

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DO ASPERSOR SUPER 10
E SUA INFLUÊNCIA NA ENERGIA CINÉTICA E NA
EROSIVIDADE**

Paulo Eduardo Silva Martins

Engenheiro Ambiental

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

2014

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DO ASPERSOR SUPER 10
E SUA INFLUÊNCIA NA ENERGIA CINÉTICA E NA
EROSIVIDADE**

Paulo Eduardo Silva Martins

Orientador: Prof. Dr. José Renato Zanini

Coorientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo)

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Agosto de 2014

M386c Martins, Paulo Eduardo Silva
Caracterização hidráulica do aspersor Super 10 e sua influência na energia cinética e na erosividade / Paulo Eduardo Silva Martins. – Jaboticabal, 2014
xi, 76 p. : il.; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2014
Orientador: José Renato Zanini
Coorientador: Marcílio Vieira Martins Filho
Banca examinadora: Alexandre Barcellos Dalri, Gener Tadeu Pereira, Luís Cesar Dias Drumond, José Euclides Stipp Paterniani
Bibliografia

1. Uniformidade de irrigação. 2. Perfil de distribuição de água. 3. Performance hidráulica. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.674.5

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE JABOTICABAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DO ASPERSOR SUPER 10 E SUA
INFLUÊNCIA NA ENERGIA CINÉTICA E NA EROSIVIDADE

AUTOR: PAULO EDUARDO SILVA MARTINS

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE RENATO ZANINI

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA
(CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSE RENATO ZANINI

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. GENEZ TADEU PEREIRA

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. JOSE EUCLIDES STIPP PATERNIANI

Universidade Estadual de Campinas / Campinas/SP


Prof. Dr. LUÍS CESAR DIAS DRUMOND

Universidade Federal de Viçosa / Rio Paranaíba/MG

Data da realização: 18 de julho de 2014.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

PAULO EDUARDO SILVA MARTINS – Nascido em 10 de novembro de 1983 na cidade de Salvador – BA. Filho de Eva Silva Martins e Paulo Ricardo Saquete Martins. Possui Graduação em Engenharia Ambiental (2008 – Universidade Tiradentes), em que foi bolsista de Iniciação Científica pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e bolsista como Monitor da disciplina Química Ambiental Experimental e Teórica. Tem especialização em Gestão e Manejo Ambiental na Agroindústria (2010 – Universidade Federal de Lavras) e Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo – 2011 – Universidade Estadual Paulista), onde foi bolsista da CAPES. Ingressou no curso de Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) em março de 2012, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Universidade Estadual Paulista – Câmpus de Jaboticabal – SP, desenvolvendo pesquisa na área de irrigação e conservação do solo e da água.

A DEUS
À minha esposa Penélope
Aos meus pais Paulo e Eva
Ao meu irmão Paulinho, minha cunhada Dani e minhas sobrinhas

OFEREÇO

Ao meu irmão Eduardo (in memoriam)

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Jaboticabal;

Ao meu orientador, Prof. José Renato Zanini por toda confiança depositada, por todos os valiosos ensinamentos e apoio dado nesses anos de parceria na pós-graduação.

Ao meu coorientador, Prof. Marcílio Vieira Martins Filho por toda contribuição e pela oportunidade de ter aprendido tanto em suas excepcionais disciplinas.

Aos meus pais, por me apoiarem e acreditarem em mim todos os dias. Por todo o investimento e compreensão, por todo amor e por participarem ativamente de todos esses anos dedicados à pós-graduação. Essa conquista é nossa. Eu sei que vocês deram duro para viabilizar isso acontecer.

Agradeço a Teozinho, Lolinha, Mia e Antonieta pelo mais puro sentimento de amizade e companheirismo.

À minha família de Patos de Minas (Seu Moa, Dona Marta, Vinícius, Maurício, Yago, Bobby e Bruna) por me abrigarem em sua família e em seu coração e por terem me apoiado todos os dias. Jamais esquecerei de vocês.

Ao meu grande amigo e parceiro Elcides Rodrigues por ter contribuído tanto com este trabalho.

Aos meus orientados (Neto, Vinícius, João Felipe e Anderson) por todo esforço e trabalho durante a realização dos experimentos.

Aos meus amigos de república e do Máquina (Juan, Mano, Feipa, Rosca, Lucão, Beybe, Magrilo, Parazinho, Ibiapina, Ronny, Sorrisão, Elder...e todos os outros) que de diversas formas contribuíram para que esses anos fossem muito especiais.

Ao meu grande amigo Olegário que tanto me ensinou durante esses anos.

Ao Centro Universitário de Patos de Minas por ter me dado totais condições de realizar este trabalho.

Ao meu grande irmão e amigo Eduardo (*in memoriam*) que mostrou a todos nós diversos valores que levaremos em nossos corações eternamente. Saudades.

