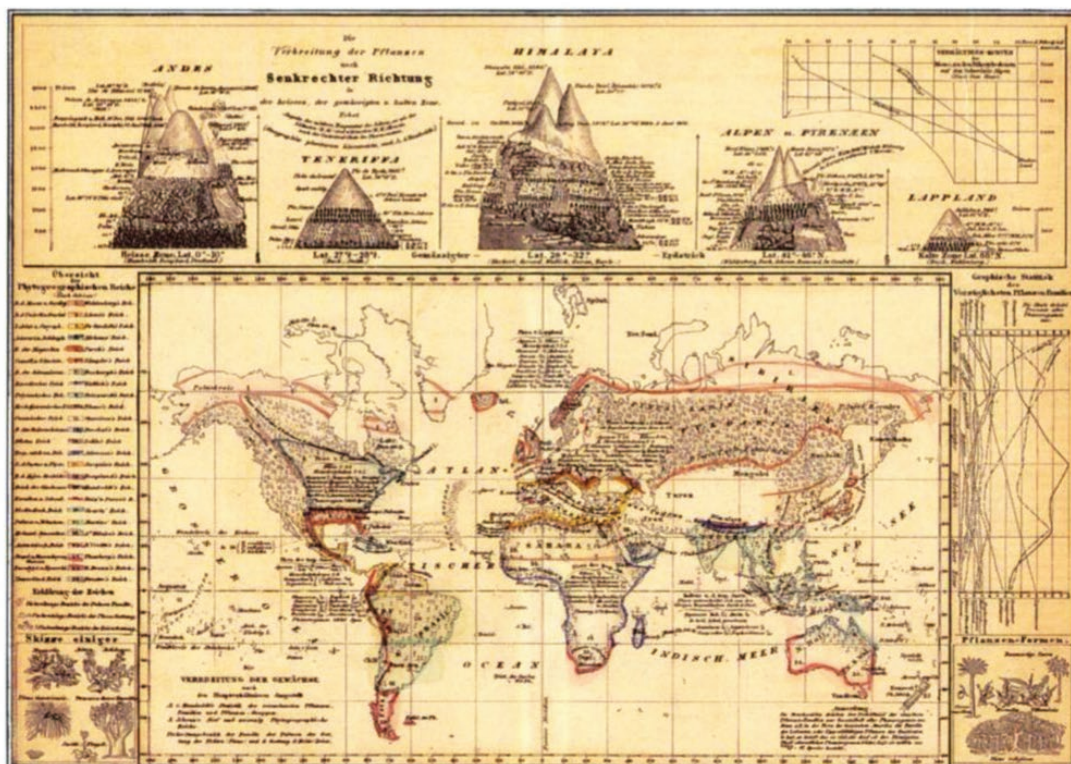


CADERNOS DE GEOGRAFIA

INSTITUTO DE ESTUDOS GEOGRÁFICOS
 FACULDADE DE LETRAS • UNIVERSIDADE DE COIMBRA
 COIMBRA 1995 N.º 14



MODELAÇÃO NUMÉRICA DE SIMULADORES DE CHUVA

João L. M. P. de Lima*
Manuel A. C. Nunes*

RESUMO

Os simuladores de chuva são utilizados no estudo de uma grande variedade de processos (i.e. erosão hídrica, infiltração, escoamento superficial, arrastamento de agroquímicos, etc.). O vento influencia os resultados das experiências de campo com simuladores de chuva. A trajectória e velocidade das gotas de água é alterada, sendo afectadas a distribuição da aplicação de água e a da energia cinética, bem como as características hidráulicas do escoamento superficial gerado, nomeadamente em relação à sua velocidade e profundidade. Um modelo numérico tridimensional (LIMA e TORFS, 1993) foi criado a partir do movimento de cada gota, após serem ejectadas pelo nebulizador do simulador de chuva. A quantidade de movimento de cada gota é afectado pelas forças de atrito, vento e gravidade. As distribuições de aplicação de água, energia cinética e das forças que conduzem o escoamento superficial foram estimadas através da associação de um modelo hidrodinâmico para o movimento das gotas, um gerador estocástico de gotas que representa um nebulizador simples de cone preenchido, e um algoritmo apropriado que representa a intercepção com a superfície do solo. O modelo matemático vem facilitar a selecção de nebulizadores simples de cone preenchido e do tamanho e configuração da área molhada pela chuva simulada.

Palavras-chave: Modelação numérica. Simuladores de chuva. Nebulizadores. Acção do vento.

RÉSUMÉ

Les simulateurs de pluie sont utilisés pour l'étude d'une grande variété de processus (i.e. érosion hydraulique, infiltration, écoulement superficiel, entrainement de produits agrochimiques, etc.). Le vent influence les résultats des expériences de champ qui utilisent des simulateurs de pluie. La trajectoire et la vitesse des gouttes d'eau est modifiée, ce qui change la distribution de l'application de l'eau et de l'énergie cinétique, ainsi que les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement superficiel généré, notamment la vitesse et la profondeur. Le modèle numérique tridimensionnel (LIMA et TORFS, 1993) a été développé à partir du mouvement de chaque goutte, après éjection par le pulvérisateur du simulateur de pluie.

La quantité de mouvement de la goutte est affectée par les forces de frottement, par le vent et par le pesanteur. Les distributions de l'application de l'eau, l'énergie cinétique et les forces qui conduisent l'écoulement superficiel ont été estimées à partir du couplage d'un modèle hydrodynamique pour le mouvement des gouttes, d'un générateur stochastique de gouttes qui représente un pulvérisateur simple de cône plein, et d'un algorithme approprié qui représente l'intersection avec la surface du sol. Le modèle mathématique facilite la sélection de pulvérisateurs simples de cône plein et de la taille et configuration de la surface mouillée par la pluie simulée.

Mots-clés: Modèle numérique. Simulateur de pluie. Pulvérisateur. Influence du vent.

ABSTRACT

Rainfall simulators are used in studies of a variety of different processes (i.e., water erosion, infiltration, overland flow, movement of agrochemicals, etc.). Wind affects field experiments that

* Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

make use of rainfall simulators. Water-drop trajectories and velocities are altered, affecting water application, kinetic energy distributions, and the hydraulics of underlying overland flow, namely water depths and velocities. A three-dimensional numerical model (LIMA and TORRES, 1993) was developed from the movement of individual drops after their release from the nozzle of a simulator. The original momentum of a single drop is affected by drag forces, wind and gravity. Water application, kinetic energy and overland flow driving force distributions were estimated from the coupling of the hydrodynamic model for drop movement, a stochastic drop generator representing a single full-cone spray nozzle, and an appropriate interception algorithm at the soil surface. The mathematical model should facilitate the selection of single full-cone spray nozzles and the size and configuration of the spray area for rainfall simulations.

Key Words: Numerical modelling. Rainfall simulators. Nozzles. Wind effects.

1 - INTRODUÇÃO

O problema da quantificação da erosão hídrica e do escoamento superficial em encostas vem sendo abordado há largos anos. Para tal, tem-se procedido à observação do efeito da chuva, natural ou simulada, sobre pequenos talhões representativos da área em estudo. Apesar das observações sob chuva natural representarem exactamente as condições naturais do fenómeno, a recolha de dados é extremamente demorada e a variação espacial e temporal da intensidade, duração e energia cinética da chuva não pode ser controlada (MOORE *et al.*, 1983). Opostamente, a utilização de simuladores de chuva torna possível obter rapidamente uma grande quantidade de informação. Na Fig. 1 apresenta-se um esquema de um simulador de chuva.

O uso dos simuladores de chuva traz bastantes vantagens, podendo-se referir as seguintes:

- Em termos económicos é mais eficiente pois, sendo o período de investigação menor, a manutenção dos talhões fica menos dispendiosa (MEYER, 1965);
- Permite um maior controlo da intensidade, duração e energia cinética da precipitação;
- Devido à facilidade de transporte, podem ser efectuadas várias repetições para distintas condições de solo (textura, cobertura e mobilização), relevo, vegetação, etc;
- Permite a execução de estudos de campo perante boas condições atmosféricas. No caso da investigação ser conduzida perante chuva natural, o investigador, para a obtenção de dados em tempo real, necessita de se sujeitar às más condições atmosféricas.

Os simuladores de chuva são também utilizados no estudo da influência da chuva no arrastamento de produtos agroquímicos (fertilizantes inorgânicos e pesticidas) e consequente impacto na qualidade da água dos meios receptores (rios, albufeiras e aquíferos).

