



**DENISE DE JESUS LEMOS FERREIRA**

**VELOCIDADE E ENERGIA CINÉTICA DA  
CHUVA DE UM EMISSOR USADO EM PIVÔ  
CENTRAL**

**LAVRAS – MG**

**2010**

**DENISE DE JESUS LEMOS FERREIRA**

**VELOCIDADE E ENERGIA CINÉTICA DA CHUVA DE UM EMISSOR  
USADO EM PIVÔ CENTRAL**

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

Orientador  
Ph.D. Luiz Antônio Lima

**LAVRAS – MG  
2010**

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

Ferreira, Denise de Jesus Lemos.

Velocidade e energia cinética da chuva de um emissor usado em pivô central / Denise de Jesus Lemos Ferreira. – Lavras : UFLA, 2010.

65 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Luiz Antônio Lima.

Bibliografia.

1. Impacto das gotas. 2. Pluviometria. 3. Uniformidade de distribuição. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 627.5

**DENISE DE JESUS LEMOS FERREIRA**

**VELOCIDADE E ENERGIA CINÉTICA DA CHUVA DE UM EMISSOR  
USADO EM PIVÔ CENTRAL**

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

APROVADA em 30 de julho de 2010.

Ph.D. Alberto Colombo

UFLA

Dra. Fátima Conceição Rezende

UFLA

Ph.D. Luiz Antônio Lima  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2010**

Aos meus pais, Francisco Dinavan Lemos Ferreira e Francisca de Jesus Lemos Ferreira, fundamentais e responsáveis pela minha formação humana, por todos os ensinamentos, apoio constante, dedicação e confiança ao longo da minha vida.

Ao meu irmão, Djavan de Jesus Lemos Ferreira, pela força e incentivo constantes em todos os momentos da minha vida. A minha cunhada, Paula Patrícia, pela amizade e incentivo. A minha sobrinha, Nicole, pela alegria que já traz a todos nós. Seja bem-vinda! Esperamos por você com muito amor.

## **DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela presença constante na minha vida, apoio maior que me permitiu conquistar mais essa vitória na minha vida.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia, pela oportunidade e apoio que tornaram possível a conclusão do mestrado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Ph.D. Luiz Antônio Lima, pela forma competente de orientar, pelos ensinamentos repassados, pela amizade e confiança neste trabalho.

Ao professor Ph.D. Alberto Colombo, pela grande contribuição que proporcionou o melhor desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia, pelos ensinamentos repassados.

À pesquisadora Dra. Fátima Conceição Rezende, pela atenção e por sua contribuição para este trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, José Luiz Moraes Rodrigues e Oswaldo Francisco de Carvalho, pelo apoio na instalação e manutenção do experimento.

À secretária Greice da Costa Oliveira, pela amizade e pronta assistência em ajudar a solucionar os problemas.

Ao Júlio César, pelo amor, dedicação, alegria e apoio constante, me passando a força necessária para conseguir mais essa conquista na minha vida.

Aos amigos do mestrado com quem convivi e que tornaram meus dias mais agradáveis. À amiga Carla, pelo incentivo e amizade ao longo do mestrado.

Às amigas Ana Cecília e Rafaella, pela colaboração na execução do experimento.

Ao amigo Moisés, pela colaboração na execução do experimento, amizade e apreciáveis sugestões para o melhor desenvolvimento deste trabalho.

Em especial, a Universidade Federal de Campina Grande, aos professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola e, de forma mais especial, ao prof. Dr. José Geraldo de Vasconcelos Baracuhy, professor, amigo e um dos grandes incentivadores para a realização deste trabalho.

A todos os amigos da UFCG que compartilharam comigo esta etapa, passando força e demonstrando com palavras e ações o verdadeiro sentido que tem a palavra AMIGO.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A erosão decorrente do escoamento superficial causa grande impacto no potencial produtivo das áreas cultivadas. Portanto, o estudo da velocidade e da energia cinética com que as gotas de água atingem a superfície do solo irrigado é de fundamental importância para o desenvolvimento de diagnósticos e medidas que visem minimizar os efeitos negativos no manejo das áreas irrigadas. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar a velocidade de impacto e a energia cinética de chuvas artificiais de bocais do emissor Super Spray (*Senninger Irrigation*). A avaliação da energia cinética e da velocidade de impacto das gotas foi realizada, com o uso do sistema dinâmico de pluviometria (SDP), no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Nos ensaios, foram realizados testes de uniformidade de distribuição de água em todos os bocais no local onde o sistema dinâmico de pluviometria (SDP) esteve posicionado. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC), referente aos seis bocais (tratamentos), com três repetições. Por meio dos resultados obtidos, verificou-se que os valores de velocidade de impacto e a energia cinética das gotas não diferiram significativamente entre os bocais analisados. Por meio dos gráficos de superfície foi possível observar que os três menores diâmetros de bocal (5,75; 6,94 e 7,54 mm) propiciaram intensidades mais elevadas na extremidade externa próxima ao emissor, enquanto os três maiores bocais (8,33; 9,33 e 10,12 mm) apresentaram tendência de crescimento de intensidade na parte externa da malha. Os coeficientes de uniformidade, CUC e CUD, apresentaram resultados satisfatórios para emprego da metodologia SDP, para os cinco maiores diâmetros de bocal (6,94; 7,54; 8,33; 9,33 e 10,12 mm), enquanto, para o bocal de 5,75 mm, o valor do CUD (83,74%) foi baixo, não garantindo a uniformidade necessária para uso do método. A partir dos resultados obtidos e de estimativas de modelos empíricos citados na literatura, foi possível concluir que a energia cinética provocada pelo emissor Super Spray utilizado em pivô central é inferior à energia cinética de chuvas naturais com a mesma intensidade. A energia cinética não está relacionada com o tamanho dos bocais testados. O sistema dinâmico de pluviometria mede a velocidade e a energia cinética da chuva, quando esta apresenta uniformidade (sem variabilidade espacial), mas apresentou valores discrepantes de energia cinética quando o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) foi inferior a 84%. As vazões determinadas por meio do método volumétrico para os bocais avaliados apresentaram valores muito próximos das vazões listadas no catálogo do fabricante.

Palavras-chave: Impacto das gotas. Pluviometria. Uniformidade de distribuição.

## ABSTRACT

Soil erosion causes great impact on potential yield of cultivated areas. Therefore, the study of velocity and kinetic energy of water droplets hitting the surface of irrigated soil is very important for diagnostics and procedures to minimize negative effects on irrigated areas. Accordingly, the objective is to measure the impact velocity and kinetic energy of artificial rainfall of the Super Spray (Senninger Irrigation). The evaluation of the kinetic energy and the impact velocity of the drops were performed using the dynamic rain gage system (SDP) at the Laboratory of Hydraulics and Irrigation at the Federal University of Lavras (UFLA). Water distribution uniformity where the SDP system was positioned was measured. The experimental design was completely randomized (CRD), referring to the six nozzles (treatments) with three replications. It was found that values of impact velocity and kinetic energy did not differ significantly for the nozzles tested. It could be observed that the three smaller nozzle diameters (5.75, 6.94 and 7.54 mm) favored higher intensities at the outer end near the sprayer, while the three larger nozzles (8.33, 9.33 and 10.12 mm) tended to increase rain intensity on the outside of the catch can mesh. The uniformity coefficient values, CUC and CUD, were satisfactory for use of the SDP methodology for the top five nozzle diameters (6.94, 7.54, 8.33, 9.33 and 10.12 mm), while for 5.75 mm nozzle, the value of the CUD (83.74%) was comparatively low, not ensuring uniformity requested by the SDP method. It was also found that Super Spray used on center pivot presented lower kinetic energy when compared to natural rainfall with the same intensity, according to estimates of empirical models available in the literature. The kinetic energy is not related to nozzle size tested. The dynamic rain gage system measures the speed and kinetic energy of uniform rain (no spatial variability), although it might present discrepant values of rainfall kinetic energy when the coefficient of uniformity of distribution (CUD) is lower than 84%. The flow rates measured by volumetric method were closer to values listed by manufacturer.

Keywords: Drop impact. Rain gage. Distribution uniformity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sistema dinâmico de pluviometria (SDP) .....	29
Figura 2	Super Spray ( <i>Senninger Irrigation</i> ).....	30
Figura 3	Vista superior do posicionamento do emissor e do SDP.....	31
Figura 4	Placa defletora côncava com ranhuras médias .....	32
Figura 5	Emissor Super Spray ( <i>Senninger Irrigation</i> ) conectados à tubulação lateral suspensa .....	33
Figura 6	Estrutura usada para determinação da vazão.....	34
Figura 7	Determinação do padrão molhado.....	35
Figura 8	Sistema dinâmico de pluviometria (SDP) .....	36
Figura 9	(a) Posicionamento dos coletores dentro da malha; (b) altura da malha em relação à superfície do solo .....	39

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Valores das médias das vazões observadas para os bocais do Super Spray .....	42
Gráfico 2	Histograma da velocidade média das gotas para os diâmetros de bocal 5,75 mm (a), 6,94 mm (b), 7,54 mm (c), 8,33 mm (d), 9,33 mm (e) e 10,12 mm (f) .....	45
Gráfico 3	Distribuição da energia cinética para os cinco diferentes diâmetros de bocais avaliados.....	49
Gráfico 4	Distribuição dos valores da intensidade de aplicação de água ao longo do padrão molhado do emissor (Super Spray) para os diferentes diâmetros de bocais .....	50
Gráfico 5	Valores de intensidade de aplicação de água média observados no local de colocação do SDP .....	51
Gráfico 6	Superfícies de intensidade de aplicação de água no local de abrangência de SDP, para os bocais de diâmetro: 5,75 mm (a); 6,94 mm (b); 7,54 mm (c); 8,33 mm (d); 9,33 mm (e) e 10,12 mm (f).54	
Gráfico 7	Vista superior da intensidade de aplicação de água sobre a malha em que esteve posicionado o SDP, para os bocais de diâmetro: 5,75 mm (a); 6,94 mm (b); 7,54 mm (c); 8,33 mm (d); 9,33 mm (e) e 10,12 mm (f).....	56
Gráfico 8	Valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e de coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), observados no local de colocação do SDP .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Especificações técnicas do Super Spray ( <i>Senninger Irrigation</i> ).....	32
Tabela 2	Valores de coeficiente de descarga (Cd) para os seis bocais do emissor Super Spray .....	41
Tabela 3	Análise de médias da velocidade da gota d'água sobre o SDP.....	43
Tabela 4	Análise de médias da energia cinética por milímetro de chuva sobre o SDP.....	47
Tabela 5	Análise de médias para os valores de intensidade de aplicação sobre o SDP.....	48
Tabela 6	Valores medidos de padrão molhado ( $W_{rs}$ ) para os seis bocais avaliados .....	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEORICO</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Sistema de irrigação por pivô central</b> .....	16
<b>2.2</b>	<b>Irrigação por Pivô Central</b> .....	17
<b>2.2.1</b>	<b>Intensidade de aplicação de água</b> .....	19
<b>2.3</b>	<b>Pressão no emissor</b> .....	20
<b>2.4</b>	<b>Características técnicas do Super Spray (Senninger Irrigation)</b> .....	21
<b>2.5</b>	<b>Perdas de solo e água ocasionados pelo processo erosivo</b> .....	22
<b>2.6</b>	<b>Erosividade</b> .....	26
<b>2.7</b>	<b>Modelos de estimativa de energia cinética</b> .....	24
<b>2.8</b>	<b>Velocidade de impacto da gota d'água</b> .....	27
<b>2.9</b>	<b>Sistema dinâmico de pluviometria (SDP)</b> .....	28
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	30
<b>3.1</b>	<b>Caracterização da área experimental</b> .....	30
<b>3.2</b>	<b>Instalação do emissor</b> .....	32
<b>3.3</b>	<b>Ensaio realizados</b> .....	33
<b>3.3.1</b>	<b>Determinação da vazão</b> .....	33
<b>3.3.2</b>	<b>Determinação do Padrão molhado (<math>W_{rs}</math>) de cada bocal</b> .....	35
<b>3.3.3</b>	<b>Sistema de avaliação da energia cinética</b> .....	36
<b>3.3.4</b>	<b>Determinação da uniformidade da água no local do SPD</b> .....	38
<b>3.4</b>	<b>Delineamento estatístico</b> .....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	41
<b>4.1</b>	<b>Determinação da vazão dos bocais do emissor Super Spray</b> .....	41
<b>4.2</b>	<b>Velocidade de impacto das gotas d'água</b> .....	42
<b>4.3</b>	<b>Energia Cinética das gotas d'água</b> .....	46
<b>4.4</b>	<b>Intensidade de chuva causada pelo Super Spray</b> .....	49

<b>4.4.1</b>	<b>Intensidade de chuva sobre o SDP .....</b>	<b>50</b>
<b>4.5</b>	<b>Uniformidade dos bocais sobre o sistema dinâmico de pluviometria..</b>	<b>57</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Diversos setores buscam aumentar a produtividade e reduzir custos por unidade de produção. No setor agrícola não é diferente e a irrigação é um dos fatores que mais contribuem para que esses objetivos sejam atingidos.