AGRADECIMENTO ESPECIAL

Meu mais profundo agradecimento vai para a minha amada esposa Penélope, que esteve ao meu lado me incentivando e acreditando no resultado deste trabalho. Hoje me sinto realizado por formar uma família com você (e Teozinho, Lolinha, Mia e Antonieta) e feliz por saber que estarei ao seu lado por toda a minha vida, pois sei que para tudo que a vida me enviar, você vai estar lá, compartilhando. Você é o meu amor e eu sou realmente feliz por ter você na minha vida.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	ii
SUMMARY	iii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Importância da irrigação	2
2.2 Impactos ambientais relacionados à agricultura irrigada	3
2.3 Caracterização de equipamentos de irrigação	5
2.3.1 Uniformidade de distribuição de água	5
2.3.2 Uniformidade de fabricação	8
2.3.3 Diâmetro de gotas e energia cinética	10
2.3.4 Predição das perdas de solo	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Características locais	14
3.2 Características técnicas do aspersor Super 10	14
3.3 Características técnicas da motobomba	16
3.4 Coletores	16
3.5 Procedimentos experimentais para caracterização hidráulica	16
3.6 Método de amostragem das características hidráulicas	18
3.7 Determinação da vazão e do coeficiente de variação de fabricação (CVF)	18
3.8 Curva característica vazão-pressão	19
3.9 Uniformidade de aplicação de água	19
3.10 Intensidade média de aplicação de água	19
3.11 Determinação da distribuição e da caracterização do diâmetro de gotas	20
3.12 Determinação da energia cinética das gotas aspergidas pelo aspersor Super 10	21
3.13 Simulação da erosividade em função da operação do aspersor Super 10	22
3.14 Determinação anual da perda de solo em função de diferentes cenários	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 Determinação da vazão e do coeficiente de variação de fabricação (CVF)	26
4.2 Perfil radial e uniformidade de distribuição de água	29
4.3 Intensidade de precipitação de água	36
4.4 Distribuição do diâmetro médio de gotas	39
4.5 Determinação da energia cinética e velocidade terminal das gotas aspergidas	49
4.6 Fluxo de energia cinética das gotas aspergidas pelo aspersor Super 10	52
4.7 Simulação da erosividade e aplicação na Equação Universal de Perda de Solo	56
5. CONCLUSÕES	63
6. REFERÊNCIAS	64

CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DO ASPERSOR SUPER 10 E SUA INFLUÊNCIA NA ENERGIA CINÉTICA E NA EROSIVIDADE

RESUMO: O trabalho teve como objetivo avaliar o efeito dos parâmetros de operação do aspersor Super 10, fabricado pela empresa NaanDanJain, com bocais verde, amarelo e azul, sobre a caracterização hidráulica, a distribuição do tamanho das gotas e da energia cinética gerada por unidade de volume aspergido, visando gerar cenários distintos, agregados aos fatores que definem a erosão, através da Equação Universal de Perda de Solo, para que estas informações possam contribuir para o melhor dimensionamento de sistemas e manejo de áreas irrigadas. Para a determinação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen e do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição utilizou-se o método radial, e com o auxílio do aplicativo computacional CATCH 3D calculou-se a sobreposição das lâminas de água com dez espaçamentos. A determinação do diâmetro de gotas foi realizada conforme metodologia proposta por Oliveira (1991). Os resultados obtidos demonstram que o mecanismo utilizado para o fracionamento do jato de água do aspersor Super 10 se mostrou eficiente pois apresentou boa uniformidade de distribuição de água e baixa amplitude de precipitação, além de alta homogeneidade no espectro de gotas. Na criação dos cenários de perda de solo, o aspersor Super 10 apresentou perdas anuais simuladas acima dos limites de tolerância em solos com alta erodibilidade e relevo declivoso, nos menores espaçamentos estudados.

Palavras-chave: erosividade de irrigação, perdas de solo, perfil de distribuição de água, performance hidráulica, uniformidade da irrigação.

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF SUPER 10 SPRINKLER AND ITS INFLUENCE ON THE KINETIC ENERGY AND EROSIVITY

SUMMARY: The study aimed to evaluate the effect of operating parameters of the sprinkler Super 10, manufactured by NaanDanJain, with green, yellow and blue nozzles on the hydraulic characterization, size distribution of the droplets and the kinetic energy generated per unit volume sprinkled, in order to generate different scenarios aggregated to the factors that define erosion through Soil Loss Universal Equation, so that this information can contribute to a better dimensioning of systems and management of irrigated areas. For the determination of Christiansen Uniformity Coefficient and Uniformity Distribution Coefficient the radial method was used and with the aid of computer application CATCH 3D the overlapping of water slides with ten spacings was calculated. The determination of droplet diameter was performed according to the methodology proposed by Oliveira (1991). The results demonstrate that the mechanism used for the fractionation of the water jet of sprinkler Super 10 is efficient because it presented good uniformity of water distribution and low amplitude of precipitation in addition to high homogeneity in droplet spectrum. Regarding the creation of scenarios of soil loss, the sprinkler Super 10 showed simulated annual losses above tolerated limits in soils with high erodibility and sloping relief for the narrowest spacings studied.

Keywords: hydraulic performance, irrigation erosivity, soil losses, uniformity of irrigation, water distribution profile.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação por aspersão é um método importante que distribui através do ar discretas gotas de água, similar à chuva, e representa uma técnica que permite o desenvolvimento e manutenção da produção em períodos de stress hídrico. O universo dos dispositivos utilizados para aspersão tem crescido nas últimas décadas, com a utilização de aspersores de impacto de bocais simples ou duplos, com diversos diâmetros e braços defletores, que modificam o tamanho de gotas e o padrão de distribuição de água.

Entretanto, a crescente utilização da água para fins de irrigação tem despertado a preocupação da opinião pública e das lideranças políticas, devido aos impactos causados ao ambiente pela má utilização das águas pelos irrigantes (MARTINS et al., 2012). A elevação dos índices de produtividade e a maior rentabilidade dos sistemas agrícolas passam invariavelmente pelo manejo conservacionista dos recursos hídricos e edáficos, tendo em vista que solo e água são os componentes essenciais para a sustentação da produção de alimentos para a população mundial (MARTINS et al., 2010).