KAMPHORST (1987) utilizou um simulador de chuva para determinação do factor K (credibilidade do solo) da

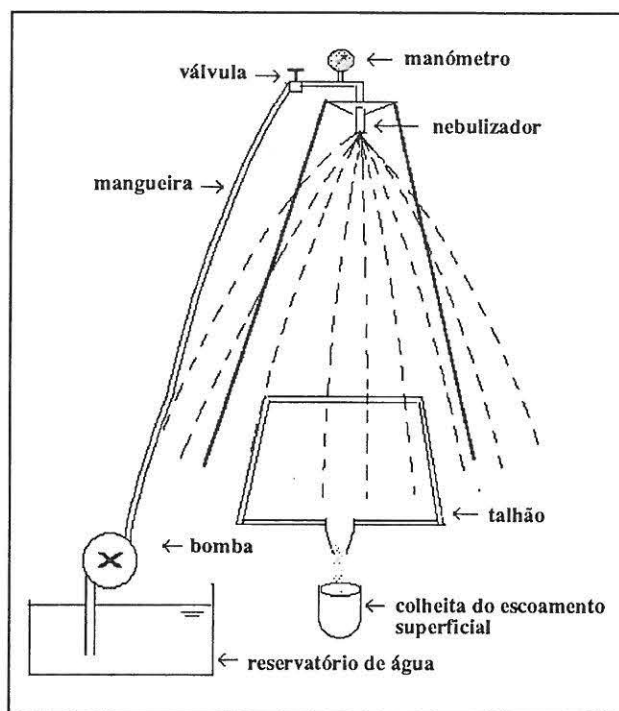


Fig. 1 - Esquema de um simulador de chuva com as respectivas componentes.

equação universal das perdas de solo por erosão (USLE). Um simulador de chuva foi igualmente empregue no estudo do efeito do impacto das gotas de chuva sobre solos tropicais, sujeitos a diferentes esquemas de mobilização do solo (OLAYEMI e YADAV, 1983).

Quando são efectuadas investigações utilizando simuladores de chuva há que ter em atenção os seguintes aspectos:

- Velocidade das gotas e sua distribuição de diâmetros idênticas às verificadas na chuva natural para as várias intensidades de precipitação. Segundo MEYER (1965), chuvadas de intensidade distintas têm diferentes distribuições de diâmetro das gotas;

- Escolha de intensidades e durações de precipitação semelhantes às observadas;
- Variação da distribuição da intensidade de precipitação e das características das gotas durante a chuvada;
- Ângulo da trajectória das gotas com a superfície do solo no momento do impacto (MOORE *et al.*, 1983);
- Aplicação a talhões de área adequada para que se torne viável a extrapolação dos resultados.

Em dias de vento o desempenho de um simulador de chuva é bastante afectado. Por esta razão os investigadores evitam ir para o campo em dias de vento intenso, ou então constroem um abrigo para a área em estudo. Para além de afectar a trajectória das gotas simuladas, o vento influencia as características hidráulicas do escoamento superficial, nomeadamente a espessura da lâmina de água escorrida e a sua velocidade. Este facto introduz um maior número de variáveis a ter conta na análise dos resultados, o que vem dificultar as conclusões a tirar do trabalho de campo.

O componente principal de um simulador de chuva é o que produz as gotas de chuva simulada. Este órgão pode ser constituído por um nebulizador ou por um formador de gotas. Os formadores de gotas apenas são aplicáveis a pequenos talhões, ao passo que os nebulizadores, podem ser utilizados quer em pequenos quer em grandes talhões, uma vez que são mais baratos e de utilização mais simples (SHELTON *et al.*, 1985). Os nebulizadores mais utilizados são os de cone totalmente preenchido (Fig. 2). Na escolha de um nebulizador há que levar em conta as suas características hidráulicas (diâmetro das gotas, ângulo do leque de ejeção e caudal), e as características do meio em que o estudo é feito (relevo e vento).

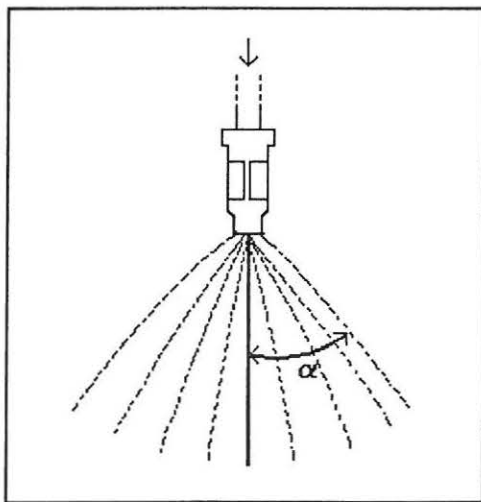


Fig. 2 - Nebulizador de cone preenchido. α é o ângulo máximo do leque de ejeção.

Com o fim de auxiliar a selecção de um nebulizador, é utilizada a modelação matemática, a qual permite estudar os desempenhos de diferentes nebulizadores perante diversas situações de declive e intensidade do vento. Esta questão é o assunto principal abordado no presente artigo, no qual apenas serão estudados os nebulizadores de cone preenchido.

2 - TEORIA

2.1 - Equações básicas

Uma vez ejectadas pelo nebulizador, as gotas movem-se pela acção da gravidade e das forças de atrito com o ar. OKARUMA e NAKANISHI (1969) observaram, através de estudo fotográfico, que a deformação das gotas durante o movimento é aleatória, sendo portanto viável considerar que as gotas assumem uma forma esférica. A trajectória de uma gota de água depende do seu tamanho, sendo pois necessário entrar em conta com uma série de diferentes diâmetros de gotas para a análise do problema.

A simulação matemática da chuva criada pelo nebulizador apenas pode ser efectuada a duas dimensões se não existir vento. Caso contrário, torna-se necessário entrar em conta com um modelo tridimensional (simétrico em relação à direcção do vento).

Para o estudo do movimento da gota assume-se que o escoamento considerado é incompressível (PRUPPACHER e KLETT, 1978). Devido à aceleração da gota de água estar em simultâneo sob o efeito da força da gravidade, velocidade de saída do nebulizador, forças de sustentação no ar e forças aerodinâmicas, é gerado um regime variável. Não obstante, argumentos apresentados por PRUPPACHER e KLETT (1978) demonstram que o efeito da aceleração local no fluido é desprezável, uma vez que $\rho_a/\rho_h \ll 1$ (ρ_a é a massa específica do ar e ρ_h é a massa específica da água). Desta forma, torna-se possível o emprego de fórmulas referentes ao regime permanente para a descrição da resistência hidrodinâmica ao movimento da gota. Assim, a segunda lei de Newton do movimento irá ser aplicada para a determinação da velocidade da gota ao longo da sua trajectória, sendo apenas consideradas as forças de atrito, sustentação e de gravidade. A soma vectorial destas forças representa a aceleração da gota, ou seja :

$$m \frac{du_x}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_a V_R^2 A C_D e_x \quad (1)$$

$$m \frac{du_y}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_a V_R^2 A C_D e_y \quad (2)$$

$$m \frac{du_z}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_a V_R^2 A C_D e_z + mg - \frac{\rho_a}{\rho_h} mg \quad (3)$$

(I) (II) (III) (IV)

com

$$e_x = \frac{u_x - w}{V_R}; \quad e_y = \frac{u_y}{V_R}; \quad e_z = \frac{u_z}{V_R} \quad (4)$$

$$V_R = \sqrt{(u_x - w)^2 + u_y^2 + u_z^2} \quad (5)$$

$$m = \frac{\rho_h}{6} \pi D^3 \quad (6)$$

sendo u_x , u_y e u_z as componentes da velocidade da gota (m/s), e_x , e_y e e_z as componentes do vector unitário que dá a direcção da velocidade da gota em relação ao vento (m/s), w a velocidade do vento (m/s), a qual se assume ter a direcção do eixo dos XX, m a massa da gota (kg), A a secção transversal característica da gota (tirada na perpendicular à direcção do escoamento) (m^2), C_D o coeficiente de atrito da gota esférica, V_R o valor absoluto da velocidade da gota em relação ao vento (m/s) e D o diâmetro da gota (m).

Na Eq. 3, os termos I, II, III e IV representam respectivamente a aceleração da gota, a força de atrito, a força da gravidade e a força de sustentação. Todas estas equações são resolvidas numericamente. As forças actuantes são determinadas para pequenos incrementos de tempo, num cálculo iterativo que termina quando a gota atinge a superfície do solo.

Segundo HOERNER (1958) e WILLIAMSON e THREADGILL (1974), o coeficiente de atrito de uma gota esférica é determinado em função do seu número de Reynolds (Re_g), o qual se define por:

$$Re_g = \frac{V_R D}{\nu_a} \quad (7)$$

em que ν_a é o coeficiente de viscosidade cinemática do ar, definida da seguinte forma (EDLING, 1985):

$$\nu_a = 1.3045 \cdot 10^{-5} + 1.222 \cdot 10^{-7} T_a - 9.6471 \cdot 10^{-10} T_a^2 + 7.2873 \cdot 10^{-12} T_a^3 \quad (8)$$

onde T_a é a temperatura do ar ($^{\circ}C$), que se assume de valor constante com a altura.