Segundo dados da Agência Nacional das Águas - ANA (2009) estima-se que a área irrigada seja de 4,6 milhões de hectares. Portanto, a área de 3,1 milhões de hectares, definida pelo censo de 1996, teria crescido quase 50%, numa taxa de cerca de 150 mil hectares por ano.

Os sistemas de irrigação do tipo pivô central permitem aplicar a água de maneira uniforme e controlada, em toda a área irrigada. Entretanto, alguns sistemas apresentam problemas de escoamento superficial e degradação do solo, decorrentes do impacto das gotas de água aplicadas sobre a superfície do solo. Esses problemas são mais graves nos equipamentos de maior comprimento, uma vez que a intensidade de aplicação aumenta gradativamente, do ponto central até a extremidade final da linha lateral, para compensar o aumento da área irrigada por unidade de comprimento da lateral móvel.

Nos pivôs equipados com emissores do tipo Super Spray (*Senninger Irrigation*)<sup>1</sup>, o aumento da área molhada proporcionado pela pulverização do jato de água visa reduzir a intensidade instantânea de aplicação de água, com consequente redução no escoamento superficial e nas perdas de solo decorrentes desse escoamento. Além disso, é possível aumentar a uniformidade de aplicação de água, por meio do aumento do grau de sobreposição das áreas molhadas de emissores adjacentes. No entanto, em diversas situações práticas, observa-se a ocorrência de escoamento superficial, evidenciando-se que esses objetivos não são sempre totalmente atingidos.

---

<sup>1</sup> O uso do modelo e marca especificados não significa seu endosso ou sua recomendação restringindo-se apenas como objeto de pesquisa.

A erosão decorrente do escoamento superficial causa grande impacto no potencial produtivo das áreas cultivadas. Esse fenômeno ocorre devido à erosão hídrica causada pela chuva natural ou artificial, promovendo o carreamento do solo proveniente da camada superficial, que é justamente a parcela mais fértil do perfil do solo.

Portanto, o estudo da velocidade e da energia cinética com que as gotas de água atingem a superfície do solo irrigado é de fundamental importância para o desenvolvimento de diagnósticos e medidas que visem minimizar os efeitos negativos no manejo das áreas irrigadas.

Nesse contexto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a velocidade e a energia cinética da chuva propiciada pelo emissor do tipo Super Spray operando em equipamentos do tipo pivô central.

Os objetivos específicos vinculados ao trabalho foram:

a) avaliar a energia cinética e a velocidade de impacto da gota de água do emissor Super Spray empregado em pivô central, através de um sistema dinâmico de pluviometria (SDP);

b) determinar a vazão em cada bocal, comparando-a, posteriormente, com as vazões de catálogo;

c) determinar o coeficiente de uniformidade de distribuição de água, utilizando os valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), na área de coleta onde o sistema dinâmico de pluviometria foi posicionado.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Sistema de irrigação por pivô central**

De acordo com Marchetti (1983), o pivô central consiste, basicamente, em diversos bocais de distribuição de água (emissores ou sprays) montados sobre uma linha lateral, suportada longitudinalmente por uma série de torres, que se movimentam sobre rodas ao redor de um ponto central denominado ponto do pivô.

Esse equipamento foi desenvolvido por Frank Ziback, quando era fazendeiro no Colorado, Estados Unidos e, após várias mudanças e ajustes, o sistema foi patenteado em 1952.

Ribeiro (2009) comenta que quando os pivôs foram introduzidos, eram utilizados emissores de impacto de alta pressão. O tempo de aplicação era maior e as taxas de aplicação eram menores, em razão do grande raio de alcance do jato. Porém, os emissores de impacto de alta pressão e o alto ângulo de trajetória apresentavam baixa uniformidade de irrigação, especialmente em condições de vento. Segundo Tomazela, Mantovani e Fernandes (2003), com o objetivo de minimizar as perdas por deriva pelo vento, emissores de impacto com ângulos de trajetória de 23° foram substituídos por emissores com ângulo de trajetória de 6°, instalados sobre a tubulação do pivô, ou seja, na parte mais alta do equipamento.

A necessidade de reduzir o consumo de energia e, ao mesmo tempo, manter a uniformidade e a eficiência de aplicação de água tornou-se grande preocupação (LIMA, 2009).

Segundo Colombo (2003), a largura do padrão molhado é definida como a largura perpendicular à linha lateral do pivô, da faixa que é irrigada simultaneamente.

Os emissores fixos podem ser utilizados com uma ampla variedade de placas defletoras que podem ser substituídas rapidamente em função do tipo de cultura a ser irrigada e também das exigências de clima e solo. A forma das placas defletoras (plana, côncava ou convexa) controla a trajetória do jato (spray), enquanto o tipo de superfície (lisa, ranhuras médias ou ranhuras grossas) controla o tamanho das gotas.

Segundo Folegatti, Pessoa e Paz (1998), os emissores de baixa pressão foram desenvolvidos para substituir os tradicionais emissores de impacto, aplicando a mesma lâmina de água com uniformidade comparável e menor utilização de energia, já que operam com menores valores de pressão.

## **2.2 Irrigação por pivô central**

Na agricultura, é essencial a aplicação adequada de água às culturas, cujo desenvolvimento está diretamente ligado a esta condição. Segundo Lima (2009), a irrigação destaca-se como uma das principais técnicas, hoje disponíveis para serem implantadas, para elevar os níveis de produtividade no país.

De acordo com Kincaid (1996), a irrigação por aspersão pode ser definida como qualquer sistema de irrigação que distribui água em forma de gotas discretas no ar.

O método de irrigação por pivô central, quando bem planejado, tem apresentado boa uniformidade de distribuição, fácil controle da lâmina d'água, grande versatilidade para as diversas condições de topografia e menor dispêndio de mão-de-obra (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

Frizzone e Dourado Neto (2003) citam que a uniformidade tem efeito no rendimento das culturas, sendo considerada um dos fatores mais importantes para a operação dos sistemas de irrigação.

Existem diversas equações para calcular a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por pivô central. Segundo Dourado Neto, Lier e Frizzone (1994), o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) são os mais recomendados.

O coeficiente de uniformidade de Christiansen, modificado por Heermann e Hein (1968) para pivô central (equação 1), considera o fato de que cada coletor pode representar uma área maior à medida que se afasta do centro do pivô, sendo necessário, portanto, ponderar os valores coletados ao longo linha de irrigação.

$$CUC = 100 \cdot \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n n \cdot |L_i - \bar{L}|}{\sum_{i=1}^n n \cdot \bar{L}} \right] \quad (1)$$

em que

*CUC* - coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado por Heermann e Hein (1968) %;

$L_i$  - lâmina coletada em cada pluviômetro, mm;

$\bar{L}$  - lâmina média ponderada, considerando todos os pluviômetros, mm.

$n$  - número de pluviômetros utilizados.

O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) é expresso conforme a equação 2.

$$CUD = 100 \cdot \frac{L_{25}}{\bar{L}} \quad (2)$$

em que

*CUD* – coeficiente de uniformidade de distribuição de água, %;

*L*<sub>25</sub> – lâmina média de 25% do total de pluviômetros que receberam as menores precipitações, mm;

$\bar{L}$  - lâmina média ponderada, considerando todos os pluviômetros, mm.

De acordo com Vieira (2009), para que cada ponto do terreno receba água durante menos tempo e para se conseguir aplicar a mesma quantidade de água em toda a área irrigada, a intensidade de aplicação terá que aumentar ao longo da linha lateral. Nesse caso, segundo o autor, existem duas maneiras de se manter a mesma lâmina de aplicação de água, que são aumentar a taxa de aplicação com o aumento do diâmetro dos bocais dos emissores, mantendo o mesmo espaçamento entre os emissores, ou manter o mesmo bocal e reduzir o espaçamento entre estes.

O principal problema associado à irrigação com pivô central continua a ser a possibilidade de escoamento superficial, devido às altas taxas de aplicação de água inerente a esse sistema (KINCAID, 2005).

O conhecimento das respostas do solo à taxa de aplicação de água e ao impacto das gotas sobre a superfície deste permite melhorar o manejo de áreas irrigadas (VIEIRA, 2009).

### **2.2.1 Intensidade de aplicação de água**

A intensidade de aplicação tem grande importância na irrigação por pivô central. Quando a intensidade excede a capacidade de infiltração do solo, poderá haver acúmulo de água sobre a superfície do terreno e possibilidade de escoamento superficial, o que, tanto num caso como no outro, é incompatível com uma boa eficiência de irrigação (RIBEIRO, 2009).

Variações temporais do valor da intensidade de aplicação de água em pivôs central são analisadas sob a hipótese de que, durante o intervalo de tempo correspondente ao tempo de molhamento, a taxa de aplicação de água segue um modelo elíptico (KINCAID; HEERMANN; KRUSE, 1969).

A intensidade de aplicação de água ao longo da tubulação lateral de um pivô pode ser descrita em termos de intensidade média, intensidade máxima e intensidade instantânea (KINCAID, 2005).

Segundo Kincaid (2005), para fins de projeto, usualmente é suficiente utilizar valores de intensidade de aplicação média, mas, em condições de solos com baixa infiltrabilidade e capacidade de armazenamento de água na superfície do solo baixa, a intensidade de aplicação máxima deve ser considerada.

Colombo (2003) comenta que a variação espacial da intensidade de aplicação de água se deve ao movimento circular da lateral do pivô e às variações de raio molhado e vazão dos emissores instalados ao longo da lateral móvel.

A intensidade de aplicação média, a intensidade de aplicação máxima, a largura do padrão molhado, a distribuição de gotas por tamanho e a energia de impacto das gotas têm levado a indústria a produzir diferentes tipos de emissores e placas defletoras, visando adequar a aplicação de água para diferentes tipos de culturas e condições de clima e solos (KINCAID, 2005).

### **2.3 Pressão de operação do emissor**

A pressão sob a qual o emissor irá trabalhar, chamada de pressão de serviço (PS), pode ser escolhida levando-se em consideração a vazão que irá proporcionar e também fatores de ordem econômica.

A vazão do emissor é função do diâmetro do bocal e da pressão de serviço, podendo ser calculada por meio da equação de vazão dos orifícios (equação 3):

$$q = Cd \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sqrt{2g \frac{PS}{\gamma}} \quad (3)$$

em que

q – vazão do emissor,  $m^3 \cdot s^{-1}$

Cd – coeficiente de descarga para bocais, normalmente entre 0,90 a 0,96

D – diâmetro do orifício do bocal, m

g – aceleração da gravidade,  $m \cdot s^{-2}$

PS – pressão necessária ao emissor, Pa

$\gamma$  - peso específico da água,  $N \cdot m^{-3}$

O aumento da pressão de serviço do emissor, dentro de certo limite de valores, produz aumento na uniformidade de distribuição de água (CARVALHO, 1991; MARTIM-BENITO et al., 1992; VORIES; BERNUTH, 1986; WIERSMA, 1955; ZOCOLER et al., 1995 citados por AZEVEDO et al., 2000). A partir de certo limite, o aumento da pressão de serviço provoca excesso de pulverização do jato, ocasionando diminuição do raio de alcance e, para dado espaçamento entre emissores, redução da uniformidade de distribuição de água (CHARMELO, 1990; CHRISTIANSEN, 1942; SHULL; DYLLA, 1976; ZOCOLER et al., 1995).