Diante disto, a agricultura irrigada, maior usuário de água do Mundo, tem sofrido pressões sociais e econômicas para que se reduza principalmente o consumo de água. Com isto, a melhoria no uso dos recursos tem se tornado um desafio para os irrigantes, que por necessitarem priorizar a aplicação de água de maneira mais precisa, necessitam ter conhecimento sobre as principais características dos equipamentos a ser utilizados, visando prepará-los para o melhor uso nas condições de campo (MARTINS, 2011; MARTINS; SILVA; ZANINI, 2012).

No que se diz respeito aos solos, a energia cinética contida nas gotas de água, afeta os processos de infiltração e de erosão os quais estão diretamente relacionados com o diâmetro e a velocidade terminal destas e o choque em sua superfície. É válido ainda ressaltar que as atuais tecnologias da irrigação por aspersão não permitem o controle direto sobre o tamanho das gotas, por isso torna-se importante conhecer as características técnicas dos diversos tipos de equipamentos, a fim de se fazer escolhas

inteligentes e adequadas ao uso proposto (KINCAID; SOLOMON; OLIPHANT, 1996). De maneira geral, a degradação do solo ocasionada a partir da irrigação, embora reconhecida como um problema, ainda carece de estudos que avaliem os fatores gerais de forma integrada.

Portanto, devido ao atual panorama ambiental relacionado ao consumo de água e os processos erosivos, e possuindo o aspersor NaanDanJain Super 10 um diferencial de distribuição de água, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito dos parâmetros de operação deste aspersor com bocais verde, amarelo e azul, sobre a caracterização hidráulica, a distribuição do tamanho das gotas e da energia cinética gerada por unidade de volume aspergido, visando gerar cenários distintos, agregados aos fatores que definem a erosão, através da Equação Universal de Perda de Solo, para que estas informações possam contribuir para o melhor dimensionamento de sistemas e manejo de áreas irrigadas com o aspersor citado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da irrigação

Em 2000, as captações de água para atendimento aos principais usos consuntivos correspondiam ao abastecimento humano domiciliar (350 km³ e 9,5% em volume), produção industrial (750 km³ e 20,3% em volume) e produção de alimentos (2.595 km³ e 70,2% em volume), totalizando 3.695 km³ anuais de água derivada dos mananciais (CHRISTOFIDIS, 2008).

Ainda segundo Christofidis (2006), em relação à área plantada, cerca de 1,54 bilhões de hectares de solos são utilizados para a produção agrícola, dos quais cerca de 277 milhões (18%) estão sob a técnica da irrigação, correspondendo a aproximadamente 44% da produção mundial de alimentos.

De acordo com Paulino et al. (2011), analisando o censo agropecuário, o Brasil teve um aumento na área irrigada de 1,3 milhões de hectares no período 1996-2006 (+42%), sendo que a irrigação por aspersão (convencional, pivô central e autopropelido) representa 1.572.960 hectares, aproximadamente 35% da área total irrigada no Brasil.

A grande aceitação desse método de irrigação deve-se principalmente à facilidade operacional dos diferentes sistemas por aspersão (PRADO et al., 2012), à facilidade de adaptação a qualquer tipo de topografia e a possibilidade de controle adequado da pluviometria em uma zona de aplicação (BAUTISTA-CAPETILLO; PLAYAN, 2008) e a ampla aplicabilidade em pequenas e médias propriedades (DA SILVA MARTINS et al., 2011).

As expectativas mundiais apontam para a necessidade crescente de produção de alimentos, com projeção de duplicação dessa demanda até o ano de 2025, no âmbito internacional. Isso implica a possível ampliação da área agrícola e/ou o aumento da sua eficiência de produção, demandando maior consumo e uso eficiente da água (MINISTERIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2011) evidenciando a necessidade dos irrigantes utilizarem este recurso, que tem reservas cada vez mais escassas, de forma mais eficiente possível.

Portanto, considerando o grande consumo de água para irrigação e a importância da preservação desse insumo, é necessário uma série de medidas quanto ao seu uso racional. Segundo Dechmi et al. (2010) e Silva, Martins e Zanini (2012) um adequado suprimento de água é fundamental para alcançar rendimentos aceitáveis nas culturas e minimizar o impacto da agricultura irrigada. Para tanto, é necessário a obtenção do conhecimento técnico, tanto quanto as características físico-hídricas do solo, o clima, a cultura e os princípios de funcionamento dos equipamentos de irrigação, tornando-se primordial para a melhoria da eficiência dos sistemas empregados sem causar danos ambientais (FOLEGATTI, 1996).

2.2 Impactos ambientais relacionados à agricultura irrigada

De acordo com Bernardi (2003), a disponibilidade hídrica tem estreita relação com a segurança alimentar, o estilo de vida das pessoas, o crescimento industrial e agrícola e ainda com a sustentabilidade do meio. Porém, segundo Maia Neto (1997), se mantidas as taxas de consumo e considerando que a população mundial cresce em razão geométrica a 1,6% a.a., o esgotamento potencial dos recursos hídricos fica estimado por volta do ano 2053. Por isso, visando à manutenção da disponibilidade

hídrica, é necessário considerar os impactos ambientais que podem ser ocasionados pela irrigação. Isso acontece porque, sendo a irrigação uma maneira artificial de aplicar água ao solo para suprir a demanda evapotranspirométrica das culturas, essa representa uma introdução tecnológica modificadora do meio ambiente (BERNARDO, 1995).

