

As derivadas da função objetivo em relação aos parâmetros (A, B, C, D, E, F), apresentadas acima, são resolvidas numericamente com a série de Taylor truncada. Dessa forma, considerando um valor de delta (\square) igual a 0,001, as derivadas primeiras da função objetivo, em relação aos parâmetros, são aproximadas por:

$$\frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial x_i} \approx \frac{g(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta) - g(\mathbf{x} - \mathbf{e}_i \Delta)}{2 \cdot \Delta} \quad \text{com: } 1 \leq i \leq 6 \quad (22)$$

Em que \mathbf{e}_i é o vetor cuja única entrada diferente de zero é um valor 1 na i '-ésima coordenada.

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

$$\|\mathbf{z}\|_2 = z_0 = \sqrt{z_A^2 + z_B^2 + z_C^2 + z_D^2 + z_E^2 + z_F^2} \quad (23)$$

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

Os valores do vetor \mathbf{z} , que representam o gradiente da função objetivo, serão dados por:

$$\frac{\mathbf{z}}{z_0} = \left(\frac{z_A}{z_0}, \frac{z_B}{z_0}, \frac{z_C}{z_0}, \frac{z_D}{z_0}, \frac{z_E}{z_0}, \frac{z_F}{z_0} \right)^t \quad (24)$$

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

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \sigma \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0} \quad \text{para qualquer constante } \sigma > 0 \quad (25)$$

Como apresentado na expressão 25, para a determinação do valor de $\mathbf{x}^{(k+1)}$, um valor de “ σ ” deve ser escolhido. Para encontrar um valor de “ σ ” que proporcione um valor mínimo da função, são definidos dois valores de “ σ ”: $\sigma_1 = 0$; $\sigma_2 = 1$. A partir desses dois valores são realizados, para encontrar um valor apropriado de “ σ ”, a seguinte seqüência de cálculos:

$$\text{Passo 1: Enquanto: } g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \sigma_2 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) \geq g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \sigma_1 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) \quad \text{Faça: } \sigma_2 = \frac{\sigma_2}{2}$$

$$\text{Passo 2: Calcule: } \sigma_0 = \frac{\sigma_2}{2} \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \frac{\sigma_2 \cdot \mathbf{z}}{2 \cdot z_0}\right) - g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \sigma_1 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right)}{g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \sigma_2 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) - 2 \cdot g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \frac{\sigma_2 \cdot \mathbf{z}}{2 \cdot z_0}\right) + g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \sigma_1 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right)} \right]$$

$$\text{Passo 3: Encontre: } \sigma = \begin{cases} \text{se: } g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \sigma_0 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) \leq g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \sigma_2 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) & \rightarrow \sigma = \sigma_0 \\ \text{se: } g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \sigma_0 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) > g\left(\mathbf{x}^{(k)} - \sigma_2 \cdot \frac{\mathbf{z}}{z_0}\right) & \rightarrow \sigma = \sigma_2 \end{cases}$$

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

4.1.2.2 Método de Newton

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

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

$$f_i(\mathbf{x}) = \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial x_i} \approx \frac{g(\mathbf{x} + e_i \Delta) - g(\mathbf{x} - e_i \Delta)}{2 \cdot \Delta} \quad (26)$$

com: $1 \leq i \leq 6$; $\Delta = 0,001$

Ao calcular inicialmente os valores das seis funções, representadas na equação 26, com o valor inicial dos parâmetros de ajuste e não encontrar valores suficientemente próximos de zero, calculou-se o valor dos fatores de correção “ $\square A = y_1$ ”, “ $\square B = y_2$ ”, “ $\square C = y_3$ ”, “ $\square D = y_4$ ”, “ $\square E = y_5$ ” e “ $\square F = y_6$ ”, inseridos no vetor \mathbf{y} , que devem ser adicionados, respectivamente, aos valores atuais de “A”, “B”, “C”, “D”, “E” e “F”.