Ainda de acordo com EDLING (1985), a massa volúmica do ar pode igualmente ser calculada em função de T_a , de acordo com a expressão:

$$\rho_a = 1.29331 - 0.00496 T_a + 2.807 \cdot 10^{-5} T_a^2 - 1.88 \cdot 10^{-7} T_a^3 \quad (9)$$

A relação entre o coeficiente de atrito da gota esférica e o número de Reynolds é feita mediante as seguintes expressões (HOERNER, 1958 e WILLIAMSON e THREADGILL, 1974):

$$C_D = \frac{24}{Re_g} \quad se \quad Re_g < 0.5 \quad (10)$$

$$C_D = \frac{26.38}{Re_g^{0.845}} + 0.49 \quad se \quad 0.5 \leq Re_g < 200 \quad (11)$$

$$C_D = \sqrt{0.525 + \left(\frac{24}{Re_g}\right)^2} \quad se \quad 200 \leq Re_g \leq 10000 \quad (12)$$

$$C_D = 0.44 \quad se \quad Re_g > 10000 \quad (13)$$

Assumindo que a velocidade do vento segue um perfil logarítmico acima da superfície do solo e que sopra no sentido positivo do eixo dos XX, temos que:

$$w = \left(\frac{u^*}{K}\right) \ln \frac{z_1}{z_0} \quad (14)$$

para $z_1 > z_0$

com

$$u^* = \frac{w_{10} K}{\ln \frac{10}{z_0}} = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} \quad (15)$$

sendo z_0 a espessura da rugosidade à superfície do solo (m), z_1 a altura a que se pretende determinar w (no caso da existência de escoamento superficial, $z_1 = z_1 - h$, em que h representa a espessura da lâmina de água escorrida e neste caso, z_0 é a rugosidade da superfície da água) (m), w_{10} a velocidade do vento a 10 metros de altura (altura à qual são geralmente feitas as medições da velocidade do vento nas estações meteorológicas), K a constante de Von Karman, τ a tensão tangencial de atrito (Pa), e u^* a velocidade de atrito (m/s).

2.2 - Distribuição da energia cinética e da aplicação de água no solo

A uniformidade de aplicação de água no solo é uma característica fundamental para a obtenção de bons resultados na simulação. A presença de vento pode levar a que, na área molhada coberta pelo simulador de chuva, haja zonas a receber mais água do que outras.

O fluxo de chuva interceptado numa superfície não horizontal depende do ângulo de incidência da chuva, da

inclinação da superfície e da orientação relativa entre a superfície e o vector representativo da direcção da chuva (STRUZER, 1972; SHARON, 1980 e LIMA, 1990). Alguns investigadores (STILLMUNKES e JAMES, 1982 e KOHL *et al.*, 1985) indicam que a selagem da superfície do solo provocada pela rega por aspersão está relacionada com a energia cinética da descarga do aspersor por unidade de área de solo regado, bem como do seu valor acumulado ao longo do tempo. Por esta razão, o estudo da distribuição da energia cinética numa área molhada é de todo o interesse.

A distribuição da aplicação de água e da energia cinética foram estimadas através da associação de um modelo hidrodinâmico para estudo do movimento da gota de água, um gerador estocástico de gotas (que representa um nebulizador de cone preenchido) e um algoritmo apropriado para a intercepção à superfície do solo.

Quando a distribuição do diâmetro das gotas é conhecida, a energia cinética total é função do perfil de velocidade do vento. No modelo em estudo, a velocidade de cada gota foi calculada em função da altura do nebulizador e da análise da velocidade da gota esférica ao longo do seu percurso, a qual é influenciada pela força da gravidade, vento e atrito. Para a obtenção da distribuição da energia cinética é efectuado o somatório da energia cinética das gotas que atingem cada elemento quadrado da área molhada ao nível do solo:

$$Ec = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i u_i^2 \quad (16)$$

sendo n o número de gotas que atingem a secção $\Delta x \Delta y$ da superfície do solo, no intervalo de tempo Δt e Ec a energia cinética na mesma secção (W/m^2).

Finalmente, a intensidade das gotas é dada por:

$$P_g = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\rho_h \Delta t \Delta x \Delta y} \quad (17)$$

em que P_{ef} é a precipitação efectiva (m/s).

2.3 - Influência no escoamento superficial

As características hidráulicas do escoamento superficial estão fortemente relacionadas com a variação espacial da chuva simulada. A variação espacial do diâmetro das gotas e do seu ângulo de incidência foi combinada com a tensão tangencial induzida pelo vento na interface água-ar, tornando-se assim possível estudar a influência do vento no escoamento superficial gerado por um simulador de chuva. Este estudo foi efectuado através da análise do campo de forças que conduz o escoamento superficial numa superfície inclinada. Nesta análise assume-se que a energia cinética das gotas é totalmente

dissipada quando estas atingem a lâmina de água escorrida.

Se considerarmos uma secção elementar de área $\Delta x \Delta y$, são três as forças envolvidas no processo:

(i) Força originada pela queda das gotas, a qual é estimada pelo princípio da quantidade de movimento:

$$\vec{F}_d = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{u}_i}{\Delta t} \quad (18)$$

(ii) Tensão tangencial de atrito com o vento, expressa em termos de τ (ver Eq. 15):

$$F_t = \Delta x \Delta y \tau \quad (19)$$

(iii) Acção da gravidade no escoamento:

$$\vec{F}_1 = \vec{g} \rho_h \Delta x \Delta y h \quad (20)$$

sendo h a profundidade média de escoamento na secção elementar $\Delta x \Delta y$.

Por uma questão de simplificação, os acréscimos de profundidade, velocidade e das forças envolventes devido à quantidade de movimento, pressão e resistência ao escoamento, não são considerados.

Para a análise do escoamento superficial há finalmente que determinar a projecção da força F (resultante da soma vectorial das três forças descritas) em cada secção elementar da superfície molhada:

$$\vec{F} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k} = (F_t + F_d \sin \alpha \cos \theta) \hat{i} + (F_d \sin \alpha \cos \theta) \hat{j} + (-F_1 - F_d \cos \alpha) \hat{k} \quad (21)$$

em que \hat{i} , \hat{j} e \hat{k} são os vectores unitários do sistema de eixos XYZ, α o ângulo que F_d faz com a vertical (0°) e θ o seu azimute (0°).

A intensidade de F é facilmente determinada através do cálculo da raiz da soma dos quadrados de cada uma das componentes do vector. Quanto à direcção de F , a sua determinação é feita da seguinte forma:

i) Calcular \hat{i}_1 e \hat{j}_1 , vectores que representam o sistema $X_1 Y_1$. X_1 é a intercepção da superfície com o plano XY e Y_1 a direcção do declive no sentido ascendente (Fig. 3).

$$\hat{i}_1 = \sin(\omega - \Omega) \hat{i} - \cos(\omega - \Omega) \hat{j} \quad (22)$$

$$\hat{j}_1 = \cos(\alpha_{np}) \cos(\omega - \Omega) \hat{i} + \cos(\alpha_{np}) \sin(\omega - \Omega) \hat{j} + \sin(\alpha_{np}) \hat{k} \quad (23)$$

em que ω e Ω são os azimutes da direcção do vento e da direcção do declive respectivamente. O ângulo da superfície com o plano horizontal é representado por α_{sup} .

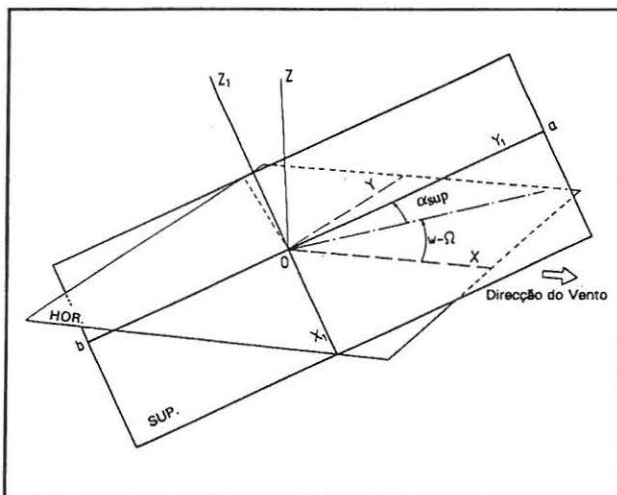


Fig. 3 - Eixos e planos utilizados na demonstração.

ii) Determinação de \hat{k}_1 , vector unitário perpendicular ao plano definido por \hat{i}_1 e \hat{j}_1 :

$$\hat{k}_1 = [-\cos(\omega - \Omega)\sin(\alpha_{sup})]\hat{i} + [-\sin(\omega - \Omega)\sin(\alpha_{sup})]\hat{j} + \cos(\alpha_{sup})\hat{k} \quad (24)$$

iii) Uma vez conhecido o novo sistema de eixos é efectuada a transformação de coordenadas do vector F de XYZ para $X_1Y_1Z_1$. Para tal transformação faz-se uso da matriz T:

$$T = \begin{bmatrix} \sin(\omega - \Omega) & \cos(\alpha_{sup})\cos(\omega - \Omega) & -\sin(\alpha_{sup})\cos(\omega - \Omega) \\ -\cos(\omega - \Omega) & \cos(\alpha_{sup})\sin(\omega - \Omega) & -\sin(\alpha_{sup})\sin(\omega - \Omega) \\ 0 & \sin(\alpha_{sup}) & \cos(\alpha_{sup}) \end{bmatrix} \quad (25)$$

Finalmente, as coordenadas do vector F no novo sistema (F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}) obtêm-se pela resolução do sistema de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (26)$$

3 - PROGRAMA SPRAY

LIMA e TORFS (1993) desenvolveram em C o programa SPRAY. Este programa resulta da associação de um modelo hidrodinâmico para o estudo do movimento das gotas, um gerador estocástico de gotas que representa o nebulizador de cone preenchido e um algoritmo que caracteriza a intercepção das gotas com a superfície do solo.