Bernardo (1995) afirma ainda, que apesar dos benefícios iniciais da irrigação, quantidades grandes de áreas têm se tornado impróprias a agricultura, devido aos impactos ambientais adversos ao solo, à disponibilidade e qualidade da água, à saúde pública, à fauna e flora e, em alguns casos, às condições sócio-econômicas da população local.

Para Lucas (2007) o impacto ambiental do desenvolvimento da irrigação pode ocorrer fora ou dentro da propriedade agrícola. Fora da propriedade com a construção de barragens que modificam a dinâmica do recurso hídrico, bem como pela dispersão de concentrações elevadas de sais. Dentro da propriedade, o efeito pode ocorrer na forma de escoamento superficial, percolação profunda, salinização e encharcamento do solo de acordo com o método de irrigação utilizado.

Já para Bernardo (1995), os cinco principais tipos de impactos ambientais inerentes a prática da irrigação são: (i) modificação do meio ambiente; (ii) contaminação dos recursos hídricos (rios e águas subterrâneas); (iii) consumo exagerado da disponibilidade hídrica da região; (iv) consumo elevado de energia; e (v) problemas de saúde pública. Souza et al. (2005) complementam citando o assoreamento e a poluição de áreas baixas, rios e reservatórios, podendo mesmo, até caracterizar a degradação de grandes extensões de terra.

Pode-se destacar ainda sobre impactos ambientais decorrentes da irrigação, a degradação do solo, cuja baixa eficiência e uniformidade dos sistemas de irrigação estão entre os principais fatores causadores. A distribuição errônea de água leva a um volume excessivo aplicado em algumas áreas, que não consegue se infiltrar no solo e escoar superficialmente erodindo-o (FRÓES; KARAM 2007). Assim, a degradação dos solos pode ser considerada um dos mais importantes problemas ambientais, resultantes de práticas inadequadas de manejo agrícola (SILVA et al., 2008).

Ainda em relação aos impactos da agricultura irrigada na degradação dos solos, Alves Sobrinho, Ferreira e Prusky (2002) complementam correlacionando o impacto das gotas ao salpicamento de partículas que podem causar selamento superficial do solo, reduzindo a infiltração e intensificando o processo erosivo.

2.3 Caracterização de equipamentos de irrigação

2.3.1 Uniformidade de distribuição de água

A uniformidade de distribuição de água é um importante conceito amplamente utilizado para caracterizar e avaliar o desempenho de projetos de irrigação. Este conceito influencia o custo da irrigação e o desempenho das culturas (SANTOS et al., 2003b) e está relacionado com a eficiência do uso da água na irrigação.

Devido ao alto consumo de água da agricultura ligado a cultivos em grandes extensões e às exigências hídricas das diversas culturas, fazem-se necessários sistemas de irrigação bem dimensionados, que apresentem índices adequados de uniformidade de aplicação de água, aliados a um manejo correto da irrigação, propiciando assim a maximização da produtividade e redução das perdas de água (PRADO; COLOMBO, 2011; OLIVEIRA et al., 2012).

Na irrigação por aspersão, a uniformidade de distribuição de água se refere à igualdade de distribuição da altura de precipitação lançada pelos aspersores sobre a área irrigada. Sistemas com baixa uniformidade apresentam zonas com lâminas distintas de água, acarretando em prejuízos para o desenvolvimento da cultura, encharcamentos, erosão do solo, percolação e lavagem de nutrientes (PEREIRA, 2000).

De maneira geral, nenhum sistema de irrigação aplica água totalmente uniforme. E para expressar a variabilidade com que as lâminas são aplicadas na superfície do solo para distribuição de água, diversos são os padrões e coeficientes utilizados na literatura, entre eles, encontram-se com os de maior destaque os coeficientes propostos por Christiansen (1942), conhecido como Coeficiente de Uniformidade de Christiansen

(CUC) e Criddle et al. (1956), conhecido como Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD).

O CUC adota o desvio médio absoluto como medida de dispersão e é expresso pela Equação 1 a seguir:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n\bar{X}} \right) \quad (1)$$

em que:

CUC – coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);

X_i – lâmina de água coletada, no i-ésimo coletor (mm);

$\bar{X}$ – lâmina média de água coletada (mm); e

n – número de observações.

O CUD considera a razão entre a média do menor quartil (quartil que menos recebe água) e a média da precipitação e é expresso pela Equação 2:

$$CUD = 100 \left(\frac{X_n}{\bar{X}} \right) \quad (2)$$

em que:

CUD – coeficiente de uniformidade de distribuição (%);

X_n – média das menores lâminas, representando 25% do total das lâminas avaliadas (mm); e

$\bar{X}$ – lâmina média de água coletada (mm).

Mantovani (2001) propôs uma interpretação dos valores de CUC e CUD, conforme Tabela 1:

Tabela 1. Proposta de classificação dos valores de CUC e CUD para sistemas de aspersão

Classificação	CUC (%)	CUD (%)
Excelente	> 90	> 84
Bom	> 80 – 90	> 68 – 84
Razoável	> 70 – 80	> 52 – 68
Ruim	60 – 70	36 – 52
Inaceitável	< 60	< 36

Fonte: Mantovani (2001)

Para Martin-Benito, Gomez e Pardo (1992), baixos valores de coeficiente de uniformidade geralmente são indicativos da má combinação entre pressão de operação, espaçamento de aspersores, número e tamanho de bocais.