#### **2.4 Características técnicas do Super Spray (*Senninger Irrigation*)**

O Super Spray tem várias opções de placas defletoras para atender a culturas específicas, exigências climáticas e de solo. As placas defletoras são identificadas pela forma (plana, côncava ou convexa) e pelo tipo de superfície

(lisa, ranhura média ou sulcos profundos). As características técnicas apresentadas pelos bocais são: vazões entre 80 a 5065 L/h (0,35-22,3 gpm) e pressão entre 69 a 172 kPa (10-25 psi) (SENNINGER IRRIGATION, 2010).

## **2.5 Perdas de solo e água ocasionados pelo processo erosivo**

A erosão é o processo de desprendimento e arraste das partículas do solo causado pela água e pelo vento. Entre os fatores que influenciam na magnitude do processo erosivo, estão as chuvas, a infiltração, a topografia do terreno, a cobertura vegetal e a natureza do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2005).

O processo erosivo começa no momento em que as gotas da chuva atingem a superfície do solo e destroem os agregados, ocorrendo, com isso, a desagregação, o desprendimento, o transporte e a deposição do solo para outro local. O solo perde a capacidade de infiltração pela ação de compactação da gota e a taxa de infiltração diminui proporcionalmente ao tamanho da gota (LIMA, 1987).

Segundo Guerra (1999), no momento em que as gotas de chuva atingem o solo, começa o *splash*, também conhecido como erosão por salpicamento, caracterizado como o estágio inicial do processo erosivo, em que as partículas que compõem o solo são preparadas para serem transportadas pelo escoamento superficial. Essa preparação se dá tanto pela ruptura dos agregados como pela própria ação transportadora que o salpicamento provoca nas partículas. O *splash* pode variar em função da resistência do solo ao impacto das gotas da chuva e da energia cinética contida por elas que, em função de sua intensidade, podem provocar, assim, a ruptura dos agregados.

A presença de cobertura vegetal diminui o salpicamento e o solo pode ser desprendido em sua maioria pela concentração da enxurrada (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2005).

Segundo Pruski (1997), não existem estimativas atualizadas da quantidade de material (solo e insumos) que é gerado por processos erosivos no estado de Minas Gerais, que tem extensas áreas de cultivo e vários reservatórios de usinas hidrelétricas. A quantificação dos sedimentos produzidos é de grande importância para o desenvolvimento de técnicas eficazes de combate à erosão dos solos e ao assoreamento dos rios, tornando possível determinar o grau de deterioração do solo e os efeitos da implantação de técnicas para o controle da erosão.

A degradação dos solos brasileiros está relacionada ao esgotamento da fertilidade do solo e à ocorrência do processo de erosão acelerada, dentre outros fatores (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2005). Assim, técnicas agrícolas que promovam o aumento da cobertura e a ciclagem de nutrientes devem ser empregadas no intuito de se utilizar este recurso natural de forma racional (CASSOL et al., 2004; NUÑES; AMARAL SOBRINHO; MAZUR, 2003; TOLK; HOWELL; EVETT, 1999).

Segundo Silva, Schulz e Camargo (2004), os modelos matemáticos são largamente empregados na previsão do processo erosivo, tanto para o planejamento conservacionista (preventivo) como para o seu controle, sendo a principal vantagem da utilização desses modelos a possibilidade de se estudar vários cenários diferentes. Existem diversos modelos matemáticos que buscam simular as perdas de solo por ação da erosão hídrica, entre estes, destaca-se a “Equação Universal de Perda de Solo” (EUPS) (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A avaliação das perdas de solo, água e nutrientes, dentro do processo de produção agrícola, assume importante papel, especialmente para dar suporte à escolha e adoção de práticas que visam minimizar esses impactos e contribuir para a sustentabilidade na atividade agrícola (SILVA, 2006).

De acordo com Ribeiro (2009), estudar o impacto de emissores utilizados em sistemas de pivô central em laboratório proporcionando a evolução no sentido de desenvolver emissores de baixo impacto erosivo são medidas bastante importantes, principalmente quando contemplados por estudos da vulnerabilidade de áreas irrigadas aos novos emissores, ao longo do tempo.

## **2.6 Modelos de estimativa de energia cinética**

Segundo Dijk, Bruijnzeel e Rosewell (2002) e Salles, Poesen e Sempere-Torres (2002), a energia cinética de chuvas, todavia, representa o total de energia disponível para desagregar e transportar partículas pelo efeito de salpicamento proveniente de chuvas. Assim, torna-se importante o conhecimento das relações entre energia cinética e intensidade de chuva para a predição de riscos de erosão.

A energia cinética de chuvas naturais com baixas intensidades tem sido relacionada com a intensidade de precipitação, mas existe uma tendência de estabilidade destes valores em 25 a 29  $\text{J.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$ , quando a intensidade de precipitação excede a 40  $\text{mm h}^{-1}$  (KINNELL, 1987).

Amorim (1999) obteve o valor de 27  $\text{J.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$  para chuvas produzidas por simulador. Segundo Vieira (2009), as pesquisas sobre erosão do solo através de chuvas simuladas estão relacionadas aos valores de energia cinética obtidos por simuladores de chuvas que produzem energia cinética com valores muito superiores aos produzidos por pivô central. Geralmente, chuvas com energia cinética da ordem de 500  $\text{J.m}^{-2}$  são aplicadas. Dessa forma, torna-se difícil comparar os resultados obtidos no sistema pivô central com os resultados dos simuladores devido os valores de energia cinética usados nesses aparelhos serem bastante elevados. Vieira (2009) comenta que a intensidade de aplicação de água em sistemas de irrigação pivô central não pode ser comparada com chuvas

naturais de mesma intensidade devido aos diferentes padrões de distribuição de gotas.

A energia cinética de impacto de gotas de chuva simulada por meio de emissores sobre o solo pode ser estimada por meio da equação 4, proposta por Stillmunkes e James (1982):

$$\frac{EC}{a} = \frac{10^{-3}}{2} \cdot \rho \cdot l \cdot v^2 \quad (4)$$

em que

EC/a – energia cinética por unidade de área ( $J.m^{-2}$ )

$\rho$  – densidade da água ( $kg.m^{-3}$ )

l – lâmina de água aplicada (mm)

v – velocidade da gota ( $m.s^{-1}$ )

Entre os fatores da EUPS, apenas o R (erosividade) é computado diretamente, a partir de registros pluviográficos, enquanto os demais são relativos à parcela-padrão proposta por Wischmeier e Smith (1978). Baseando-se na relação entre intensidade da chuva e distribuição de gotas por tamanho, Wischmeier e Smith (1958) estabeleceram a equação (5), para cálculo da energia cinética das chuvas naturais:

$$EC_{ws} = 1,214 + 0,888 \cdot \log I \quad (5)$$

em que

$EC_{ws}$  – energia cinética ( $J.m^{-2}.mm^{-1}$ );

I – intensidade de chuva ( $mm.h^{-1}$ ).

Para o desenvolvimento dessa equação, foram consideradas chuvas do tipo convectivas e frontais. A relação entre intensidade e distribuição de gotas por tamanho é específica a cada local (KINNEL, 1981), o que levou Wagner e Massambani (1988) a desenvolverem diferentes relações entre energia cinética e intensidade (equação 6):

$$EC_{Wm} = 1,53 + 0,645 \cdot \log I \quad (6)$$

A equação (6) foi desenvolvida a partir de três chuvas convectivas na região central do estado de São Paulo (WAGNER; MASSAMBANI, 1988).

## 2.7 Erosividade

De acordo com Catâneo et al. (1992), a erosividade é um índice que melhor se correlaciona com a perda de solo, a qual é o produto da energia cinética da chuva pela sua intensidade máxima em 30 minutos.

As gotas de chuvas têm sido intensivamente estudadas para o entendimento de suas dinâmicas e características com o propósito de avaliar, principalmente, os efeitos nas partículas de solo, especialmente erosividade.

Segundo a Food and Agriculture Organization - FAO (1967 citado por SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010), o fator erosividade da chuva (R) é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva esperada em dada localidade, de causar erosão em uma área sem proteção.

Os impactos cinéticos provocados pelas gotas das chuvas sobre o solo estão associados à direção, à inclinação e à intensidade das chuvas (LIMA, 2000), os quais são parâmetros relevantes para o estudo da erosão do solo.

Carvalho et al. (2002), estudando as perdas de solo e água para diferentes energias cinéticas de chuvas simuladas, encontraram valores de perda

que variaram 2,83 a 26,82 g m<sup>-2</sup> (solo) e de 0,00209 a 0,01370 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> (água), quando a energia cinética da chuva variou de 138 para 321 J m<sup>-2</sup>, respectivamente.

Utilizando chuva simulada, Oliveira (2007) estudou o efeito de quatro diferentes perfis de precipitação e duas condições de cobertura do solo no processo erosivo de um Argissolo Vermelho-Amarelo e constatou que os perfis de precipitação caracterizados como avançado, intermediário e atrasado proporcionaram maiores valores de perda de solo e água que o perfil constante e, ainda, que a cobertura do solo com resíduos da cultura do milho reduziu substancialmente as taxas e as perdas de solo, água e nutrientes, em comparação com a condição de solo nu.

## **2.8 Velocidade de impacto da gota**

O impacto das gotas de água sobre o solo altera a estrutura da camada superficial do solo, como já foi apresentado. Segundo Ribeiro (2009), as taxas de desagregação da estrutura estão aparentemente relacionadas à velocidade de impacto de gotas.

Ribeiro (2009) afirma que a maioria dos estudos sobre impacto de gotas baseia-se no trabalho de Kohl (1944 citado por KELLER, 1984). Neste trabalho, foram determinadas velocidades terminais de gotas de diversos diâmetros, caindo em trajetória vertical (KELLER, 1984). Entretanto, as gotas emitidas pelos emissores apresentam uma trajetória bastante diferente e dependente de diversos fatores, como, por exemplo, pressão de serviço, diâmetro de bocal, tipo de placa, modelo de emissor, ângulo do bocal em relação à horizontal, altura do emissor acima do solo e velocidade de saída das gotas (CONCEIÇÃO; COELHO, 2003; DEBOER; MONNES; KINCAID, 2001; MONTERO; TARJUELO; CARRIÓN, 2003).

Segundo Vories e Bernuth (1986), a partir do momento da formação da gota, elas podem ser tratadas como projéteis individuais e cada gota formada está sujeita a uma força de arrastamento aerodinâmica que atua ao longo do vetor velocidade, porém, em sentido oposto.

De acordo com Seginer (1965), com base na teoria balística de uma gota d'água emitida por um emissor, pode-se dividir a trajetória de uma gota em dois tipos de movimento (ascendente e descendente). Para a obtenção da velocidade na direção resultante, Bernuth e Gilley (1985) sugeriram que se faça a soma algébrica entre as componentes da velocidade em X (direção horizontal) e Y (direção vertical).

Segundo Ribeiro (2009), a velocidade de impacto da gota com a superfície do solo parte do pressuposto de que o jato d'água se fraciona em gotas de diâmetros diferentes ao sair de um bocal.

Eigel e Moore (1983) afirmaram que o método mais comum de determinar a energia contida na chuva, seja ela de ocorrência natural ou artificial, é por meio dos cálculos envolvendo as propriedades físicas das gotas de chuvas, o qual exige conhecimento da velocidade terminal, do tamanho da gota de chuva e da distribuição da gota de chuva.

Seja para as condições de chuva natural ou para chuva simulada ou irrigação por aspersão, gotas de água de diferentes tamanhos podem alcançar diferentes velocidades de queda, fazendo com que a superfície do solo fique sujeita ao impacto dessas gotas com energia de diferentes magnitudes (CARVALHO et al., 2002).

## **2.9 Sistema dinâmico de pluviometria (SDP)**

O sistema dinâmico de pluviometria (SDP) (Figura 1) é capaz de determinar a energia cinética e velocidade de impacto das gotas. O sistema é

composto de pluviômetros que giram, com diferentes velocidades escalares. Assim, um determinado pluviômetro pode ser alcançado pela gota de chuva, somente se a velocidade horizontal do pluviômetro for menor que a velocidade vertical da gota (LIMA et al., 2010). Segundo o autor, o SDP possui, em sua estrutura, diversos pluviômetros de base quadrada (2,23 por 2,23 cm) com 7 cm de altura, de parede delgada, construídos e alinhados ao longo de uma linha reta.