A determinação dos fatores de correção, calculados com base em aproximações das seis funções, dadas na expressão 26, é efetuada de acordo com a série de Taylor assumindo que os valores dos fatores de correção dos parâmetros de ajuste (A, B, C, D, E e F) são suficientes para que os resultados da expressão 26 sejam iguais a zero. Os valores dos fatores de correção $\mathbf{y} = (\square A = y_1, \square B = y_2, \square C = y_3, \square D = y_4, \square E = y_5 \text{ e } \square F = y_6)^t$, escritos em termos de álgebra matricial, são determinados por:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_4(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_5(\mathbf{x})}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_3} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_4} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_5} & \frac{\partial f_6(\mathbf{x})}{\partial x_6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1(\mathbf{x}) \\ -f_2(\mathbf{x}) \\ -f_3(\mathbf{x}) \\ -f_4(\mathbf{x}) \\ -f_5(\mathbf{x}) \\ -f_6(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (27)$$

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

- para elementos da matriz jacobiana ($\mathbf{J}(\mathbf{x})$) com índices $i' = j'$:

$$\frac{\partial f_{i'}(\mathbf{x})}{\partial x_{i'}} \approx \frac{g(\mathbf{x} + e_{i'}\Delta) - 2 \cdot g(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x} - e_{i'}\Delta)}{\Delta^2} \quad \text{com: } 1 \leq i' \leq 6 \quad (28)$$

- para elementos da matriz jacobiana ($\mathbf{J}(\mathbf{x})$) com índices $i' \neq j'$:

$$\frac{\partial f_{i'}(\mathbf{x})}{\partial x_{j'}} \approx \frac{g(\mathbf{x} + e_{i'}\Delta + e_{j'}\Delta) - g(\mathbf{x} - e_{i'}\Delta + e_{j'}\Delta) - [g(\mathbf{x} + e_{i'}\Delta - e_{j'}\Delta) - g(\mathbf{x} - e_{i'}\Delta - e_{j'}\Delta)]}{4 \cdot \Delta^2} \quad (29)$$

com: $1 \leq i' \leq 6$; $1 \leq j' \leq 6$

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

A matriz jacobiana da expressão 27, é uma matriz simétrica com elementos da diagonal principal diferentes de zero. Assim, calcula-se somente os elementos da diagonal principal, pela equação 28, e os elementos acima da diagonal principal, pela equação 29, visto que os valores dos elementos de cada i' coluna são iguais aos valores dos elementos de cada i' linha.

A resolução do sistema de equações apresentado na expressão 27 é dada pela fatoração LDL^t (Burden & Faires, 2003). Esta resolução, para encontrar os fatores de correção é efetuada por um número de até 10 iterações ou de modo que a função objetivo assuma um valor próximo a zero (<0,001). Dessa forma, os valores dos parâmetros “A”, “B”, “C”, “D”, “E” e “F” serão determinados por:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \mathbf{y} \quad (30)$$

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

$$D_M = \sqrt{\frac{g(A, B, C, D, E, F)}{N_V}} \quad (31)$$

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

4.2 Aplicação do modelo matemático

O modelo matemático descrito foi aplicado aos ensaios de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250 operando com os bocais 18x5 mm e 18x7 mm, sob as pressões de serviço de 392 e 490 kPa. Esses ensaios foram realizados nas condições sem e com vento.

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

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

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

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Rotina computacional

Na Figura 3 é mostrada a rotina computacional desenvolvida, em *Visual Basic 6* e incorporada ao SIMULASOFT (Prado, 2004) para ajustar os parâmetros de vento do modelo de Richards & Weatherhead (1993). Como mostrado na Figura 3a, na janela inicial é necessário definir as condições operacionais do aspersor. Nessa janela também é necessário assinalar o número de ensaios (um, dois ou três) de distribuição de água realizados com o aspersor operando em condições de vento.