Para facilitar o processo de análise da uniformidade de distribuição de água em diferentes condições operacionais, o uso de simulações computacionais torna-se uma ferramenta útil, precisa e segura em relação aos resultados obtidos (PRADO; COLOMBO, 2013), pois a realização de ensaios no campo torna-se uma tarefa demorada e que dificulta a realização das avaliações em todas as condições operacionais e ambientais que se deseja (CARRIÓN et al., 2001; OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009; FARIA et al., 2009; 2012; PRADO; COLOMBO, 2009; 2013).

Sendo assim, o uso de aplicativos computacionais que determinam a uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação, baseados em dados de precipitação obtidos a partir de ensaios com o equipamento testado, estão sendo cada vez mais utilizados (CARRIÓN et al., 2001). Segundo Conceição (2002), as simulações por meio de modelos matemáticos possibilitam maior rapidez e combinações mais diversificadas nas análises pretendidas.

Para a realização dos ensaios com aspersores rotativos, para calibração dos aplicativos computacionais, a ABNT (1999b) sugere duas metodologias: método da malha, com o espalhamento de coletores da precipitação ao redor do aspersor, igualmente espaçados formando uma malha; e o método radial, onde os coletores encontram-se distribuídos ao longo de uma linha radial ao aspersor. Villas-Boas (1994) comparando o método de amostragem radial e o método da malha verificou que ambos são estatisticamente iguais, tanto em campo quanto na ausência de vento.

2.3.2 Uniformidade de fabricação

Segundo Andrade (2009), independentemente do processo produtivo, emissores de um mesmo fabricante de uma maneira geral apresentam pequenas diferenças construtivas cujas consequências são refletidas nas vazões destes. Com isso, para a obtenção de informações referentes ao equipamento em relação ao emissor e ao seu regime de fluxo tem-se o coeficiente de variação de fabricação (CVF) e a equação característica de vazão-pressão (PIZARRO, 1996). A interpretação física dada ao CVF foi atribuída à Solomon (1979) ao estudar as variações da fabricação de vários emissores, relacionando o desvio-padrão da vazão dos emissores com a vazão média da amostra, operando com pressão constante, conforme Equação 3.

$$CVF = 100 \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_m)^2}{n-1}}}{q_m} \quad (3)$$

em que:

CVF – coeficiente de variação de fabricação (%);

$q_1, q_2, \dots, q_n$ – vazão de cada emissor ($L \cdot h^{-1}$);

q_m – vazão média dos emissores ($L \cdot h^{-1}$); e

n – número de emissores do lote de amostragem.

Segundo Keller e Karmeli (1974), a equação característica que representa o comportamento vazão-pressão de um equipamento pode ser descrita conforme a Equação 4:

$$Q = K H^n \quad (4)$$

em que:

Q – vazão (m³ h⁻¹);

H – pressão (m c.a.); e

K e n – parâmetros de ajuste.

Os valores do expoente “n” variam de 0 a 0,5 que caracterizam o regime como turbulento a plenamente turbulento e a vazão sofrendo menos influência da variação da pressão quanto mais próximo de 0 for o expoente “n”; e de 0,5 a 1, quando o regime de escoamento varia de instável a laminar e a variações de pressão exercem maior influencia sobre a vazão (KELLER; KARMELI, 1975).

Existem diversas classificações para emissores em relação ao CVF, porém a mais restritiva é definida por Solomon (1979) para gotejamento (Tabela 2).

Tabela 2. Classificação do coeficiente de variação de fabricação (CVF) segundo proposta de Solomon (1979)

CVF (%)	Classificação
Até 3	Excelente
4 a 7	Médio
8 a 10	Marginal
11 a 14	Pobre
Acima de 15	Ruim

Para Solomon (1979), o CVF é o melhor parâmetro que representa as diferenças entre mesmos equipamentos, influencia diretamente a uniformidade de distribuição de água e apresenta sólida representação do projeto do emissor e dos cuidados aplicados no processo de fabricação. De acordo com Bralts, Wu e Gitlin (1981), as diferenças

observadas de vazão são atribuídas aos processos de fabricação e tendem-se a se distribuir em torno de um valor médio.

2.3.3 Diâmetro de gotas e energia cinética

O tamanho e a distribuição de gotas de chuva natural ou simulada, ou as produzidas a partir de equipamentos de irrigação, têm sido determinados por pesquisadores empregando diversos métodos, tais como o método da mancha (SEGINER, 1963; HALL, 1970), método do óleo (EIGEL; MOORE, 1983), método a laser (KINCAID; SOLOMON; OLIPHANT, 1996; KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2013), método fotográfico (SALVADOR et al., 2009; KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2010; KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2013) e o método da farinha (KOHL; DEBOER, 1984; OLIVEIRA, 1991).

O método da farinha é um dos mais empregados para se determinar a distribuição dos diâmetros de gotas em sistemas de irrigação por aspersão, devido a sua simplicidade e baixo custo (CONCEIÇÃO, 2002). Este método consiste em capturar as gotas da precipitação a partir de bandejas contendo farinha de trigo peneirada e não-compactada. As diferentes gotas capturadas em contato com a farinha produzem grânulos, que posteriormente são secos ao ar, separados por peneiramento em diferentes malhas e secos em estufa para a obtenção do peso médio dos grânulos (OLIVEIRA, 1991; EIGEL; MOORE, 1983).

A determinação do diâmetro de cada gota é realizada utilizando uma expressão matemática que relaciona a massa média dos grânulos e o diâmetro da gota, e é obtida a partir de calibração prévia. Porém, conforme cita Conceição (2002), diversos autores relatam que os valores obtidos na calibração da relação diâmetro de gota e massa dos grânulos são muito próximos, demonstrando que qualquer uma das relações apresentadas por Carter et al. (1974), Kohl (1974), Hills e Gu (1989) e Oliveira (1991) permite a obtenção do diâmetro de gotas em relação à massa dos grânulos.