Figura 1 Sistema dinâmico de pluviometria (SDP)

Após expor o SDP a uma chuva, toda água coletada pelo pluviômetro à distância “ $r$ ” será causada pelas gotas com velocidade vertical maior que  $V_{hr}$ . O pluviômetro posicionado no centro do aparelho é capaz de coletar as gotas de água com velocidade vertical maior ou igual a zero, pois seu formato circular, mesmo girando ao redor do seu centro geométrico, atua como se fosse um coletor estático.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação, do Departamento de Engenharia (DEG), da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

No experimento foi avaliada a energia cinética e a velocidade de impacto da gota d'água (através da simulação de chuva sob diferentes diâmetros de bocais), por meio do Super Spray (Figura 2), utilizando seis diferentes diâmetros de bocais. A avaliação foi realizada com a utilização do sistema dinâmico de pluviometria (SDP).



Figura 2 Super Spray (*Senninger Irrigation*)

O sistema de bombeamento se deu a partir da utilização de uma bomba hidráulica da KSB modelo DN 32/20 (vazão de  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  altura manométrica de 60 m.c.a. e velocidade de 3500 rpm). Para cada ensaio realizado, foi estabelecido um tempo de funcionamento de 60 minutos, utilizando três repetições para cada diâmetro de bocal.

O controle de pressão foi estabelecido por meio de um regulador de pressão de 69 kPa (10 psi) da marca *Senninger Irrigation* e de vazão compatível com a faixa de vazão dos seis bocais.

Entre o emissor Super Spray e o regulador de pressão foi instalada uma tomada de pressão diretamente conectada a um manômetro de mercúrio. Esse procedimento foi adotado para aferir a pressão na entrada do emissor ao correspondente valor de pressão de operação recomendada pelo fabricante (10 psi), para os seis diferentes diâmetros de bocal.

Na Figura 3 observa-se a vista superior do posicionamento do emissor e do sistema dinâmico de pluviometria (SDP) dentro do laboratório onde foram realizados os ensaios.

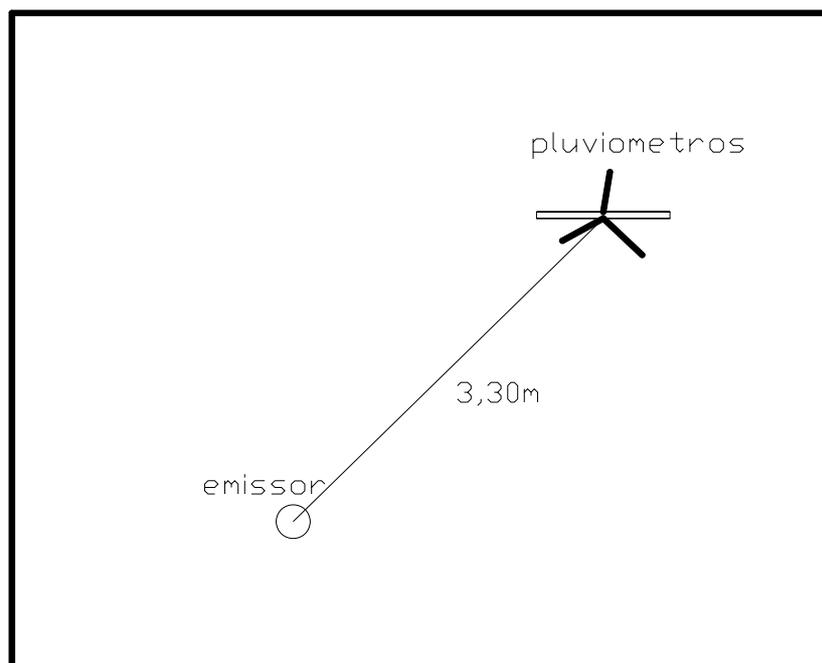


Figura 3 Vista superior do posicionamento do emissor e do SDP

### 3.2 Instalação do emissor

O emissor utilizado nos ensaios foi avaliado operando com bocais de diâmetro de orifício variando entre 5,75 a 10,12 mm (Tabela 1).

Tabela 1 Especificações técnicas do Super Spray (*Senninger Irrigation*)

Nº do bocal	$\phi_{\text{orifício}}$ (mm)	Vazão (L.h <sup>-1</sup> )
14,5	5,75	1070,50
17,5	6,94	1555,85
19	7,54	1812,13
21	8,33	2159,14
23,5	9,33	2635,42
25,5	10,12	3077,68

Fonte: Senninger Irrigation (2010)

A placa defletora (Figura 4) utilizada foi a de forma côncava, apresentando superfície com 36 ranhuras de profundidade média, de cor azul.



Figura 4 Placa defletora côncava com ranhuras médias

Os emissores e suas conexões foram fixados a uma tubulação lateral suspensa, de aço galvanizado com diâmetro interno de 57,3 mm, através de um tubo de descida de PVC com diâmetro interno de 19,1 mm (Figura 5).



Figura 5 Emissor Super Spray (*Senninger Irrigation*) conectados à tubulação lateral suspensa

Os seis bocais foram conectados ao Super Spray de forma individual, cuja altura estabelecida entre o emissor e a superfície do sistema dinâmico de pluviometria foi de 2,45 m.

### **3.3 Ensaios realizados**

#### **3.3.1 Determinação da vazão**

A vazão dos seis bocais do emissor Super Spray foi determinada com o auxílio de um recipiente de volume graduado e de uma estrutura composta de um garrafão de PVC de 20 litros de água com abertura no fundo, acoplado a um cano de PVC de 2,5 m de altura (Figura 6). A partir dessa estrutura pôde-se

determinar a vazão conectando o garrafão ao emissor e colocando o recipiente de volume graduado abaixo do cano de PVC.

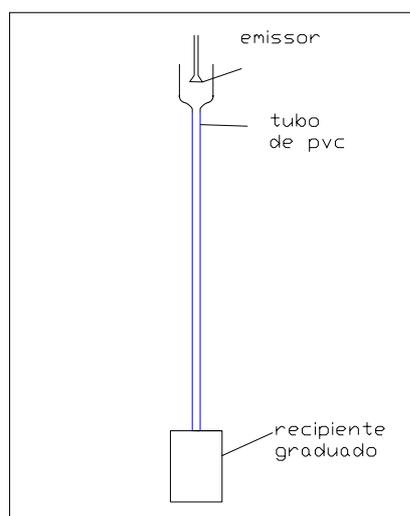


Figura 6 Estrutura usada para determinação da vazão

Para a determinação da vazão foi estabelecido o volume de 20 litros de água e com o auxílio de um cronômetro marcou-se o tempo necessário para cada bocal atingir o volume estabelecido. Foram realizadas três repetições para cada diâmetro de bocal. Para a realização dos testes, foram feitas aferições da pressão através de um manômetro de Bourdon, posicionado na entrada do regulador de pressão.

Com os dados coletados, foi possível determinar os coeficientes de descarga para os seis diferentes diâmetros de bocal, através da correlação das vazões medidas com a vazão do emissor (equação 3).

### 3.3.2 Determinação do diâmetro molhado ( $W_{rs}$ ) de cada bocal

Simultaneamente aos ensaios de determinação de energia cinética, foram realizados os ensaios de determinação do diâmetro molhado de cada bocal. Esse procedimento foi feito com o auxílio de 50 coletores (Figura 7), com diâmetro de 8 cm, sobre a superfície do solo, perpendicularmente à linha de irrigação. O espaçamento entre coletores foi de 30 cm de centro a centro e o tempo estabelecido para cada ensaio de 60 minutos.



Figura 7 Determinação do padrão molhado

Para a determinação do diâmetro molhado ( $W_{rs}$ ) de cada bocal avaliado, consideraram-se todos os coletores que obtiveram lâmina d'água maior ou igual a 0,26 mm, conforme recomendado pela norma ASAE S398.1 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE, 1989).

### 3.3.3 Sistema de avaliação da energia cinética

A avaliação da energia cinética da gota de água se deu a partir da metodologia proposta por Lima et al. (2010).

O sistema dinâmico de pluviometria (SDP) (Figura 8) foi posto para funcionar sobre um tripé a 1,0 m de altura em relação à superfície do solo e a uma distância horizontal de 3,30 m do centro do emissor. Seu funcionamento se deu de forma giratória acionado por um motor elétrico funcionando a 92 rpm.



Figura 8 Sistema dinâmico de pluviometria (SDP)

A pressão de operação estabelecida foi de 69 kPa (10 psi) à altura de 2,45 m entre o SDP e o emissor, instalado em um laboratório sem presença de vento.

Como o SDP possuía duas partes simétricas, optou-se por fazer a média entre os pluviômetros equidistantes do centro. Devido à ocorrência de respingos

na extremidade da calha que suporta os pluviômetros, foram descartados os dados referentes aos pluviômetros da extremidade do sistema para todos os bocais avaliados. A cada ensaio pesaram-se os pluviômetros antes e após os ensaios e foram anotadas suas respectivas massas.

Para a determinação da velocidade de impacto da gota provocada por chuva artificial (emissores) no SDP, foi usada a equação 7, que descreve a velocidade horizontal do pluviômetro à distância “r” do centro do aparelho, a seguir:

$$Vh_r = \frac{2\pi Rr}{60} \quad (7)$$

em que

$Vh_r$  – velocidade horizontal do pluviômetro à distância r do centro ( $m.s^{-1}$ )

R – velocidade rotacional (rpm);

r – distância do centro do pluviômetro ao centro do pluviômetro central (m);

A energia cinética de cada pluviômetro foi calculada através da equação 8, descrita a seguir:

$$EC = \frac{1}{2} m V_r^2 \left( \frac{F_r}{F_T} \right) \quad (8)$$

em que

EC – energia cinética ( $J.m^{-2}$ )

m – massa da água do pluviômetro central (mm)

$V_r$  – velocidade média de queda da gota d’água ( $m.s^{-1}$ )

$F_r$  – frequência relativa de cada posição (%)

$F_T$  – frequência total do ensaio (%)

Como a face superior dos pluviômetros tinha ângulo de inclinação de 45 graus, a velocidade ( $V_r$ ) das gotas coletadas por um coletor de velocidade horizontal  $V_{h_r}$  pode ser estimada, conforme a equação (9), a seguir:

$$V_r = V_{h_r} \sqrt{2} \quad (9)$$

Para a obtenção da energia cinética final de cada bocal, os dados coletados foram inseridos em uma planilha do software Excel. Por meio dessa planilha foi possível calcular a lâmina de água em cada pluviômetro e, por meio desse parâmetro, calculou-se a velocidade horizontal de cada pluviômetro, conforme suas respectivas distâncias do centro (equação 7), a velocidade vertical das gotas coletadas e a energia cinética da gota, equação (9) e equação (8), respectivamente.

A frequência de ocorrência da velocidade em cada pluviômetro foi calculada por meio da diferença entre as lâminas de água coletada por coletores adjacentes, expressa em porcentagem. A partir desse cálculo foi gerado histogramas de velocidade para cada diâmetro de bocal avaliado.

#### **3.3.4 Determinação da uniformidade da água no local do SDP**

O sistema de pluviometria requer precipitação uniforme sobre sua área de coleta. Para a determinação da uniformidade de precipitação no local onde esteve posicionado o sistema dinâmico de pluviometria (SDP) foi empregada uma malha de coletores, de 1m x 1m, conforme apresentado na Figura 9 (a), mantida a uma altura de 1 m acima da superfície do solo (Figura 9 b).



Figura 9 (a) Posicionamento dos coletores dentro da malha; (b) altura da malha em relação à superfície do solo

A malha foi composta de 121 coletores posicionados lado a lado, seguindo as recomendações da norma ISO 7749-2 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION - ISO, 1990), usada para realização de testes de distribuição de uniformidade para sprays utilizados em irrigação convencional, com mínimo de cinco coletores espaçados do centro à extremidade da malha.

Com os dados coletados, determinaram-se o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), referentes às equações 1 e 2, respectivamente. Com isso, geraram-se gráficos de intensidade de aplicação de cada bocal avaliado, bem como gráficos de superfícies com o auxílio do programa Surfer 7.0. Nos gráficos de superfície foram apresentados os pontos de maior concentração de água sobre a malha.

### 3.4 Delineamento estatístico

O delineamento experimental adotado foi o delineamento inteiramente casualizado (DIC), referentes aos seis bocais (tratamentos), com três repetições.