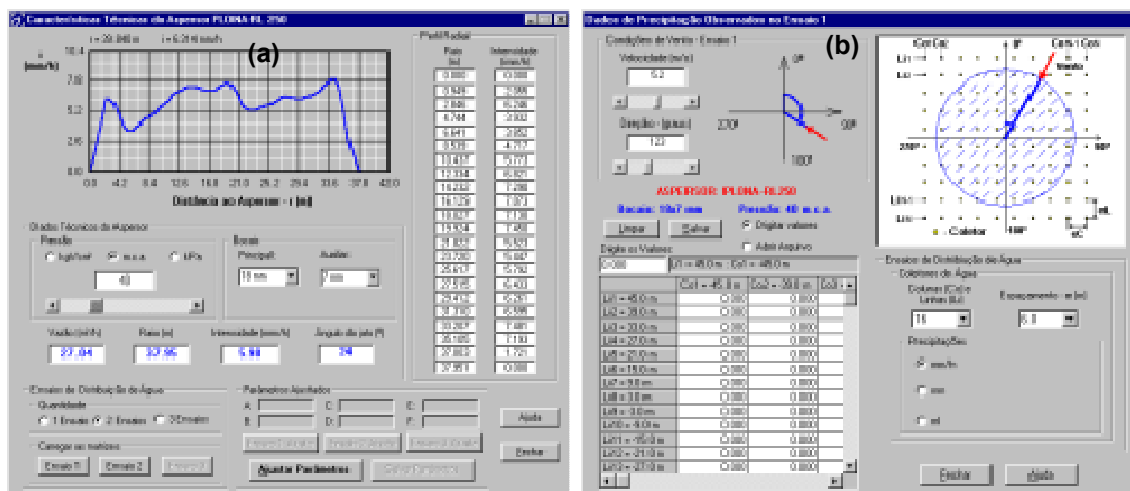


Figura 3. Telas da rotina computacional para entrada de dados: (a) dados técnicos do aspersor e ajustes dos parâmetros de vento; (b) dados dos ensaios de distribuição de água em condições de vento.

Ao definir o número de ensaios de distribuição de água realizados em condições de vento (Figura 3a), na tela seguinte (Figura 3b), dá-se a entrada dos valores médios de velocidade e direção do vento e dos valores de precipitação observados nos ensaios de campo. A entrada desses valores pode ser por meio de digitação ou de abertura de arquivo, que deve estar na extensão *.TXT, separado por tabulações.

Com os dados de ensaio de distribuição de água determinados em condições de vento, o programa determina os valores dos parâmetros minimizando a diferença entre os valores de intensidade de precipitação estimadas e observadas. Os valores de intensidade de precipitação

estimados e observados são apresentados graficamente, conjuntamente com o desvio médio das estimativas (Figura 4). O programa também apresenta os valores numéricos de intensidade de precipitação estimada, caso seja uma opção do usuário.

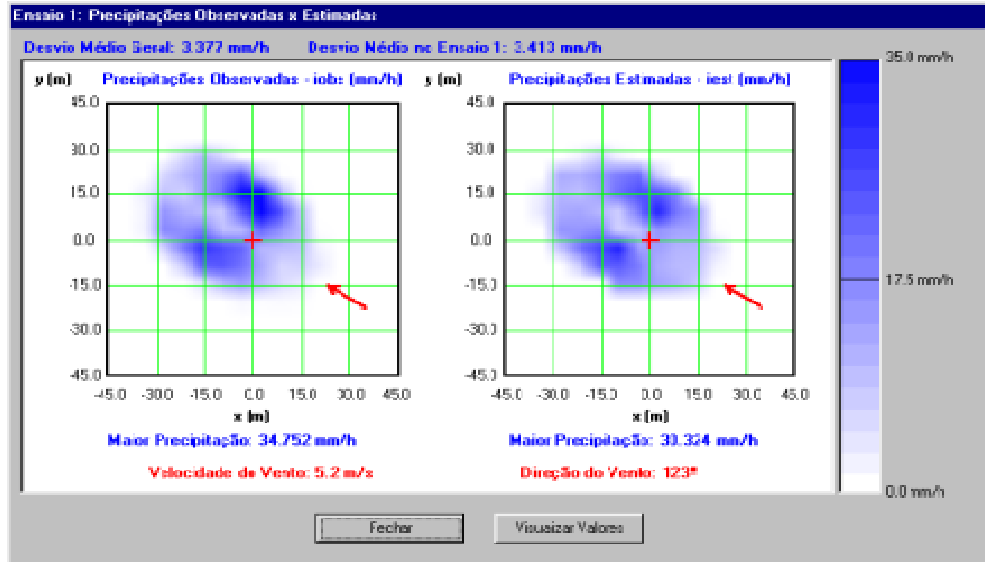


Figura 4. Apresentação gráfica do ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento.

Os parâmetros ajustados, para combinação de bocal e pressão de serviço do aspersor, podem ser salvos e utilizados no SIMULASOFT (Prado, 2004) para simulação da distribuição espacial de água do aspersor operando em sistemas autopropelidos de irrigação.

5.2 Ajuste dos parâmetros

As formas geométricas dos perfis radiais de distribuição de água obtidas em laboratório na condição de ausência de vento são apresentadas na Figura 5. Esses perfis radiais foram determinados para as mesmas combinações de bocais e pressão de serviço utilizadas nos ensaios de distribuição de água no campo em condições de vento.