Em relação aos efeitos dos distintos diâmetros de gotas, diversos trabalhos na literatura (RAGAB, 1983; ADEOYE, 1986; SUN et al., 2008) têm apontado que as quedas de gotas provenientes da irrigação por aspersão quebram os agregados e

compactam finas camadas superficiais, e em alta intensidade influenciam camadas até mais profundas, além de modificar propriedades na estrutura do solo (BERTRAND; SOR, 1962). Segundo resultados obtidos por Sun et al. (2008), a percentagem de poros na estrutura do solo diminui com o aumento da intensidade e do volume aplicado de água e com o aumento do diâmetro das gotas.

A distribuição do tamanho de gotas, associada à sua velocidade terminal tem grande influência sobre o desempenho do aspersor em relação à energia cinética transferida para a superfície do solo. A energia cinética é dependente da massa e da velocidade da gota, e esta é dependente do diâmetro da gota (KING; KINCAID, 1997).

A energia cinética das gotas que são emitidas por um aspersor pode modificar as características do solo, com a desintegração física dos agregados de superfície e sua compactação pelo impacto das gotas, repercutindo negativamente nos processos de escoamento, infiltração e erosão (KINCAID; SOLOMON; OLIPHANT, 1996; MAMEDOV; LEVY; MIKAILSOY, 2012). Com isso, a caracterização das gotas emitidas por um sistema de aspersão permite a avaliação da energia cinética com que as gotas impactam a superfície do solo (BAUTISTA-CAPETILLO; ZAVALA; PLAYAN, 2012) já que esta pode induzir à vedação da superfície do solo, reduzir a taxa de infiltração, aumentando o risco de erosão (KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2010).

Em análises da energia cinética em aspersão, a velocidade terminal das gotas é estimada utilizando modelos (KINCAID, 1996) e a distribuição dos diâmetros de gotas são os dados primários utilizados no modelo. Como consequência, a estimativa da distribuição de gotas torna-se muito valiosa para refletir a magnitude adequada da energia cinética das gotas (BAUTISTA-CAPETILLO; ZAVALA; PLAYAN, 2012). Corretas caracterizações dessas variáveis são requisitos para estimar as performances resultantes de diferentes equipamentos ou condições de operações (SALVADOR et al., 2009).

2.3.4 Predição das perdas de solo

O conceito de erosão do solo está ligado aos processos de desgaste da superfície de um terreno com a retirada, transporte e a deposição de materiais (de

origem mineral ou orgânica) em áreas mais baixas topograficamente, resultantes de forças exógenas (MIGUEL, 2010). A erosão do solo é um processo natural de desenvolvimento da paisagem (CUNHA, 1997) e é considerado um dos principais problemas ambientais da atualidade, pois quando esse processo de remoção de material ocorre de forma acelerada, pode estar associado a determinadas práticas ou atividades antrópicas.

De maneira geral, este processo é avaliado através da energia cinética da gota ao tocar o solo e esta transmite informações sobre os efeitos agrônômicos (perdas de solo devido à erosão e redução da taxa de infiltração) resultante do processo de irrigação de uma determinada área.

Segundo Alvares e Pimenta (1998), os principais fatores que influenciam os processos erosivos são: a erosividade, determinada pela intensidade e a energia cinética das gotas; a erodibilidade, definida pelas características do solo e a suscetibilidade do solo à erosão; a cobertura vegetal, devido à função na proteção do solo; o comprimento de encostas e declives e as práticas de conservação e manejo do solo.

De acordo com Souza et al. (2005), dentre os fatores naturais que projetam a erosão do solo, o relevo condiciona preferenciais fluxos de água que definem o mecanismo erosivo-deposicional preponderante, transportando e depositando constituintes, ocasionando variabilidade em seus atributos. A erodibilidade do solo e os outros fatores que ocasionam a erosão apresentam grande variedade espacial e temporal, explicada a partir da diversidade climática (BERTOL et al., 2002). Nesse sentido, existem diversos modelos aplicados para a predição da erosão, destacando-se a tradicional Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), a qual estima as perdas anuais de solo com boa acurácia nas condições brasileiras (SILVA et al., 2008).

A EUPS é um modelo amplamente difundido para a estimativa de perda de solo, que expressa a perda de solo por unidade de área, originalmente apresentada por Wischmeier e Smith (1978) e descrita conforme a Equação 5 a seguir:

$$A = R K L S C P \quad (5)$$

em que:

A – perda de solo ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$);
 R – erosividade da chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$);
 K – erodibilidade ($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$);
 LS – fator topográfico;
 C – fator de cobertura e manejo;
 P – fator de práticas de controle da erosão.

Segundo FAO (1980), a classificação do grau de erosão hídrica pode ser descrita conforme Tabela 3 a seguir:

Tabela 3. Grau de classificação da erosão hídrica

Perda de solo ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$)	Grau da erosão
< 10	Nenhuma ou ligeira
10 – 50	Moderada
50 a 200	Alta
> 200	Muito Alta

Fonte: FAO (1980)

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para o atendimento dos objetivos, o presente trabalho foi realizado em quatro etapas distintas:

- Caracterização hidráulica do aspersor;
- Caracterização do diâmetro de gotas aspergidas;
- Cálculo da erosividade em diferentes condições de operação do aspersor;
- Montagem de cenários de perdas de solo, através da Equação Universal de Perda de Solo, sob diferentes condições de operação do aspersor, utilizando uma área com características conhecidas.