As variáveis avaliadas foram a intensidade da precipitação a energia cinética e a velocidade de impacto das gotas dos seis diferentes diâmetros de bocais do emissor Super Spray.

As comparações de médias dos valores da velocidade de impacto da gota, da energia cinética e da intensidade de aplicação entre os seis diâmetros dos bocais analisados foram realizadas pelo teste de Scott e Knott (1974), a 5% de probabilidade.

Por meio do programa computacional Excel, foi gerada a curva de regressão dos dados de vazão e sua respectiva equação de ajuste.

As análises estatísticas foram realizadas por meio do programa Sisvar® (FERREIRA, 2003).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Determinação da vazão dos bocais do emissor Super Spray

Os valores de vazão medidos do emissor Super Spray (SENNINGER IRRIGATION, 2010), operando com os seis diferentes diâmetros de bocais (5,75 a 10,12 mm), foram próximos dos valores de vazão apresentados no catálogo do fabricante (Tabela 2).

Tabela 2 Valores de coeficiente de descarga (Cd) para os seis bocais do emissor Super Spray

$\phi_{\text{bocal}}$ (mm)	$q_{\text{med}}$ (L.h <sup>-1</sup> )	$q_{\text{cat}}$ (L.h <sup>-1</sup> )	$q_s$ (L.h <sup>-1</sup> )	$Cd_{\text{med}}$	$Cd_{\text{cat}}$
5,75	1058,32	1070,50	1095,54	0,97	0,98
6,94	1552,85	1555,85	1595,92	0,97	0,97
7,54	1806,06	1812,13	1883,79	0,96	0,96
8,33	2168,71	2159,14	2299,22	0,94	0,94
9,33	2634,20	2635,42	2884,39	0,91	0,91
10,12	3176,81	3077,68	3393,53	0,94	0,91

A vazão estimada para cada bocal ( $q_s$ ) foi calculada por meio da equação 3, considerando coeficiente de descarga igual a 1,0. O coeficiente de descarga medido ( $Cd_{\text{med}}$ ) foi obtido a partir da vazão medida ( $q_{\text{med}}$ ) e considerando a equação 3. Outro coeficiente (coeficiente de descarga de catálogo -  $Cd_{\text{cat}}$ ) foi obtido pela vazão listada em catálogo ( $q_{\text{cat}}$ ) e a equação 3. Conforme os valores apresentados percebe-se que quanto maior o bocal e, conseqüentemente, a vazão, menor é o valor do coeficiente de descarga.

Ainda em comparação à equação 3, espera-se que a vazão dos bocais seja relacionada ao quadrado do diâmetro dos mesmos. Para obter uma equação quadrática pela regressão dos dados, foi utilizado o modelo potencial ( $y=ax^b$ ), com valor de b igual a 2. Assim, por meio da ferramenta solver/Excel, foi possível gerar a equação (10).

$$q_s = 31,13 \cdot \phi_{bocal}^2 \quad (10)$$

em que

$q_s$  - vazão do bocal, L.h<sup>-1</sup>;

$\phi_{bocal}$  - diâmetro do bocal, mm

Posteriormente, utilizou-se a equação (10) para gerar novos dados, os quais se encontram no Gráfico 1. O valor de R<sup>2</sup> foi de 0,998 para o ajuste dos valores medidos à equação quadrática.

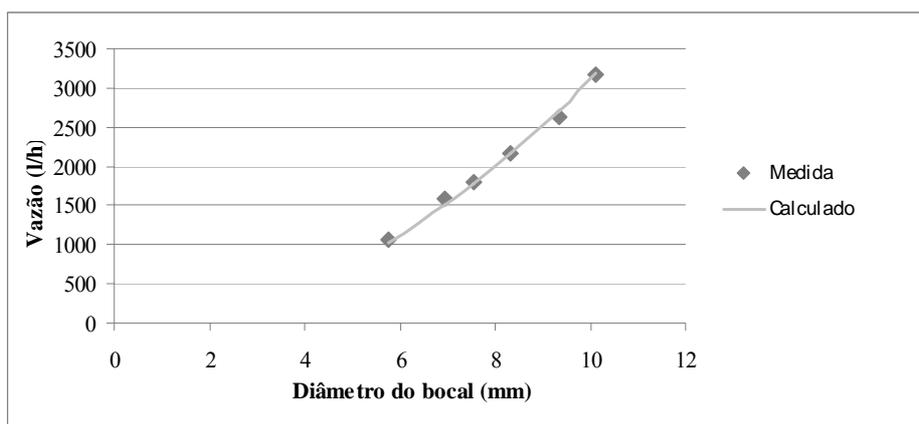


Gráfico 1 Valores das médias das vazões observadas para os bocais do Super Spray

#### 4.2 Velocidade de impacto das gotas

A velocidade de impacto das gotas (média ponderada) geradas por chuva artificial a partir do emissor Super Spray, medida com o auxílio do SDP, está representada na Tabela 3. Os resultados foram submetidos à análise estatística pelo teste de Scott e Knott (1974), a 5% de significância, possibilitando verificar

que não houve diferença significativa entre os bocais analisados. Como a pressão de operação foi a mesma para todos os bocais e a velocidade está relacionada à raiz do valor da pressão, não eram esperadas diferenças entre as velocidades de saída da água dos bocais.

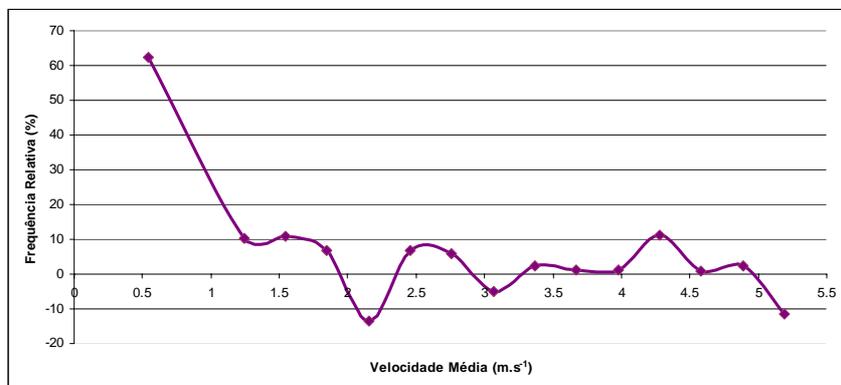
Tabela 3 Análise de médias da velocidade da gota d'água sobre o SDP

<b>Velocidade média ponderada (<math>m.s^{-1}</math>)</b>				
$\phi_{\text{bocal}}$ (mm)	1	2	3	Média*
6,94	1,51	1,57	1,55	1,54 a1
7,54	1,65	1,48	1,48	1,54 a1
8,33	1,53	1,57	1,55	1,55 a1
9,33	1,47	1,45	1,42	1,45 a1
10,12	1,49	1,48	1,53	1,50 a1
CV (%)	3,53			

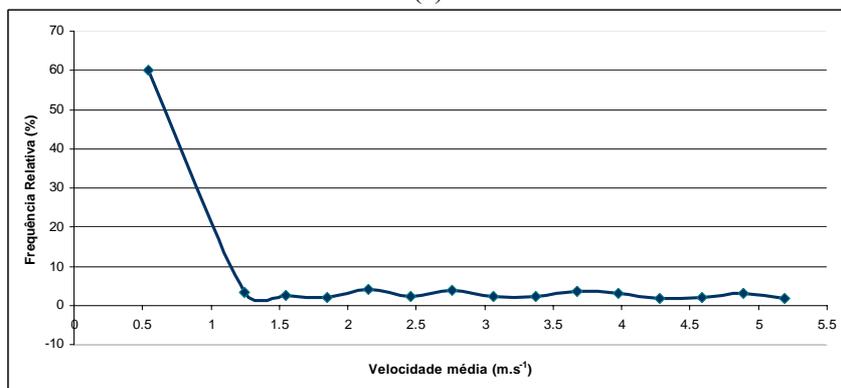
\*Médias seguidas do mesmo número não diferem entre si, pelo teste Scott e Knott (1974), a 5% de significância.

Vale salientar que os valores apresentados na Tabela 3 referem-se à velocidade média ponderada das gotas à altura de 1 m da superfície do solo. Não havendo diferença, presume-se que o tamanho das gotas possa não ter se diferenciado de bocal para bocal.

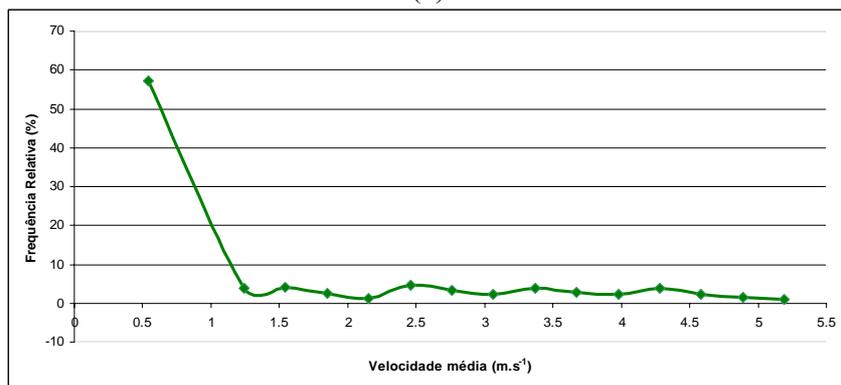
Estão representadas nos Gráficos 2 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) as frequências de ocorrência de velocidade de gotas da chuva provocada pelo emissor Super Spray, durante uma hora de exposição sobre o SDP, para os bocais 5,75; 6,94; 7,54; 8,33; 9,33 e 10,12 mm de diâmetro (média das três repetições), respectivamente.



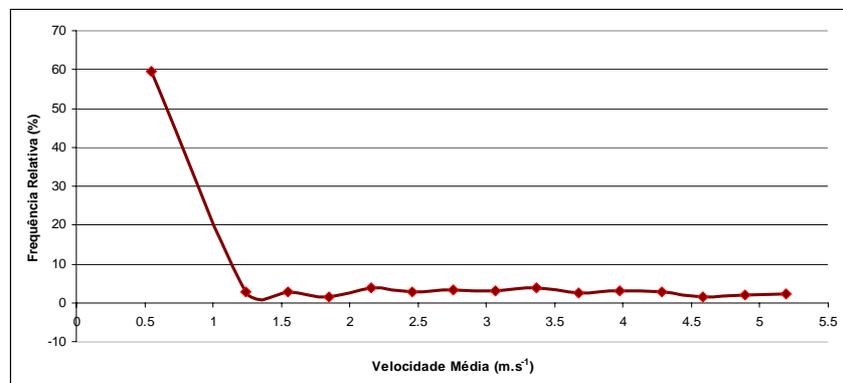
(a)



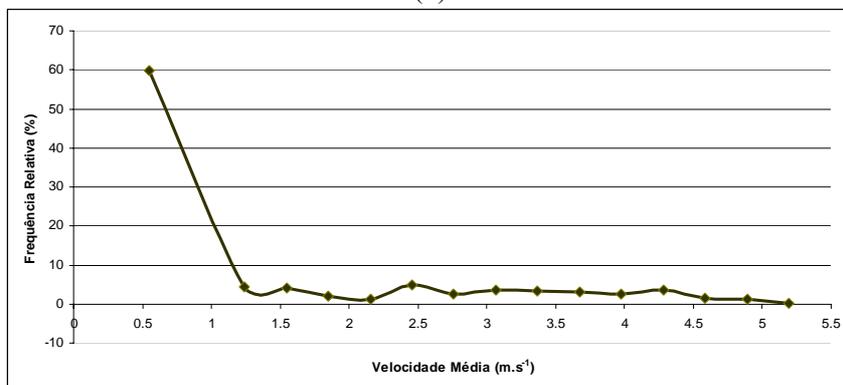
(b)



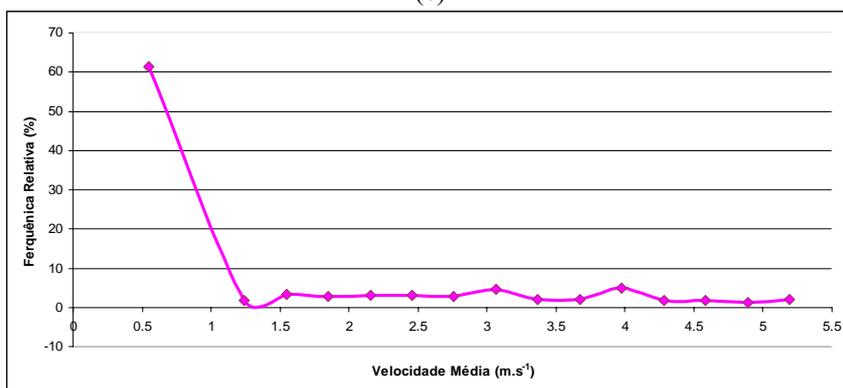
(c)



(d)



(e)



(f)

Gráfico 2 Histograma da velocidade média das gotas para os diâmetros de bocal 5,75 mm (a), 6,94 mm (b), 7,54 mm (c), 8,33 mm (d), 9,33 mm (e) e 10,12 mm (f)

Observa-se, pelo Gráfico 2 (a), a ocorrência de frequências negativas em três pontos do gráfico, o que se deve, provavelmente, a erros de determinação decorrentes da pequena lâmina aplicada no tempo estabelecido e/ou da chuva desuniforme provocada pelo bocal. É importante mencionar, nesse ponto, que, no caso do Gráfico 2 (a), a ocorrência desses erros impediu a utilização dos dados do bocal 5,75 mm para as demais análises e considerações feitas no decorrer desta pesquisa.