Para o funcionamento do programa SPRAY são necessários dados que caracterizem o meio físico em que o simulador está inserido (declive, rugosidade e altura de água à superfície, vento e temperatura), bem como informação sobre o funcionamento do nebulizador (caudal, velocidade de saída, ângulo do leque e diâmetro das gotas). Um exemplo de ficheiro de entrada para o funcionamento do programa SPRAY é apresentado na Fig. 4.

O programa permite a determinação dos seguintes elementos:

- Trajectória das gotas desde que são ejetadas até atingirem o solo;
- Distribuição da aplicação de água e do respectivo perímetro molhado;
- Distribuição da energia cinética;
- Campo de forças que conduz o escoamento superficial gerado na superfície do solo.

O programa permite igualmente, com base nos diâmetros de gotas (quantis) conhecidos, definir uma secção qualquer $\Delta x \Delta y$ para a análise da distribuição de frequências dos diâmetros de gotas interceptados nessa secção.

4 - RESULTADOS

4.1 - Movimento das gotas

A Fig. 5 ilustra o efeito do vento sobre a trajectória das gotas ejetadas por um nebulizador de cone preenchido, em várias direcções.

O vento tem uma acção mais intensa sobre as gotas de menor diâmetro, influenciando fortemente a distribuição espacial dos diâmetros das gotas (Fig. 6).

A área da superfície do solo molhada pelo nebulizador é influenciada pelo vento, pelo ângulo do leque de ejeção e pelo declive da superfície. No caso da superfície ser horizontal, a presença do vento apenas provoca uma translação da área molhada (Fig. 7- Centro). Contudo, se a superfície tiver declive de sentido oposto ao do vento, a área molhada reduz-se substancialmente (Fig. 7- Baixo).

Na Fig. 7-b é feita a análise da distribuição do diâmetro das gotas que atingem uma determinada secção da área

Informação geral:

declive da superfície (graus) = 10
 azimute da direcção do vento (graus) = 0
 altura do nebulizador (m) = 2
 espessura da lâmina de água (m) = 0.005

Informação física:

velocidade do vento a 10 m (m/s) = 6
 z_0 (m) = 0.003
 temperatura da água (°C) = 21

Descrição do nebulizador:

caudal (m³/s) = 0.002
 velocidade inicial (m/s) = 5
 a máximo (graus) = 60
 número de diâmetros = 9

diâmetro 1 (m) = 1.165E-3
 diâmetro 2 (m) = 1.575E-3
 diâmetro 3 (m) = 1.900E-3
 diâmetro 4 (m) = 2.195E-3
 diâmetro 5 (m) = 2.485E-3
 diâmetro 6 (m) = 2.780E-3
 diâmetro 7 (m) = 3.100E-3
 diâmetro 8 (m) = 3.490E-3
 diâmetro 9 (m) = 4.050E-3

Informação para a computação:

número de gotas = 50000
 incremento de tempo (s) = 0.01

Informação de saída:

mínimo x (m) = -2.0
 máximo x (m) = 2.0
 número de divisões de x = 40
 mínimo y (m) = -2.0
 máximo y (m) = 2.0
 número de divisões de y = 40

Fig. 4 - Exemplo de ficheiro de entrada do programa SPRAY

molhada (rectângulo assinalado na Fig. 7-a). Nesta análise, verifica-se que a influência isolada do declive é pouco significativa (Fig. 7-b-Topo), o mesmo não se podendo dizer em relação à influência do vento (Fig. 7-b-Centro e Baixo). A presença de vento faz com que as gotas de menor diâmetro sejam arrastadas para mais longe, pelo que, na

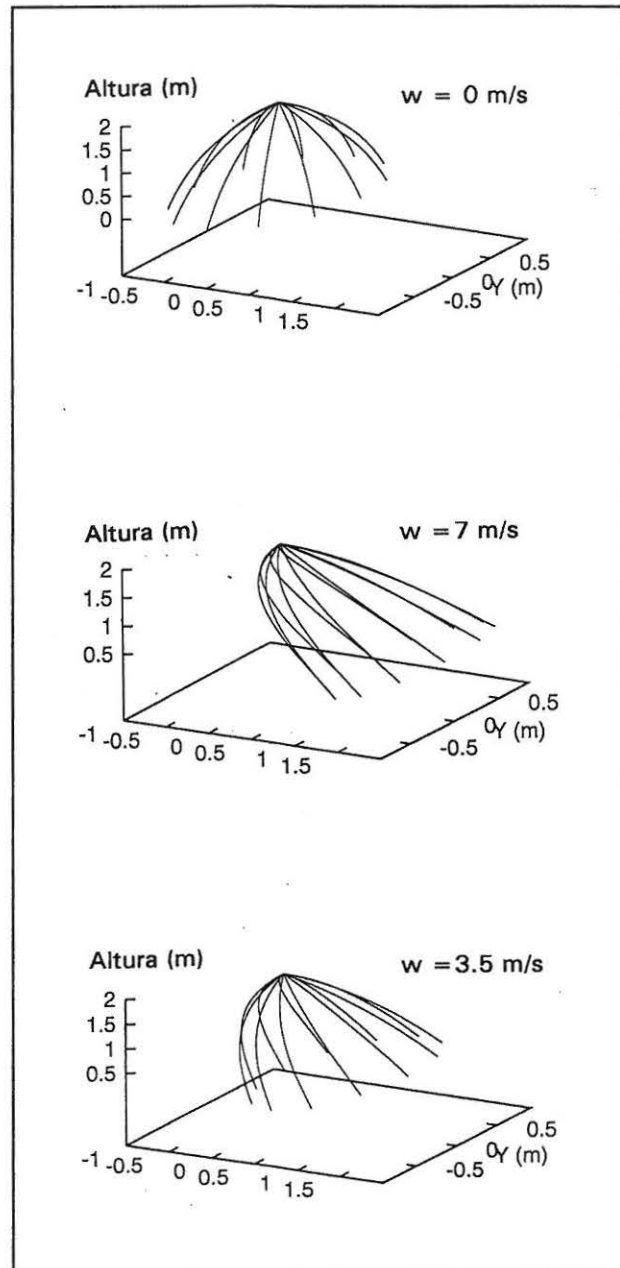


Fig. 5 - Visão tridimensional da trajectória de gotas de 1-mm de diâmetro, ejectadas com 5 m/s de velocidade, com vento soprando no sentido inverso ao do declive de 10% de inclinação (LIMA e TORFS, 1994)

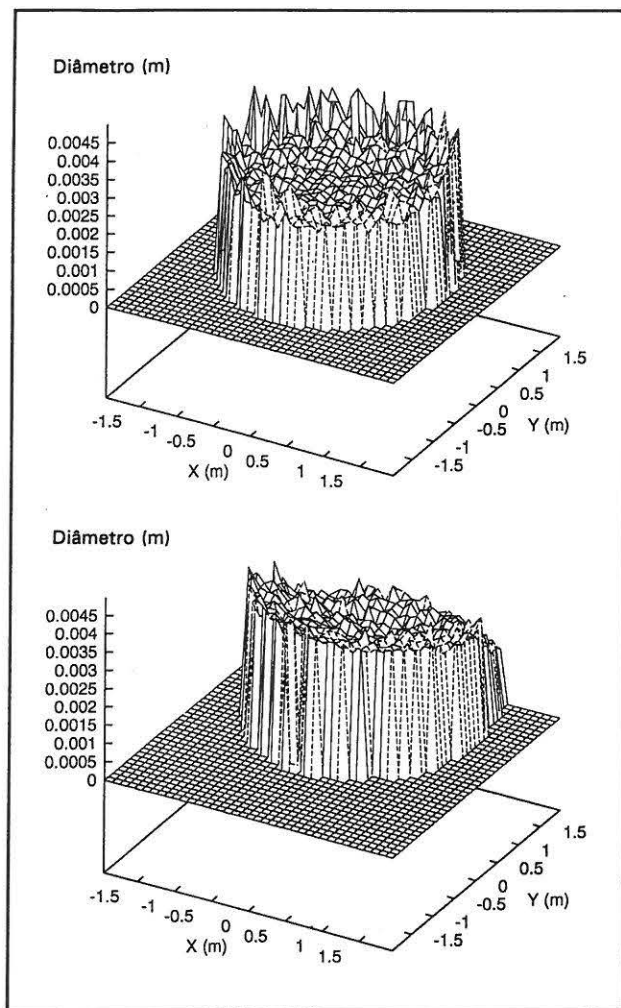


Fig. 6 - Distribuição dos diâmetros das gotas sob um nebulizador. Topo: sem vento. Baixo: vento soprando a 7 m/s. A superfície tem um declive de 10 % e $\alpha = 50^\circ$ (LIMA e TORRES, 1994)

secção em estudo, passam a ser mais preponderantes as gotas de maior dimensão.