3.1 Características locais

O presente trabalho foi conduzido em área asfaltada, aproximadamente plana, com diversas construções ao redor, formando um quebra-vento, situada na área externa ao Laboratório de Hidráulica do Centro Universitário de Patos de Minas, no município de Patos de Minas, MG, a 18°34'44" de latitude sul, 46°31'04" de longitude oeste e altitude média de 815 m. O clima predominante na região é classificado como Cwa (subtropical com inverno relativamente seco), conforme a classificação climática de Köppen.

3.2 Características técnicas do aspersor Super 10

O trabalho foi desenvolvido com aspersor de plástico poliacetal, rotativo, com os bocais verde, amarelo e azul, ângulo de jato de 25°, fabricado pela empresa NaanDanJain, modelo Super 10. O aspersor possui mecanismo de círculo completo (360°) através de uma esfera interna e em movimento junto ao corpo do aspersor, diferente dos aspersores convencionais que possuem braço defletor auxiliar na rotação e no fracionamento do jato.

O fracionamento do jato é realizado através do efeito combinado entre o movimento de rotação e a presença de dois orifícios no bocal do aspersor: um orifício circular posicionado no centro do bocal, que asperge água às distâncias mais longas, ao longo do raio de molhamento do aspersor; e outro orifício, não-circular, logo abaixo do orifício circular, de forma geométrica retangular para o bocal verde, e composto por dois retângulos para os bocais amarelo e azul, que asperge água nas distâncias mais próximas ao equipamento (Figura 1).



Figura 1. Modelos do aspersor NaanDanJain Super 10 de bocais azul, verde e amarelo

De acordo com as informações disponíveis no catálogo do fabricante (Tabela 4), para o bocal verde as vazões variam de $0,550 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $0,695 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ operando entre as pressões de 25 a 40 m c. a. e diâmetro de molhamento de 20 m; para o bocal azul as vazões variam de $0,360 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $0,455 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com diâmetro de molhamento de até 18 m; e para o bocal amarelo, variam de $0,45 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $0,57 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com diâmetro de molhamento de 20 m. Os testes foram realizados de acordo com as pressões e as condições mencionadas no catálogo do fabricante (25, 30, 35 e 40 m c.a.).

Tabela 4. Vazões (Q) e diâmetros de molhamento (D) do aspersor NaanDanJain Super-10 para os bocais verde, amarelo e azul em diferentes pressões de serviço (P) e instalados a 0,6 m de altura

Cor do Bocal	P (m c.a.)	Q (m ³ h ⁻¹)	D (m)
Verde	25	0,550	20
	30	0,600	20
	35	0,650	20
	40	0,695	20
Amarelo	25	0,450	20
	30	0,495	20
	35	0,530	20
	40	0,570	20
Azul	25	0,360	18
	30	0,395	17,5
	35	0,425	17
	40	0,455	17

Fonte: Adaptado de NaanDanJain (2014).

3.3 Características técnicas da motobomba

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma motobomba, modelo TMF 4-30M, 3500 rpm, vazão 10 m³ h⁻¹, altura manométrica de 41 m, fabricada pela Indústria Texius Motobombas e Pressurizadores.

3.4 Coletores

Os coletores utilizados nas avaliações de uniformidade são da marca Fabrimar. Possuem forma geométrica tronco-cônica, com diâmetro de 80 mm na parte superior e altura 102 mm. O volume armazenado dentro de cada coletor foi medido com provetas graduadas de 5 a 25 mL, utilizadas em laboratório.

3.5 Procedimentos experimentais para caracterização hidráulica

Inicialmente foram realizados testes de vazão, perfil radial de distribuição, uniformidade de rotação e uniformidade de distribuição de água com o aspersor Super 10, nos bocais verde, amarelo e azul, nas pressões mencionadas no catálogo do

fabricante e em três repetições. O aspersor foi instalado a 0,65 m da superfície, encontrando-se o bocal de saída de água do aspersor a uma distância vertical aproximada de 0,60 m dos coletores, conforme mencionado no catálogo do fabricante (Tabela 4) e recomendada pela ABNT (1999b) que especifica que a distância entre o bocal do aspersor e a borda superior dos coletores mais próximos deve ter altura mínima superior a dez vezes o diâmetro do tubo de subida e não deve ser inferior a 0,5 m.

O controle da pressão de operação em cada teste foi realizado utilizando dois manômetros de Bourdon, acoplados um na base do aspersor e outro na saída da bomba, previamente calibrados em laboratório com manômetro de coluna de mercúrio. O ajuste da pressão foi realizado com registros de gaveta e de agulha, instalados na saída da bomba e na haste de subida do aspersor, respectivamente.

Os ensaios para determinação da característica técnica do aspersor foram realizados sob condições de vento inferiores a $2,0 \text{ m s}^{-1}$, conforme especificação da ABNT (1999a).

O volume armazenado dentro de cada coletor foi medido com provetas graduadas de 5 e 25 mL. Para o cálculo da lâmina de aplicação de água foi utilizada a Equação 6 (ABNT, 1999a):

$$H = \frac{V}{1000 A t} \quad (6)$$

em que:

H – lâmina de aplicação de água (mm h^{-1});

V – volume coletado em cada coletor (mL);

A – área da borda superior do coletor (m^2); e

t – duração do ensaio (horas).

O tempo de cada teste foi de 60 minutos, com o controle do tempo sendo realizado com cronômetro de precisão.