Para os demais bocais, o comportamento ocorreu de acordo com o esperado, ou seja, para o pluviômetro próximo ao pluviômetro central, cuja velocidade era menor que os demais pluviômetros ao longo da calha, observou-se maior frequência relativa (coletou maior lâmina de água) que reduziu de forma brusca em relação ao pluviômetro com velocidade de  $1,24 \text{ m.s}^{-1}$  e, a partir desse ponto, manteve-se praticamente constante, não apresentando valores inferiores a zero.

#### **4.3 Energia cinética das gotas**

Os valores de energia cinética proporcionada pela chuva artificial aplicada pelo emissor, com uma hora de duração, são apresentados na Tabela 4. Semelhantemente à velocidade de impacto, não se observa uma tendência dos valores em relação ao tamanho dos bocais. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo teste de Scott e Knott (1974), a 5% de significância, tendo sido possível verificar que os dados não apresentaram diferença significativa entre os bocais analisados. Como não houve diferença significativa para os valores de velocidade média ponderada, esperava-se que, para energia cinética, o comportamento fosse semelhante.

Tabela 4 Análise de médias da energia cinética por milímetro de chuva sobre o SDP

<b>Energia cinética (J.m<sup>-2</sup>.mm<sup>-1</sup>)</b>				
<b>Φ<sub>bocal</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Média*</b>
6,94	2,14	2,32	2,26	2,24 a1
7,54	2,47	2,01	2,02	2,17 a1
8,33	2,21	2,30	2,23	2,25 a1
9,33	1,96	1,95	1,87	1,93 a1
10,12	2,07	2,10	2,16	2,11 a1
CV(%)	6,59			

\*Médias seguidas do mesmo número não diferem entre si pelo teste Scott e Knott (1974), a 5% de significância.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de intensidade de aplicação de água sobre o sistema dinâmico de pluviometria (SDP). Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo teste de Scott e Knott (1974), a 5% de significância, permitindo verificar que os dados diferiram significativamente a 5%. O bocal 8,33 mm obteve o maior valor de intensidade, diferindo dos demais bocais; já os bocais 7,54, 9,33 e 10,12 mm foram estatisticamente iguais entre si e diferiram dos demais. O bocal 6,94 mm, que apresentou os menores valores de intensidade, diferiu dos demais bocais analisados. Esse resultado justifica os valores apresentados para o bocal 8,33 mm que, apesar de não ter diferido estatisticamente dos demais bocais avaliados nas análises anteriores, foi o bocal que apresentou os maiores valores de energia cinética e velocidade média ponderada.

Tabela 5 Análise de médias para os valores de intensidade de aplicação sobre o SDP

<b>Intensidade de aplicação (mm.h<sup>-1</sup>)</b>				
<b>Φ<sub>bocal</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Média*</b>
6,94	48,52	47,69	49,57	48,59 a1
7,54	64,81	63,52	62,96	63,76 a2
8,33	72,17	73,04	72,90	72,70 a3
9,33	63,88	65,31	64,45	64,55 a2
10,12	62,94	64,19	66,92	64,68 a2
CV(%)	1,89			

\*Médias seguidas do mesmo número não diferem entre si pelo teste Scott e Knott (1974), a 5% de significância.

Comparando-se os valores de energia cinética por milímetro de chuva apresentados na Tabela 4, com os valores encontrados por Kinnell (1987) ao avaliar chuvas naturais com intensidades superiores a 40 mm.h<sup>-1</sup>, verificou-se que os valores de energia cinética encontrados com a utilização do SDP foram menores que os valores de 25 a 29 J.m<sup>-2</sup>.mm<sup>-1</sup>, encontrados pelo referido autor.

A energia cinética provocada por milímetro de chuva aplicada pelo emissor Super Spray em cada bocal avaliado é apresentada no Gráfico 3. Para efeitos de comparação, foram utilizados modelos empíricos de estimativa de energia cinética de chuva natural propostos na literatura, equação (5) e equação (6), respectivamente. Observa-se que os valores medidos, embora próximos, estão ligeiramente abaixo de valores estimados para intensidades estimadas pelas equações de Wagner e Massambani (1988) e Wischmeier e Smith (1958). O valor inferior medido se deve, provavelmente, à trajetória diferente das gotas do emissor e da menor altura do emissor (2,45 metros) em relação à altura de queda de gotas de chuva natural, provavelmente muito maior e na vertical.

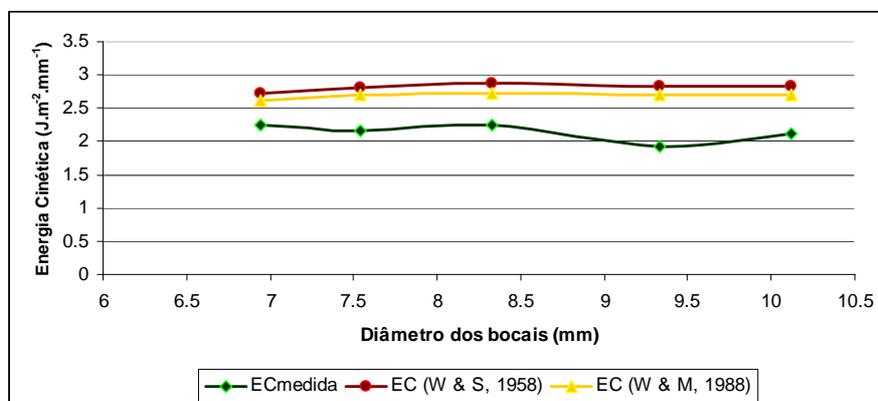


Gráfico 3 Distribuição da energia cinética para os cinco diferentes diâmetros de bocais avaliados

#### 4.4 Diâmetro molhado

Os valores de largura do padrão molhado, equivalente ao diâmetro molhado medido pelos coletores posicionados em linha reta, a cada 0,30 m sob o emissor, são apresentados na Tabela 6. Para identificar o padrão molhado de cada bocal, adotou-se o limite mínimo recomendado pela norma ASAE Standard S398.1 de 0,26 mm/h (ASAE, 1989).

Tabela 6 Valores medidos de padrão molhado ( $W_{rs}$ ) para os seis bocais avaliados

$\phi_{\text{orificio}}$ (mm)	$W_{rs}$ (m)
5,75	11,4
6,94	12
7,54	12
8,33	12
9,33	13,2
10,12	14

Por meio do Gráfico 4 pode-se observar uma linha vermelha que representa o limite mínimo recomendado pela norma ASAE (1989).

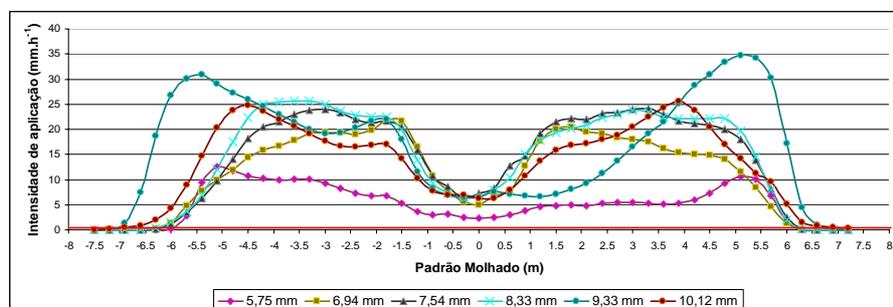


Gráfico 4 Distribuição dos valores da intensidade de aplicação de água ao longo do padrão molhado do emissor (Super Spray) para os diferentes diâmetros de bocais

Pelo mesmo Gráfico, observa-se que o bocal de 9,33 mm de diâmetro apresentou as máximas intensidades, alcançando cerca de  $35 \text{ mm.h}^{-1}$ . O sistema SDP foi posicionado à esquerda, no espaço equivalente a 2,8 a 3,8 m. Nesta posição observa-se que alguns bocais apresentaram intensidade variável, podendo influenciar a qualidade dos dados obtidos pelo SDP.

Ainda observando o comportamento dos dados na posição do SDP, fica evidente que o bocal 8,33 mm apresentou as maiores intensidades de aplicação e manteve um comportamento praticamente constante; já o bocal 5,75 mm obteve as menores intensidades, o que pode ter influenciado a qualidade dos dados para esse bocal, apesar de o mesmo ter mantido um comportamento quase constante.

A partir do Gráfico 4 pode-se afirmar que o sistema SDP funciona satisfatoriamente quando se obtêm dados de intensidade de aplicação superiores a  $20 \text{ mm.h}^{-1}$  e valores de intensidade de aplicação praticamente constantes sobre o SDP.

#### 4.4.1 Intensidade de chuva sobre o SDP

As intensidades médias de aplicação de água no local de abrangência do sistema dinâmico de pluviometria (SDP), para os seis diferentes diâmetros

avaliados, estão apresentadas no Gráfico 5. A intensidade média de aplicação de água foi obtida a partir dos valores coletados na malha de irrigação fixada no local em que o SDP estava posicionado.

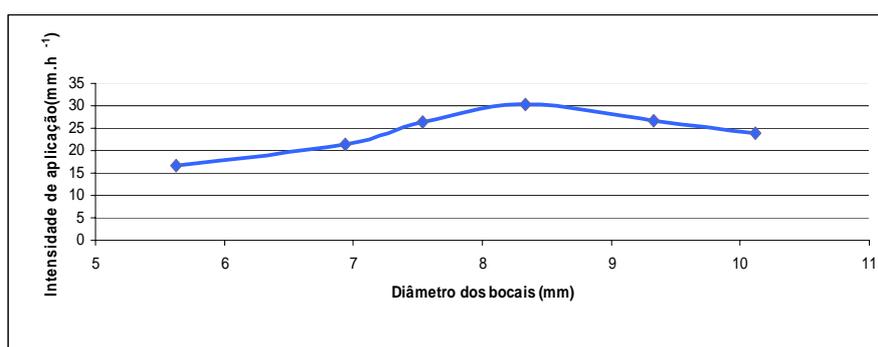
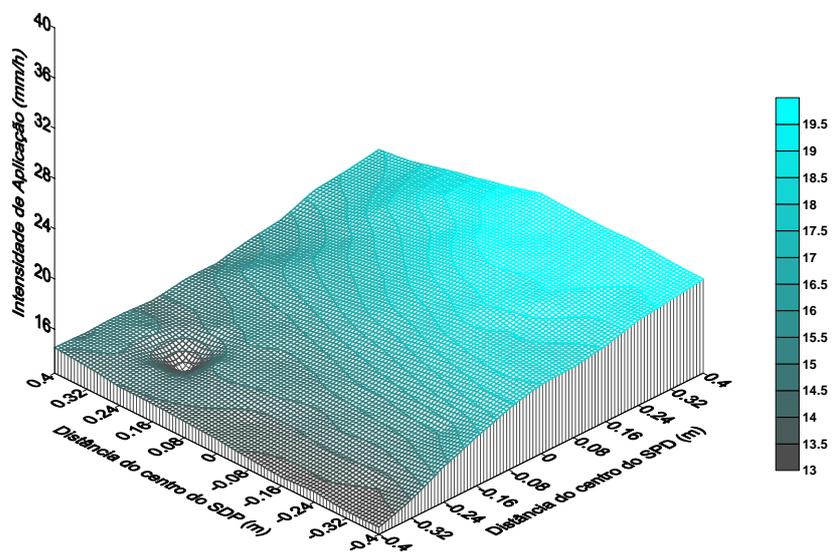