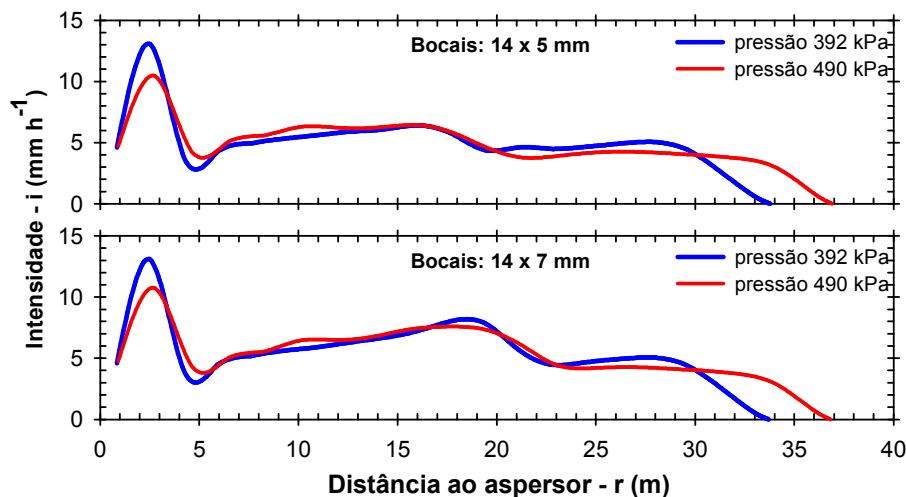


Figura 5. Perfis radiais de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250, obtidos na ausência de vento, para as condições operacionais de bocais e pressão de serviço utilizadas nos ensaios de campo.

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

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

Tabela 1. Condições médias de vento (velocidade e direção) observadas durante a realização dos ensaios de distribuição de água no campo.

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

* Coeficiente de variação (CV).

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

Na Tabela 2 são mostrados os ajustes dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento, os valores da função objetivo e o desvio médio entre as intensidades de precipitação observadas nos ensaios e estimadas pelo modelo de ajuste. O maior desvio médio observado foi igual a 3,611 mm h⁻¹. Granier et al. (2003) encontraram um desvio médio igual a 3,380 mm h⁻¹ no ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento, utilizando apenas um ensaio de campo de distribuição de água. Richards & Weatherhead (1993), no ajuste dos

parâmetros de distorção do vento, verificaram desvios médios que variaram entre 1,4 a 3,4 mm h⁻¹ tendo os maiores valores de desvios médios sido observados nas velocidades de vento maiores.

Tabela 2. Parâmetros de distorção do vento ajustados para o aspersor PLONA-RL250 operando com os bocais 18x5 e 18x7 mm sob as pressões de 392 e 490 kPa.

Ajuste dos Parâmetros	Bocal 18x5 mm		Bocal 18x7 mm	
	p = 392 kPa	p = 490 kPa	p = 392 kPa	p = 490 kPa
A (m m⁻¹ s)	1,155	1,784	1,011	0,818
B (m m⁻¹ s)	1,051	-0,517	1,352	2,303
C (m m⁻¹ s)	-0,893	0,106	-1,029	-1,602
D (m m⁻¹ s)	0,104	1,533	1,712	1,413
E (m m⁻¹ s)	12,342	10,691	5,739	7,814
F (m m⁻¹ s)	-9,046	-8,584	-4,086	-5,393
D_M* (mm h⁻¹)	2,575	2,168	3,377	3,611
g(A,B,C,D,E,F) (mm² h⁻²)	1.306,5	1.047,9	1.653,9	2.125,7

* Desvio médio (D_M).

O ajuste dos parâmetros de distorção devido ao vento, mostrados na Tabela 2, não garantem que o valor da função objetivo seja um valor com um mínimo global. Este valor pode ser um mínimo local. Segundo Saramago (2003), raramente pode-se garantir a existência e a unicidade de um ponto ótimo global, devido à existência de várias soluções, mau condicionamento numérico ou lenta convergência.

Conforme Šimunek & Hopmans (2002), uma estratégia para alcançar um valor com um mínimo global da função objetivo seria iniciar o processo de otimização a partir de diferentes configurações dos parâmetros; caso se encontre o mesmo valor final dos parâmetros, tem-se alguma garantia de mínimo global. Entretanto, a utilização deste procedimento no ajuste dos parâmetros de distorção pelo vento exigiria um grande esforço computacional e um grande intervalo de tempo seria despendido para encontrar a solução.

Na Figura 6 são apresentados os valores da função objetivo, determinados com diferentes configurações dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), para a condição operacional do aspersor PLONA-RL250 trabalhando com os bocais 18x7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa. A representação gráfica da função objetivo apresentada na Figura 6, foi efetuada em relação aos parâmetros "C" e "D". Nesta figura, é possível observar que o valor mínimo da função objetivo situa-se na região na qual foram ajustados os parâmetros.