Na Fig. 8 é feita uma análise do efeito do vento nas trajetórias das gotas, através da distância a que estas atingem o solo. Estudou-se o comportamento de quatro diâmetros de gotas (1, 3, 5 e 9 mm), para quatro ângulos de ejeção ($\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ e 90°). O vento sopra na direcção em que as gotas são ejetadas.

Quando as gotas são ejetadas na vertical ($\alpha = 0^\circ$), à medida que a velocidade do vento aumenta, são sempre as de menor diâmetro a atingir o solo a uma maior distância do ejector. Contudo, quando α aumenta, e para velocidades do vento pouco elevadas, verifica-se que são as gotas maiores que atingem o solo a maior distância o ejector.

Tal facto deve-se a que estas gotas, por terem maior massa, serem menos afectadas pelo efeito do atrito com o ar. Para velocidades do vento elevadas, as gotas de menor dimensão passam a ser as que atingem maior distância ao ejector pois, devido a terem menor velocidade de queda, estão mais tempo sujeitas ao arrastamento pelo vento.

4.2 - Velocidade das gotas

A velocidade das gotas, durante as respectivas trajetórias, é também influenciada pelo vento (Fig. 9). Na ausência de vento são as gotas ejetadas na vertical as que atingem o solo com maior velocidade, uma vez que têm uma trajetória mais curta e por isso são menos afectadas pelo atrito. Quando existe vento, as gotas ejetadas contra o vento sofrem inicialmente uma quebra de velocidade, a qual recuperam em seguida. Tal modificação é semelhante à que sofre a trajetória das mesmas gotas, já que inicialmente são ejetadas no sentido oposto ao do vento, vindo posteriormente a adquirir na sua trajetória o sentido do vento (Fig. 5). As gotas ejetadas a favor do vento são as que atingem maior velocidade durante toda a trajetória.

A Fig. 10 representa, respectivamente para gotas de 1 mm e 7 mm, a evolução da velocidade em função da distância, para velocidades iniciais de 1, 5 e 10 m/s, ao longo de diferentes trajetórias (ver Fig. 5). As gotas ejetadas com elevada velocidade inicial têm tendência a desacelerar devido às forças de atrito, enquanto que as gotas ejetadas com uma velocidade inicial baixa tendem a acelerar durante o seu trajecto para o solo.

4.3 - Energia cinética e aplicação de água

A energia cinética e aplicação de água sob um nebulizador de cone preenchido, quer com ou sem vento, é normalmente bastante concentrada.

As Figs. 11 e 12 mostram o efeito da direcção e intensidade do vento na distribuição da energia cinética ao nível do solo. Em qualquer dos casos, existe uma forte concentração de aplicação de água e de energia cinética próximo da vertical que contém o nebulizador.

4.4 - escoamento superficial

As Figs. 13, 14, 15 e 16 representam a variação espacial do campo de forças que conduz o escoamento superficial, o qual permite uma comparação entre diferentes situações de velocidade e direcção do vento. O nebulizador está colocado a 2 m de altura, a lâmina de água escorrida tem 1 mm de espessura e o declive da superfície é de 10%. A representação dos comprimentos e direcções dos vectores foi baseada no cálculo vectorial e trigonométrico da força resultante F , em cada secção elementar da superfície.

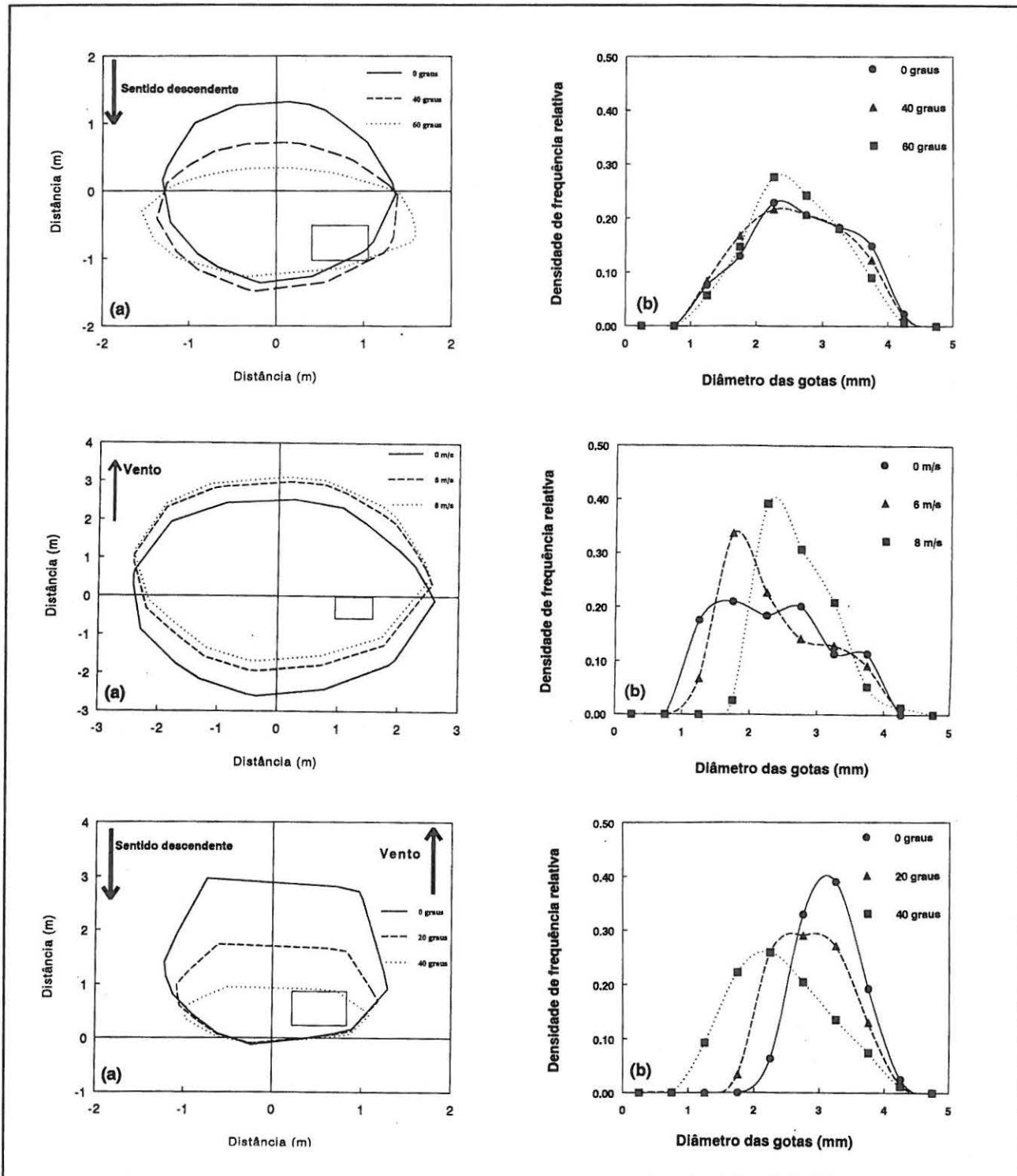


Fig. 7 - (a) Perímetro externo da área molhada pelo nebulizador e (b) densidade de frequências relativas dos diâmetros das gotas que interceptam os retângulos assinalados em (a), para várias situações de velocidade do vento e declive. Topo: Efeito da inclinação da superfície ($\alpha_{sup} = 0, 40^\circ$ e 60°) para $\alpha = 50^\circ$ e $w = 0$. Centro: Efeito da velocidade do vento ($w = 0, 6$ e 8 m/s) para $\alpha_{sup} = 0$ e $\alpha = 90^\circ$. Baixo: Efeito do declive ($\alpha_{sup} = 0, 20^\circ$ e 40°) para $w = 7$ m/s e $\alpha = 50^\circ$. As gotas são ejetadas a uma velocidade de 5 m/s, à altura de 2 m.