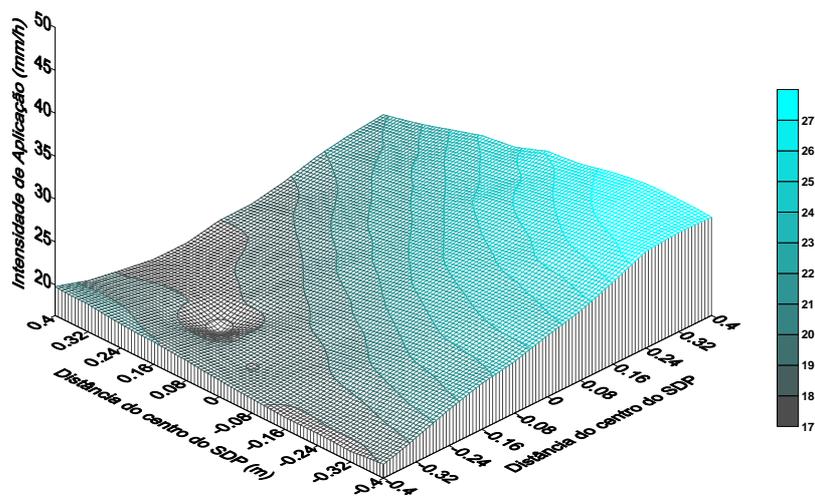
Gráfico 5 Valores de intensidade de aplicação de água média observados no local de colocação do SDP

Pelo Gráfico 5, observa-se que, semelhante ao comportamento da energia cinética e da velocidade de impacto das gotas, os dados não apresentaram uma relação tendenciosa entre a intensidade de aplicação e o diâmetro dos bocais, ou seja, os valores de intensidade média não cresceram proporcionalmente com o diâmetro dos bocais. Observa-se, ainda pelo mesmo Gráfico, que o bocal que apresentou a maior intensidade média foi o de 8,33 mm de diâmetro.

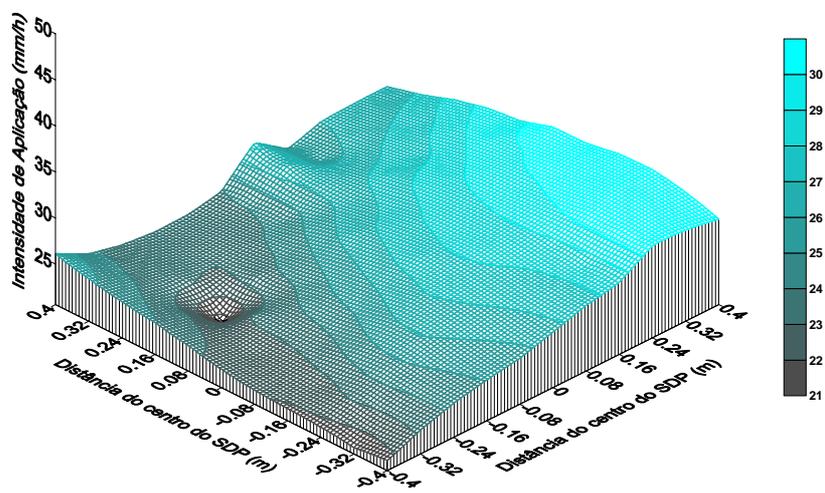
Para maior entendimento do comportamento da intensidade de aplicação sobre a malha de (1 m x 1 m), na qual o SDP esteve posicionado, foram gerados gráficos de superfície para os seis bocais avaliados apresentados nos Gráficos 6 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) (referentes aos diâmetros de 5,75 mm; 6,94 mm; 7,54 mm; 8,33 mm; 9,33 mm e 10,12 mm, respectivamente). O emissor foi posicionado a 3,30 m do centro da referida malha.



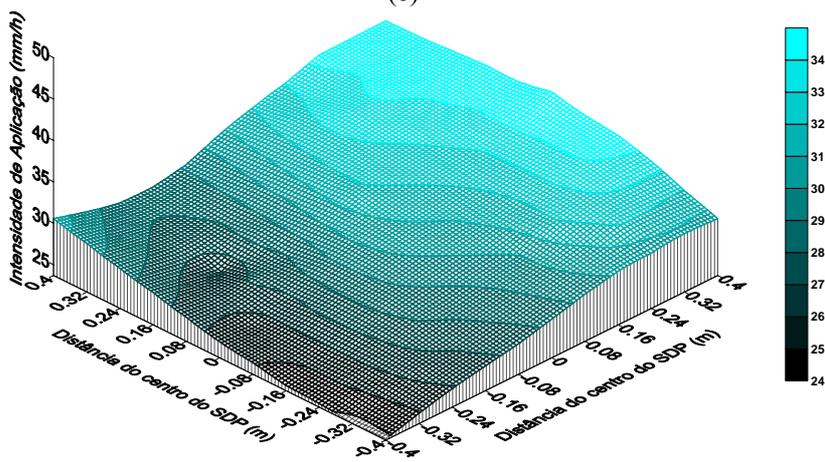
(a)



(b)



(c)



(d)

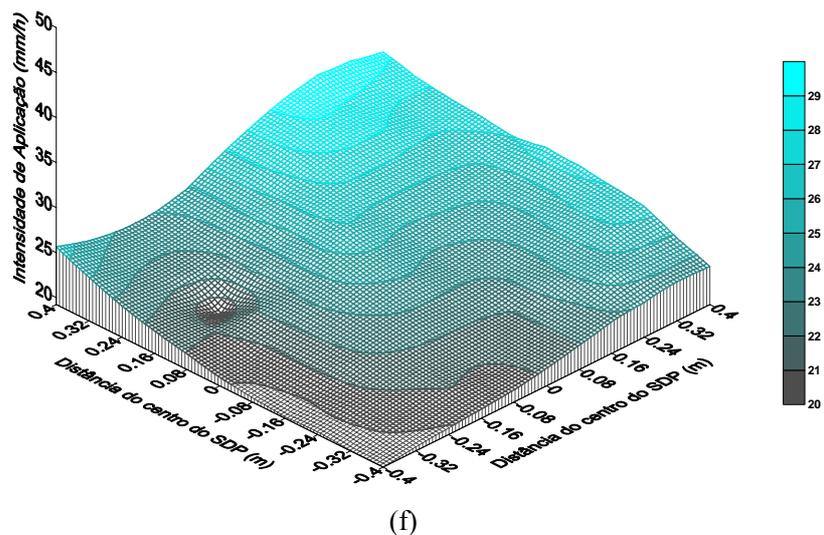
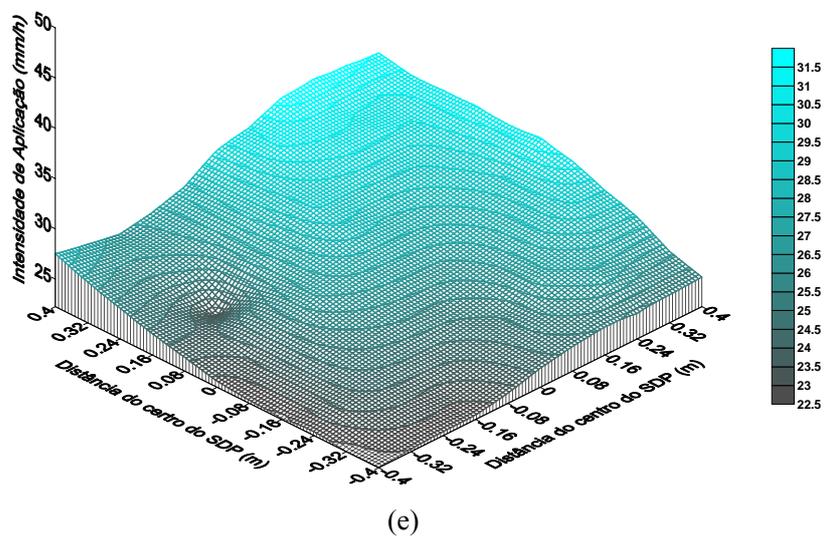


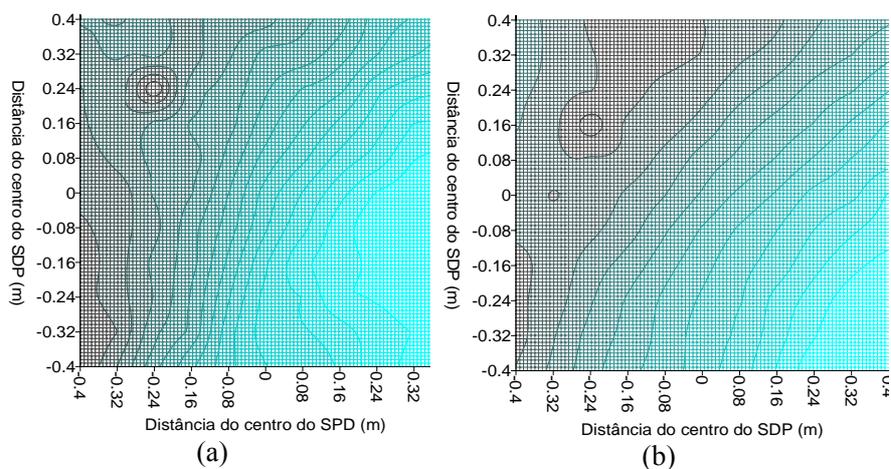
Gráfico 6 Superfícies de intensidade de aplicação de água no local de abrangência de SDP, para os bocais de diâmetro: 5,75 mm (a); 6,94 mm (b); 7,54 mm (c); 8,33 mm (d); 9,33 mm (e) e 10,12 mm (f)

Observa-se, para os bocais de 5,75 mm; 6,94 mm e 7,54 mm de diâmetro (Gráfico 6 (a), (b) e (c), respectivamente), que as maiores intensidades

de aplicação de água ocorreram de forma similar, tendo maior concentração mais próxima ao emissor e para fora da malha.

No caso dos três maiores diâmetros de bocais, 8,33 mm; 9,33 mm e 10,12 mm (Gráfico 6 (d), (e) e (f)), respectivamente, observa-se que as maiores intensidades de aplicação de água concentraram-se na parte mais distante do emissor, na extremidade da periferia do raio de alcance.

No Gráfico 7 (a), (b), (c), (d), (e) e (f), estão apresentadas as vistas superiores para a intensidade de aplicação de água nos bocais de 5,75 mm; 6,94 mm; 7,54 mm; 8,33 mm; 9,33 mm e 10,12 mm de diâmetro, respectivamente. Pelo gráfico 7 fica evidente o comportamento da intensidade de aplicação de água para os seis bocais avaliados.