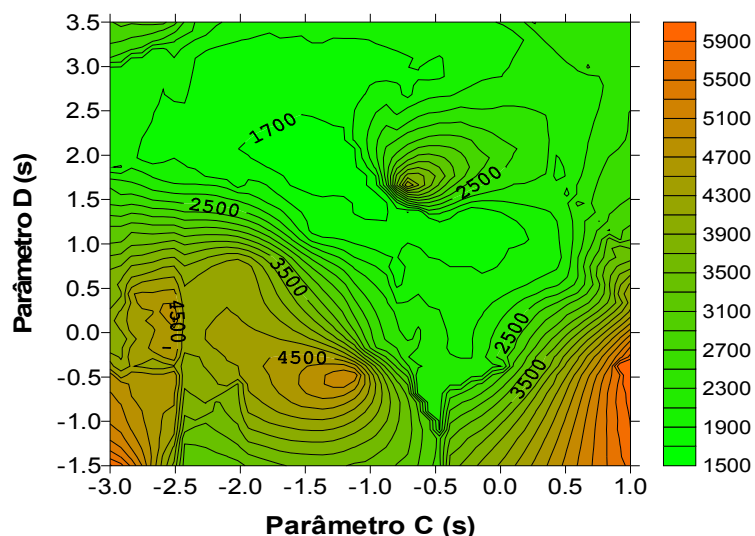


Figura 6. Valores da função objetivo ($g(A,B,C,D,E,F)$ em mm^2h^{-2}) em relação aos parâmetros “C” e “D”, para ensaio do aspersor PLONA-RL250 operando com os bocais 18x7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa.

Para o caso específico dos valores da função objetivo da Figura 6, é nítida a ocorrência de uma região (vale) em que a combinação dos parâmetros de ajuste leva para um mínimo e a ocorrência de regiões (vales) nas quais as combinações dos parâmetros levam para um valor máximo da função objetivo. Dessa forma, a estimativa inicial dos parâmetros de ajuste, pelo método das estimativas descendentes, é fundamental para assegurar a convergência para um local mínimo da função objetivo quando aplicado o método de Newton.

Na Figura 7 são mostrados as superfícies dos valores de intensidade de precipitação observados nos ensaios de distribuição de água obtidos no campo e os valores de intensidades de precipitação estimados com os parâmetros ajustados. Esta representação gráfica foi feita para a condição operacional do aspersor PLONA-RL250, trabalhando com os bocais 18x7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa. Como mostrado nesta figura, os valores estimados de intensidades de precipitação à direita e à esquerda do vetor vento são praticamente simétricos.