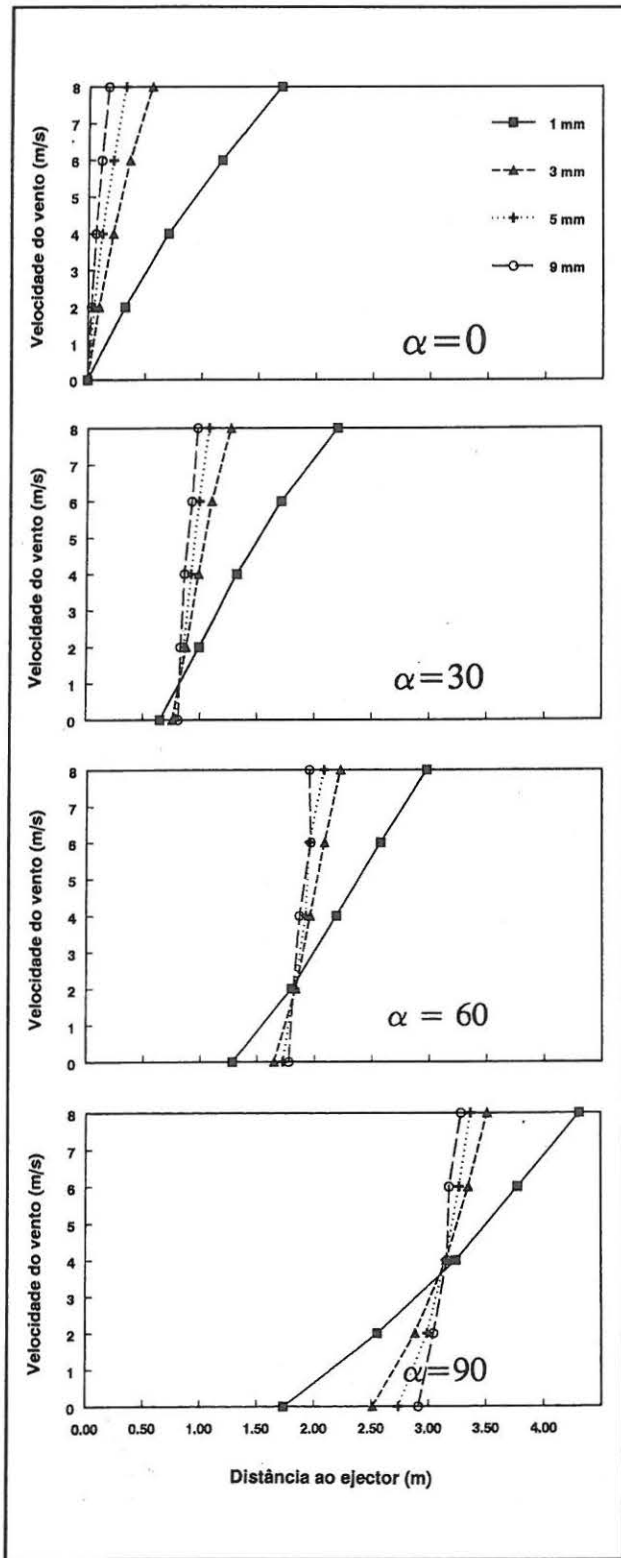


Fig. 8- Distância a que as gotas ejetadas a favor do vento atingem o solo, em função da velocidade do vento e para $\alpha = 0, 30, 60$ e 90° . As gotas são ejetadas com $V_0 = 5$ m/s.

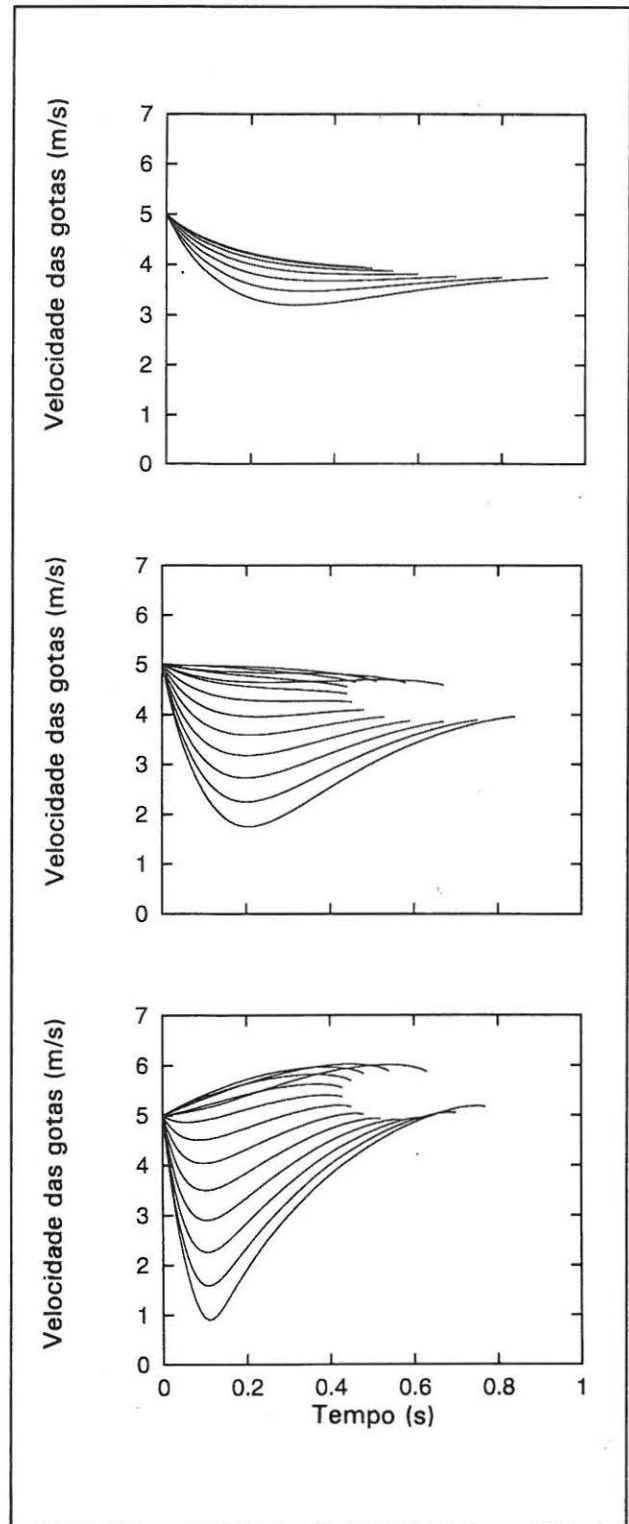


Fig. 9 - Velocidade das gotas ao longo de trajetórias diferentes (ver Fig. 5). As gotas têm 1 mm de diâmetro e são ejetadas com $V_0 = 5$ m/s. De cima para baixo, o vento sopra à velocidade de 0, 3.5 e 7 m/s respectivamente

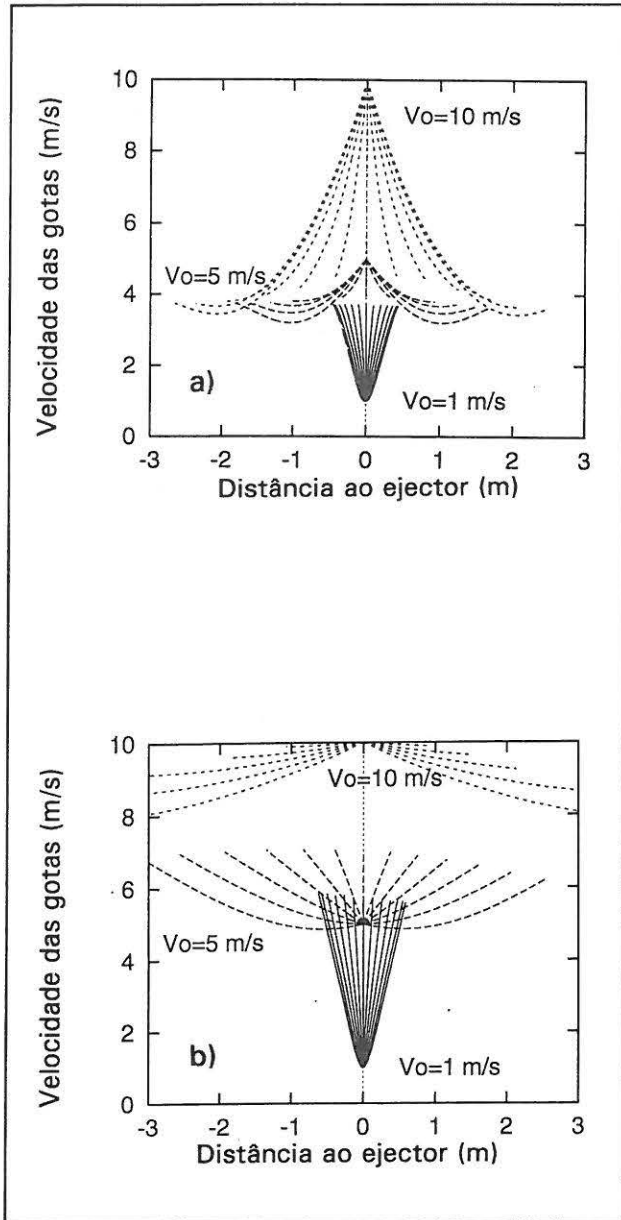


Fig. 10 - Velocidade das gotas a várias distâncias do ejector ao longo de diferentes trajectórias (ver Fig. 5), para $V_0 = 1, 5$ e 10 m/s. (a) gotas de 1mm de diâmetro, (b) gotas de 7 mm de diâmetro. O declive da superfície é de 10 %

Mesmo na ausência de vento, o escoamento superficial não se pode considerar unidimensional (Fig. 13), uma vez que as gotas não atingem a superfície verticalmente.