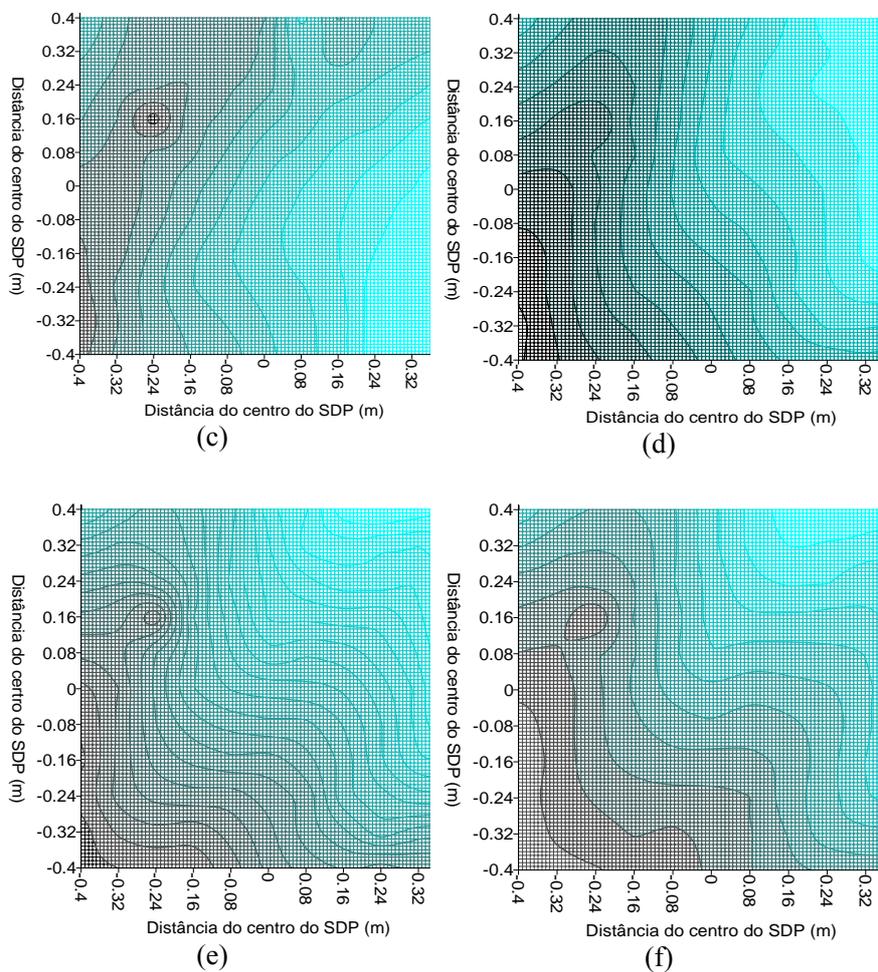


Gráfico 7 Vista superior da intensidade de aplicação de água sobre a malha em que esteve posicionado o SDP, para os bocais de diâmetro: 5,75 mm (a); 6,94 mm (b); 7,54 mm (c); 8,33 mm (d); 9,33 mm (e) e 10,12 mm (f)

Considerando os Gráficos 6 e 7, visto que cada bocal apresenta diferentes larguras de padrão molhado, pode-se afirmar que a ocorrência de maior concentração de água sobre o SDP está diretamente ligada ao raio de

alcance de cada bocal avaliado, de acordo com o posicionamento adotado para o ensaio.

#### 4.5 Uniformidade dos bocais sobre o sistema dinâmico de pluviometria

Com objetivo de avaliar a uniformidade da chuva na região do sistema SDP, foram coletados dados proveniente da malha de coletores. A partir desses dados foram determinados: coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e de coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), para os seis diâmetros de bocal avaliados (Gráfico 8).

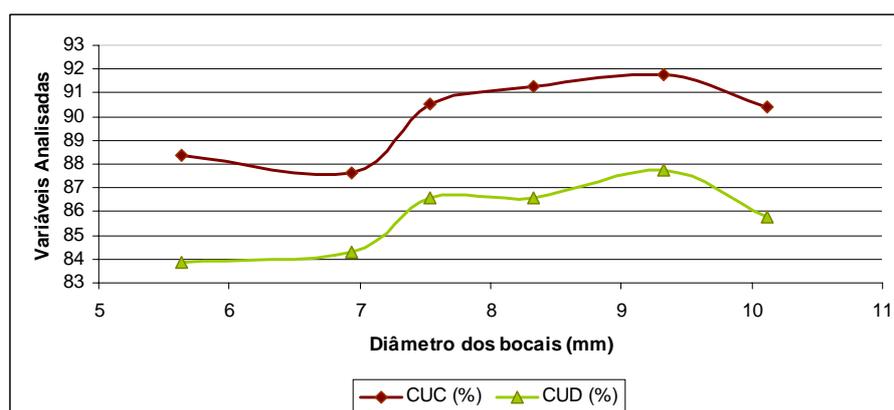


Gráfico 8 Valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e de coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), observados no local de colocação do SDP

É possível observar que, apesar de o bocal de 5,75 mm de diâmetro ter obtido um CUC de 88,31%, o valor do CUD foi de 83,74%, o que pode explicar as ocorrências de frequência negativa para alguns valores de velocidade. Nos demais bocais, os valores dos coeficientes de uniformidade de distribuição foram superiores a 84%, garantindo, assim, valores sem discrepâncias medidos

pelo SDP. Com a análise desses parâmetros (CUC e CUD) foi possível inferir que, para valores de CUD inferiores a 84%, o SDP pode ser impreciso.

## 5 CONCLUSÃO

As vazões determinadas por meio do método volumétrico para os bocais avaliados apresentaram valores muito próximos aos da vazão de catálogo.

A energia cinética provocada pelo emissor Super Spray utilizado em pivô central é inferior à energia cinética de chuvas naturais com a mesma intensidade.

A energia cinética não está relacionada ao tamanho dos bocais testados.

A velocidade de impacto das gotas apresentou comportamento similar para os diferentes diâmetros de bocal avaliados.

O sistema dinâmico de pluviometria mede a velocidade e a energia cinética da chuva, quando esta apresenta uniformidade (sem variabilidade espacial).

O sistema dinâmico de pluviometria apresentou valores discrepantes de energia cinética quando o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) foi inferior a 84%.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.agsolve.com.br/noticia.php?cod=1929>>. Acesso em: 30 mar. 2010.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING. **Procedure for sprinkler testing and performance reporting: ASAE S398.1**. Saint Joseph, 1989. 2 p.

AMORIM, R. S. S. **Desprendimento e arraste de partículas de solo decorrentes de chuvas simuladas**. 1999. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

AZEVEDO, H. J. et al. Influência de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 152-158, 2000.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação** 8ª ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BERNUTH, R. D. von; GILLEY, J. R. Evaluation of center pivot application packages considering droplet induced infiltration reduction. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 6, p. 1940-1946, 1985.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5. ed. São Paulo: Ícone, 2005. 335 p.

CARVALHO, D. F. de et al. Perdas de solo e água em um argissolo vermelho amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 385-389, 2002.

CASSOL, E. A. et al. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 685-690, jul. 2004.

CATÂNEO, A. et al. Correlação entre o índice de erosividade  $EI_{30}$  médio mensal e o coeficiente de chuva do município de Mococa. **Científica**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 1-7, 1992.

CHARMELO, L. C. L. **Desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido, sob diferentes condições operacionais**. 1990. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1990.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkely: University of California, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).

COLOMBO, A. Pivô-central. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. (Ed.). **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, p. 209-258. (Série Engenharia Agrícola).

CONCEIÇÃO, M. A. F.; COELHO, R. D. Ballistic model to estimate microsprinkler droplet distribution. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 775-778, out./dez. 2003.

DEBOER, D. W.; MONNES, M. J.; KINCAID, D. C. Measurement of sprinkler droplet size. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 17, n. 1, p. 11-15, Jan. 2001.

DIJK, A. I. J. M.; BRUIJNZEEL, L. A.; ROSEWELL, C. J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 261, n. 1, p. 1-23, June 2002.

DOURADO NETO, D.; LIER, Q. J. V.; FRIZZONE, J. A. Determinação da lâmina média de irrigação em pivô central. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, n. 1, p. 188-190, jan./abr. 1994.

EIGEL, J. D.; MOORE, I. D. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 26, n. 4, p. 1079-1084, July/Aug. 1983.

FERREIRA, D. F. **Programa de análises estatísticas, statistical analysis software, e planejamento de experimentos, SISVAR 5.0, build 67**. Lavras: UFLA, 2003. Software.

FOLEGATTI, M. V.; PESSOA, P. C. S.; PAZ, V. P. S. Avaliação do desempenho de um pivô central de grande porte e baixa pressão. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n. 1, p. 119-127, jan./abr. 1998.

FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. Avaliação de sistemas de irrigação. In: MIRANDA, J. H. de; PIRES, R. C. de M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, p. 573-561.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 17-55.

HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1968.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION.  
**ISO7749/2**: irrigation equipment: rotating sprinklers: part 2, uniformity of distribution and test methods. Zurich, 1990. 8 p.

KELLER, J. **Sprinkler irrigation**. Logan: Utah State University, 1984. 621 p.

KINCAID, D. C. Application rates from center pivot irrigation with current sprinkler types. **Applied Engineering in Agriculture**, Saint Joseph, v. 21, n. 4, p. 605-610, Oct./Nov. 2005.

KINCAID, D. C.; HEERMANN, D. F.; KRUSE, E. G. Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation under low-energy. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 12, n. 6, p. 790-794, 1969.

\_\_\_\_\_. Spraydrop kinetic energy from irrigation sprinklers. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 39, n. 3, p. 847-853, May/June 1996.

KINNELL, P. I. A. Rainfall energy in eastern Australia intensity-kinetic energy relationships for Canberra, A.C.T. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 25, n. 3, p. 547-582, July/Aug. 1987.

\_\_\_\_\_. Rainfall intensity-kinetic energy relationships for soil loss prediction. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 45, n. 4, p. 153-155, July/Aug. 1981.

LIMA, A. S. **Uso de inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central e seu efeito na lâmina e uniformidade de distribuição de água**. 2009. 115 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2009.

LIMA, J. M. de. **Relação entre erosão, teor de ferro, parâmetros físicos e mineralógicos de solos da região de Lavras, MG.** 1987. 86 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1987.

LIMA, L. A. et al. Sistema dinâmico de pluviometria para medir velocidade e energia cinética de gotas de chuva natural ou artificial. In: CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERÍA AGRÍCOLA, 9.; CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39., 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: UFES, 2010. 1 CD-ROM.

LIMA, W. P. **Precipitação.** Piracicaba: ESALQ, 2000. 240 p.

MARCHETTI, D. **Irrigação por pivô central.** Brasília: EMBRAPA, 1983. 23 p. (Circular Técnica, 1).

MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; CARRIÓN, P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropuviometer. **Irrigation Science**, New York, v. 22, n. 2, p. 46-56, Apr./July 2003.

NUÑES, J. E. V.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N. Conseqüências de diferentes sistemas de preparo do solo sobre a distribuição química e perdas de fósforo de um Argissolo. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 101-109, 2003.

OLIVEIRA, J. R. **Perdas de solo, água e nutrientes em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada.** 2007. 52 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.

PRUSKI, F. F. Aplicação de modelos físico-matemáticos para a conservação de água e solo. In: SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. (Ed.). **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura.** Brasília: MMA-SRH-ABEAS, 1997. p. 129-171.

RIBEIRO, M. S. **Desenvolvimento de emissor tipo LEPA de baixo impacto erosivo.** 2009. 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SALLES, C.; POESEN, J.; SEMPERE-TORRES, D. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 257, n. 4, p. 256-270, Feb. 2002.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 30, n. 3, p. 507-512, Sept. 1974.

SEGINER, I. Tangential velocity of sprinkler drops. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 8, n. 1, p. 90-93, 1965.

SENNINGER IRRIGATION. **Low pressure high performance products: super spray**. Disponível em: <<http://www.senninger.com/superspray.php>>. Acesso em: 20 mar. 2010.

SHULL, H.; DYLLA, A. S. Wind effects on water application. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, Michigan, v. 19, n. 3, p. 501-504, 1976.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2004. 140 p.

SILVA, P. M. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

STILLMUNKES, R. T.; JAMES, L. G. Impact energy of water droplets from irrigation sprinklers. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 25, n. 1, p. 130-133, 1982.

TOLK, J. A.; HOWELL, T. A.; EVETT, S. R. Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, n. 2, p. 137-147, Mar. 1999.

TOMAZELA, C.; MANTOVANI, E. C.; FERNANDES, A. L. T. Irrigação localizada com sistema pivô central e linear: a nova fronteira da irrigação no Brasil. **Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 60, p. 70-79, jun. 2003.

VIEIRA, E. I. **Características de chuvas produzidas por pivô central e seus efeitos sobre o solo**. 2009. 59 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

VORIES, E. D.; BERNUTH, R. D. von. Single nozzle sprinkle performance in the wind. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 29, n. 5, p. 1325-1330, July/Aug. 1986.

WAGNER, C. S.; MASSAMBANI, O. Análise da relação intensidade de chuva-energia cinética de Wischmeier & Smith e sua aplicabilidade à região de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 197-203, set./dez. 1988.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58 p.

\_\_\_\_\_. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, v. 39, n. 2, p. 285-291, Apr./June 1958.

ZOCOLER, J. L. et al. Uniformidade de distribuição de água versus custos do sistema de aspersão convencional. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 6, n. 2, p. 39-48, 1995.