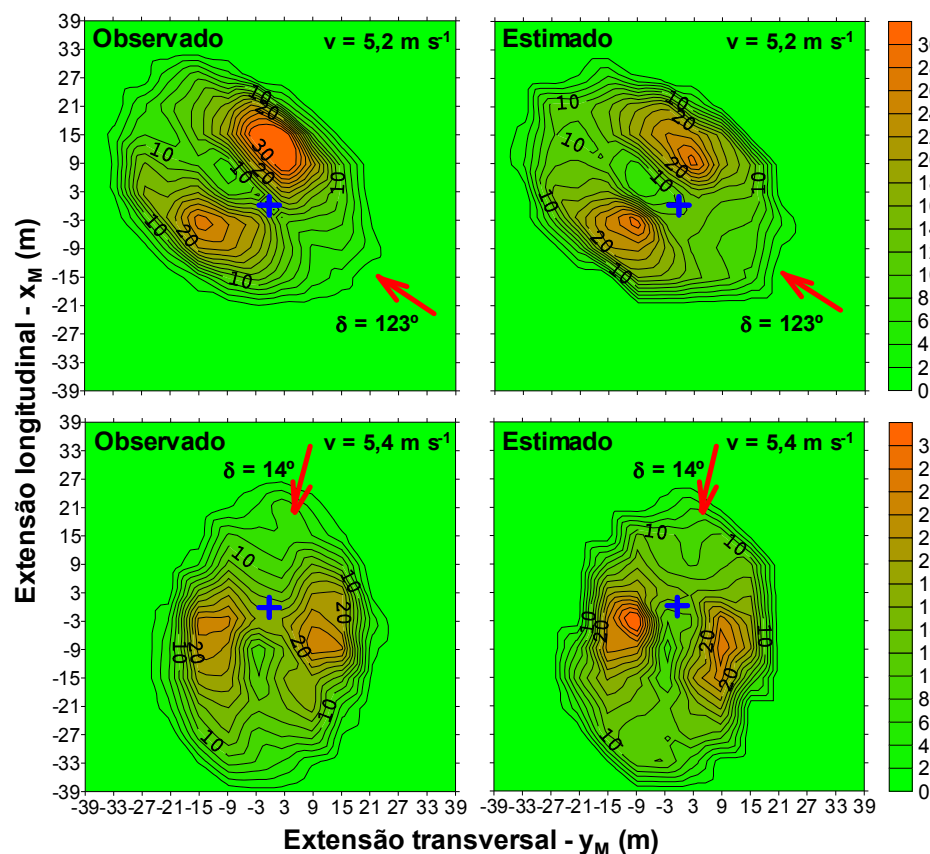


Figura 7. Valores de intensidades de precipitação observadas nos ensaios de distribuição de água e estimadas pelo modelo, para o aspersor PLNA-RL250 operando com os bocais 18x7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa.

A condição operacional do aspersor PLONA-RL250, mostrada pela Figura 7, apresentou um desvio médio igual a $3,377 \text{ mm h}^{-1}$ entre os valores de intensidade de precipitação observados e estimados. Entretanto, as superfícies dos valores estimados apresentaram boa semelhança com as superfícies dos valores observados. De acordo com as considerações de Vories et al. (1987), apesar de os modelos não retratarem exatamente a distribuição de água de aspersores operando em condições de vento, os modelos matemáticos podem contribuir para uma melhor configuração destes equipamentos no campo.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que: i) a rotina computacional apresentada permite ajustar os parâmetros de distorção ocasionados pelo vento, utilizando até três ensaios de distribuição de água efetuados no campo; ii) os ensaios de distribuição de água no campo devem ser realizados, preferencialmente, para velocidades do vento entre 3 a 5 m s^{-1} ; iii) os parâmetros ajustados pelo aplicativo computacional não garantem que o valor da função objetivo seja um ponto de mínimo global e; iv) os parâmetros ajustados podem ser utilizados para simular a distribuição de água de aspersores para qualquer direção do vento e para velocidade do vento que exceda aos valores observados nos ensaios de campo.

7 REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, H. J. et al. Influência de elementos do clima no desperdício de energia de um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 336-341, set./dez. 1999.
- BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 740 p.
- CARRIÓN, P.; TARJUELO, J. M.; MONTERO, J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. I Description of model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p.73-84, June 2001.
- DECHMI, F. et al. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain II. Irrigation, evulation, simulation and scheduling. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 61, p. 93-109, 2003.
- GRANIER, J.; MOLLE, B.; DEUMIER, J. M. IRRIPARC - Part 1: modeling water distribution under a sprinkler in windy conditions. In: EUROPEAN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 20., 2003, Montpellier. **Anais...** Montpellier: AFEID, 2003.
- HOLZAFEL, E. A. et al. Análisis técnico-econômico para seleccíon de aspersores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 557-563, nov./dez. 2007.
- MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; CARRIÓN, P. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. II Calibration and validation of the model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p. 85-98, May 2001.
- NEWELL, G. F.; FOLEY, J.; SMITH, R. **TRAVGUN-Travelling Gun Simulation model user's manual**. Version 1.1. Toowooba, QLD. Australia. 2003. 91.p.
- NUNES, D. et al. **Indicadores do setor sucroalcooleiro - safras 2003/2004**. Ribeirão Preto, Grupo IDEA, 2004, 111 p.
- PLAYÁN, E. et al. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 84, p. 89-100, 2006.
- PRADO, G. **Aplicativo computacional para simulação da distribuição de água pelo aspersor PLONA-RL300 em sistemas autopropelidos de irrigação**. 2004. 86 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- PRADO, G.; COLOMBO, A. Caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 53-63, jan./abr. 2005.
- REVISTA ITEM**. Cerrados podem se tornar um imenso canavial, São Paulo, n. 69/70, p. 73-75. 2006

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

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

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

SMITH, R.; BAILLE, C. GORDON, G. Performance of travelling gun irrigation machines. In: **Proceeding of the Australian Society Sugar Cane Technologists**, v. 24, 2002.

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

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

ZAPATA, N. et al. From on-farm solid-set sprinkler irrigation desing to collective irrigation network desing in windy areas. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 87, p. 187-199, 2007.