A não uniformidade de intensidade de precipitação e de ângulos de incidência das gotas, em combinação com a tensão tangencial induzida pelo vento na interface água-

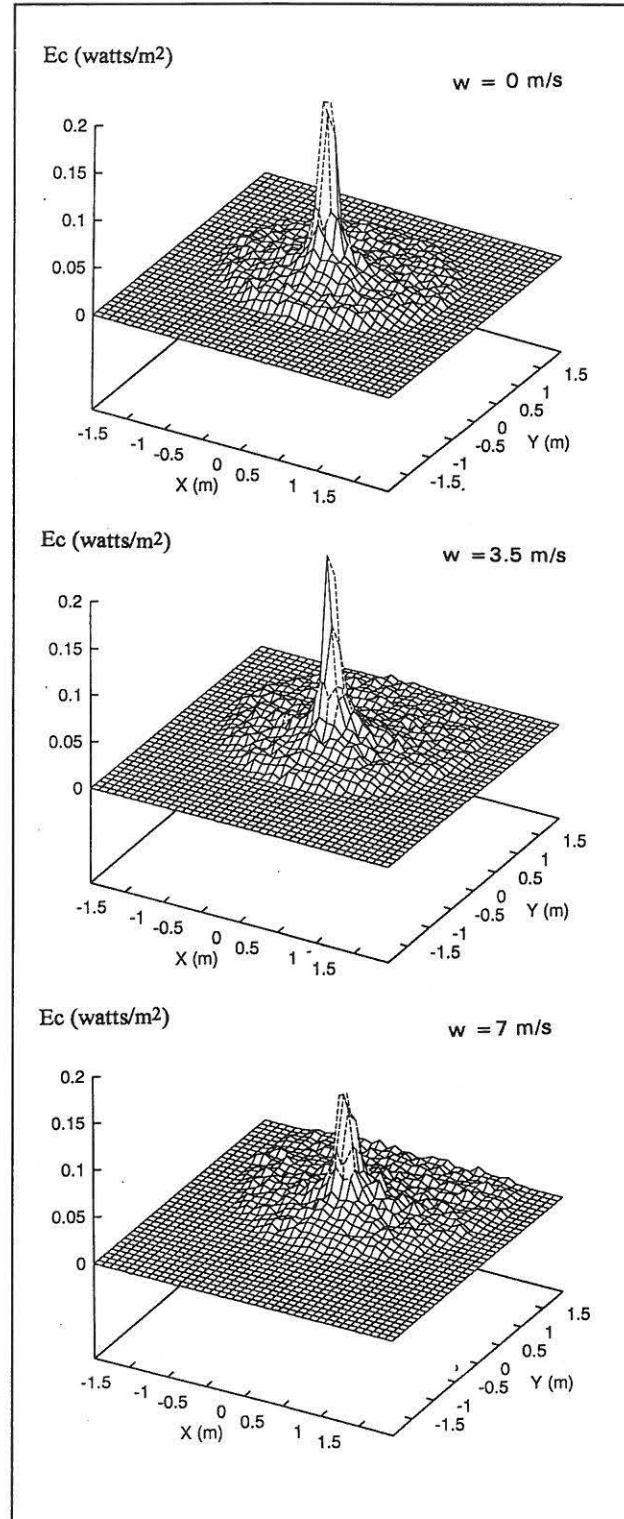


Fig. 11 - Distribuição da energia cinética sob um nebulizador para diferentes velocidades de vento (0, 3,5 e 7 m/s). O declive é de 10 % e o vento descendente.

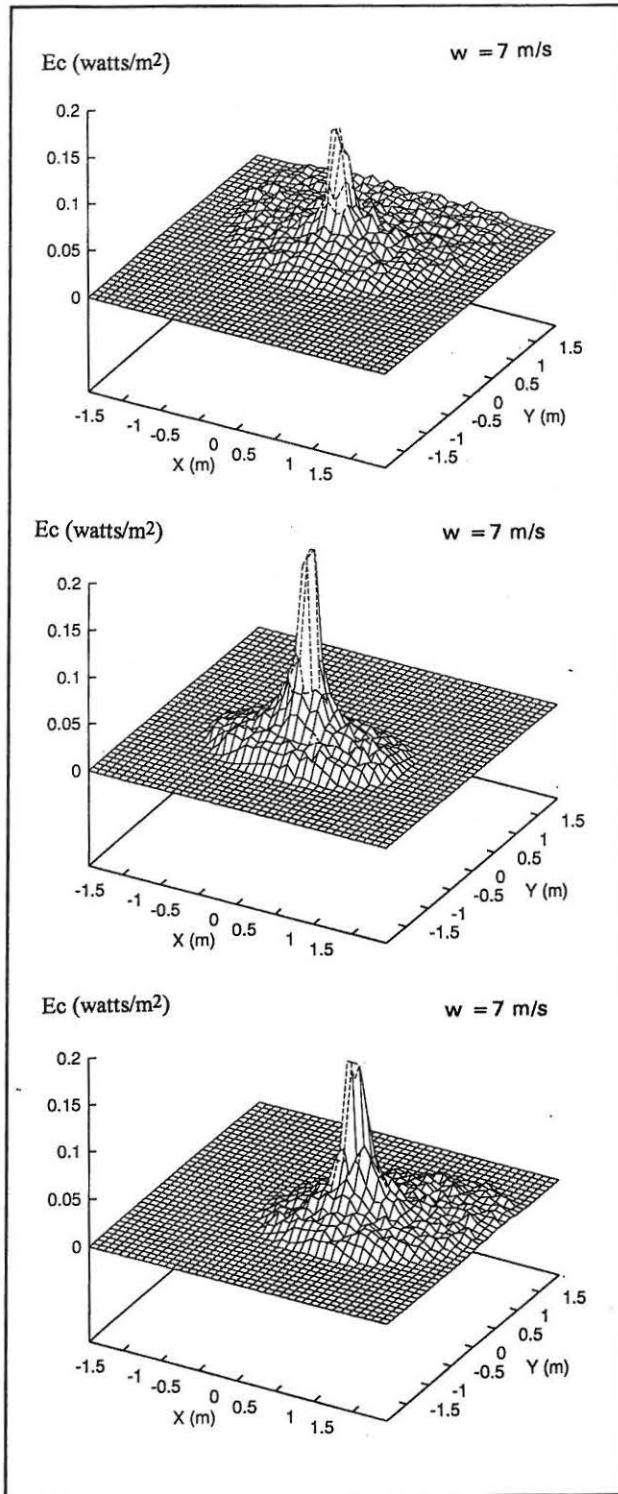


Fig. 12 - Distribuição da energia cinética sob um nebulizador para diferentes direcções de vento. Topo: vento descendente. Centro: vento ascendente. Baixo: vento lateral. O vento sopra a 7 m/s e o declive é de 10% (LIMA e TORFS, 1994)

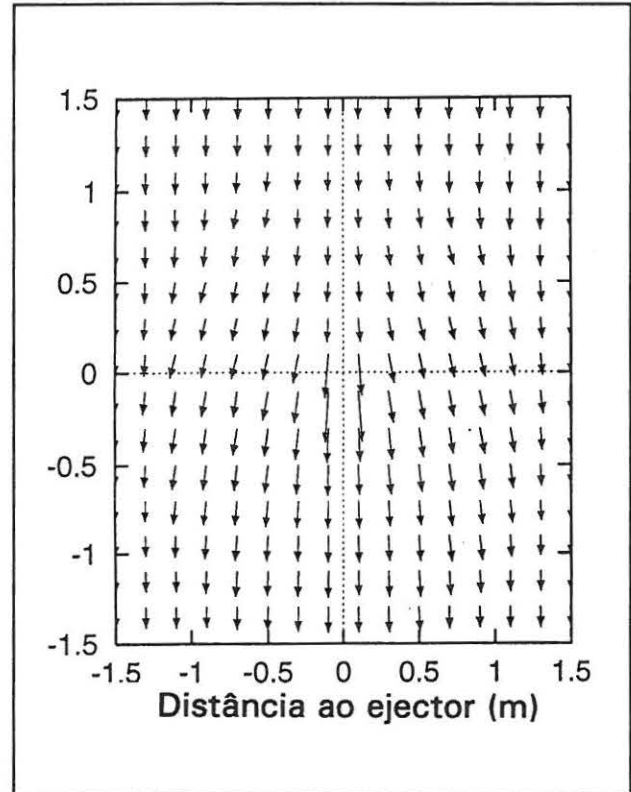


Fig. 13 - Variação espacial do campo de forças do escoamento superficial. Situação sem vento (LIMA e TORFS, 1994)

-ar, vem afectar os balanço das forças, sendo alteradas as características hidráulicas do escoamento, nomeadamente em relação à sua velocidade e profundidade.

5 - CONCLUSÕES

Neste artigo, a modelação numérica foi utilizada para avaliar a importância do vento na chuva simulada através de nebulizadores de cone preenchido. As seguintes conclusões podem ser referidas:

- (i) A distribuição dos diâmetros das gotas difere consideravelmente com e sem vento, visto que este afecta mais a trajectória das gotas menores do que a das gotas maiores. As distribuições da aplicação de água e da energia cinética no solo sob um nebulizador podem ser estudadas, através da associação de um modelo hidrodinâmico para o movimento das gotas, um gerador estocástico de gotas e um algoritmo apropriado a representar a intercepção com a superfície do solo.

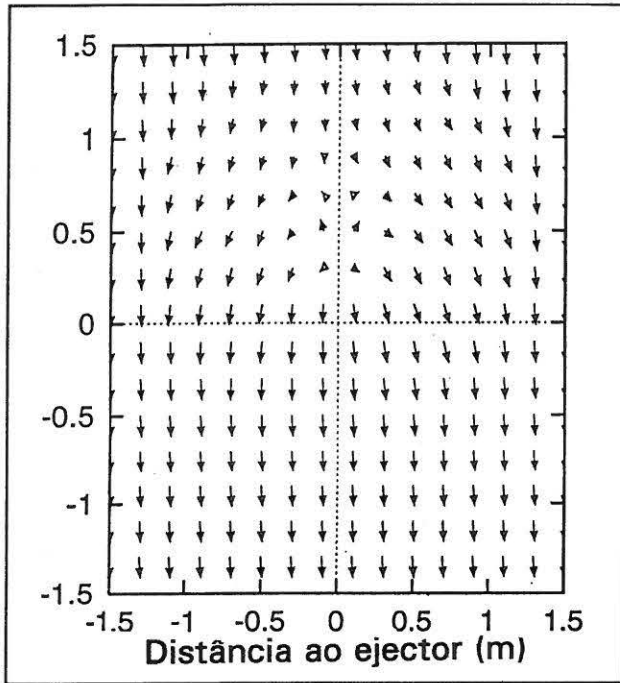


Fig. 14 - Variação espacial do campo de forças do escoamento superficial. Situação com vento soprando no sentido oposto ao do declive (LIMA e TORFS, 1994)

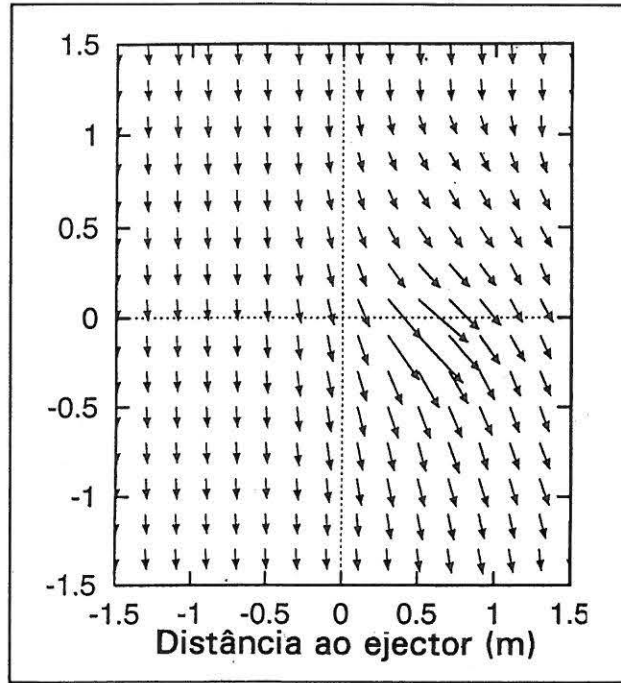


Fig. 16 - Variação espacial do campo de forças do escoamento superficial. Situação com vento lateral (LIMA e TORFS, 1994)

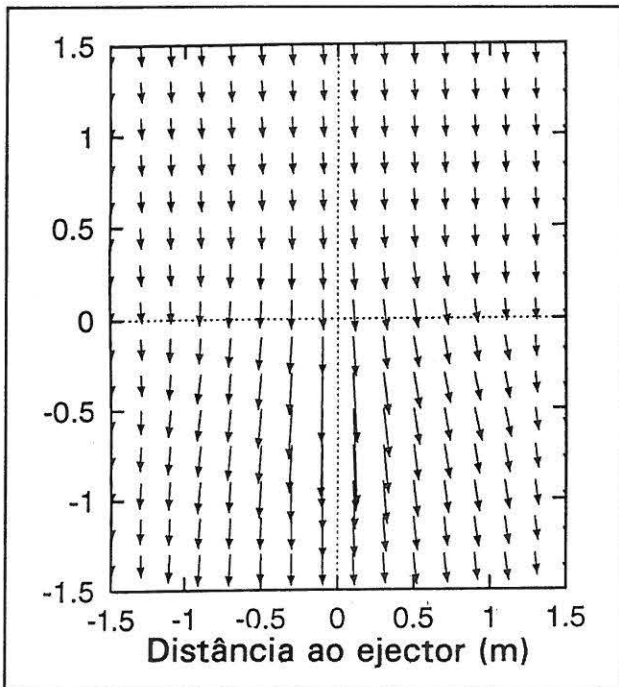


Fig. 15 - Variação espacial do campo de forças do escoamento superficial. Situação com vento soprando no sentido do declive (LIMA e TORFS, 1994)

(ii) A influência do declive na distribuição das dimensões das gotas apenas é significativa na presença de vento forte.

(iii) A não uniformidade da chuva simulada (em termos de intensidade de precipitação e ângulo de impacto das gotas) pode afectar significativamente as características hidráulicas do escoamento superficial gerado.

iv) O modelo matemático apresentado neste artigo pode facilitar a selecção de nebulizadores simples de cone preenchido, tendo em conta as suas características de ângulo e velocidade de ejeção, e distribuição de diâmetros das gotas produzidas. O modelo permite ainda determinar o tamanho e a forma da área molhada para várias condições de vento, declive e características da chuva simulada.

O modelo teórico apresentado ainda não foi testado com dados experimentais. Futuros trabalhos deverão incidir na calibração do modelo teórico, na modelação do escoamento superficial para várias condições de fronteira e na inclusão das componentes infiltração da água no solo e transporte de sedimentos.

Agradecimentos: O programa de computador SPRAY foi elaborado em conjunto com o Ir. P.J.J.F. TORFS do

Departamento de Recursos Hídricos da Universidade de Wageningen, na Holanda.

BIBLIOGRAFIA

- HOERNER, S. F. (1958) - *Dynamics*. London, University Tutorial Press.
- KAMPHORST, A. (1987) - "A small rainfall simulator for the determination of soil erodibility". *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35, pp. 407-415.
- KOHL, R. A.; DEBOER, D. W. and EEVENSON, P. D. (1985) - "Kinetic energy of low pressure spray sprinklers". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 28(5), pp. 1526-1529.
- LIMA, J. L. M. P. de (1990) - "The effect of oblique rain on inclined surfaces: a nomograph for the rain-gauge correction factor". *Journal of Hydrology*, 115, pp. 407-412.
- LIMA, J. L. M. P. de and TORFS, P. J. J. F. (1993) - *Effects of the wind on rainfall simulation*. Rapport 40, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouuniversiteit Wageningen, The Netherlands.
- LIMA, J. L. M. P. de and TORFS, P. J. J. F. (1994) - "Effects of the wind on simulated rainfall and overland flow under single full-cone nozzle sprays". In: *Advances in Water Resources Technology and Management*. TSAKIRIS, G. and SANTOS, M. A. (Eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 443-450.
- MEYER, L. D. (1965) - "Simulation of rainfall for soil erosion research". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 63-724, pp. 63-65.
- MOORE, I. D., HIRSCHI, M. C. and BARFIELD, B. J. (1983) - "Kentucky rainfall simulator". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineer*, 907-15-2, pp. 1085-1089.
- OLAYEMI, F. F. and YADAV, R. C. (1983) - "Rainfall simulator for tillage research in the tropics". *Soil and Tillage Research*, 3, pp. 397-405, Amsterdam.
- OKARUMA, S. and NAKANISHI, K. (1969) - "Theoretical study on sprinkler sprays (Part four) Geometric pattern form of single sprayer under wind conditions". *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, 29, pp. 35-43.
- PRUPAPACHER, H. R. and KLETT, J. D. (1978) - *Microphysics of clouds and precipitation*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- SHARON, D. (1980) - "The distribution of hydrologically effective rainfall incident on sloping ground". *Journal of Hydrology*, 46, pp. 165-188.
- SHELTON, C. H., BERNUTH, R. D. von and RAJBHANDARI, S. P. (1985) - "A continuous-application rainfall simulator". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 84-2049, pp. 1115-1119.
- STILLMUNKES, R. T. and JAMES, L. G. (1982) - "Impact energy of water droplets from irrigation sprinklers". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 25(1), pp. 130-133.
- STRUZER, L. R. (1972) - "Problem of determining precipitation falling on mountain slopes". *Sov. Hydrol. Selected Papers*, 2, pp. 129-142.
- WILLIAMSON, R. E. and THREADGILL, E. D. (1974) - "A simulation for the dynamics of evaporating spray droplets in agricultural spraying". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 17(2), pp. 254-261.