3.6 Método de amostragem das características hidráulicas

Para a determinação do CUC e CUD, utilizou-se o método radial (Figura 2) (ABNT, 1999b), fazendo-se um espalhamento dos coletores igualmente espaçados, formando uma linha radial a partir da base do aspersor, espaçados a cada 0,5 m em uma superfície pavimentada. Para obter valores de precipitação correspondentes a aproximadamente 0 m de distância do aspersor, foram colocados também quatro coletores dispostos a 0,05 m do tubo de elevação do aspersor, formando um quadrado em volta do aspersor (Figura 2). As posições dos coletores foram topograficamente marcadas com tinta na superfície asfaltada, anteriormente ao início do experimento.

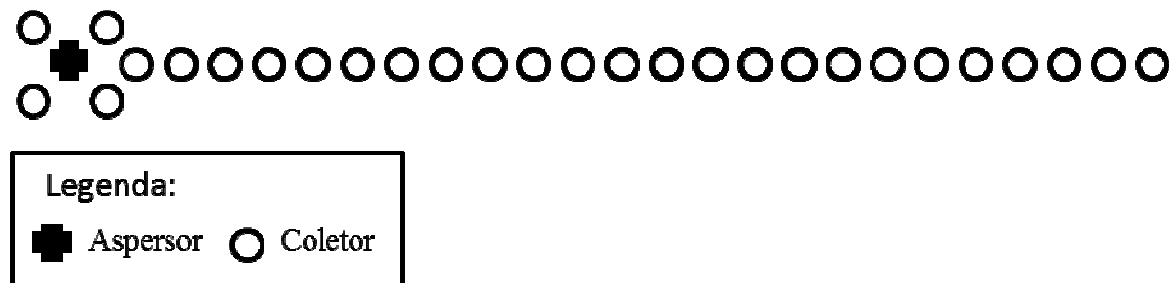


Figura 2. Esquema de distribuição dos coletores no método da radial

3.7 Determinação da vazão e do coeficiente de variação de fabricação (CVF)

Para permitir a utilização de três aspersor como repetições foi determinado o coeficiente de variação de fabricação (CVF) a partir da vazão, através do teste do volume de água coletado em função do tempo e da pressão de trabalho. Para isso, inicialmente foram realizados testes com três aspersores, determinando-se as vazões nas quatro pressões avaliadas (25, 30, 35 e 40 mc.a.), possibilitando calcular o CVF com a Equação 3, permitindo comprovar a representatividade dos aspersores como repetições. Essa representatividade foi baseada na classificação de uniformidade de vazão de Solomon (1979) descrita na Tabela 2.

3.8 Curva característica vazão-pressão

Com base nas vazões médias obtidas para cada pressão de operação e nos diferentes bocais utilizados, ajustou-se a equação característica conforme Keller e Karmeli (1974) (Equação 4).

3.9 Uniformidade de aplicação de água

A metodologia utilizada para avaliação da uniformidade de distribuição de água foi baseada nos índices CUC e CUD. Foram analisados os efeitos das pressões de serviço e dos espaçamentos dos aspersores, sobre a uniformidade de distribuição de água.

A interpretação dos valores de CUC e CUD baseou-se nas proposições de Mantovani (2001), apresentadas na Tabela 1.

Foi utilizado o aplicativo computacional CATCH 3D, versão 4.45 (ALLEN, 1992), para o cálculo do CUC e do CUD em condições de sobreposição das lâminas com diferentes espaçamentos. Os resultados relativos à sobreposição e determinação do CUC e CUD de água pelo aspersor foram baseados nos dados de precipitação, sendo simulados espaçamentos (6x6, 6x9, 6x12, 8x8, 9x9, 9x10, 9x12, 10x10, 10x12 e 12x12 m x m) entre aspersores e entre linhas laterais, respectivamente.

3.10 Intensidade média de aplicação de água

A intensidade média de aplicação de água do aspersor Super 10, para as diferentes pressões e espaçamentos estudados nos diferentes bocais, foi ajustada a partir de metodologia proposta pela ABNT (1999b), conforme Equação 7:

$$I_{ma} = \frac{1000 \ q_m}{S_l \ S_m} \quad (7)$$

em que:

I_{ma} – intensidade média de aplicação de água com disposição retangular (mm h^{-1});

q_m – vazão média relativa às repetições do aspersor em cada pressão de serviço estudada ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);

S_l – espaçamento entre linhas laterais (m); e

S_m – espaçamento dos aspersores ao longo da linha lateral (m);

3.11 Determinação da distribuição e da caracterização do diâmetro de gotas

A determinação do diâmetro de gotas do aspersor Super 10 foi realizada pelo método da farinha conforme metodologia proposta por Oliveira (1991). Foram distribuídas bandejas de alumínio, de 15 cm de diâmetro, contendo farinha de trigo com espessura uniforme, desde a base do aspersor e ao longo do seu raio de alcance, espaçadas de 0,5 em 0,5 m, similar ao método radial utilizado no teste de uniformidade de distribuição de água.

A farinha de trigo utilizada ao longo das bandejas foi previamente peneirada na malha de 0,297 mm (#50) e seca em estufa por 24 h a 105 °C. O tempo de coleta realizado foi entre 2 e 3 segundos para evitar a sobreposição das gotas na bandeja, com três repetições para cada pressão de operação, nos três bocais estudados.

Após a realização dos testes, os grânulos foram secos ao ar livre durante 24 h, secos em estufas a 105 °C, também durante 24 h e posteriormente separados por peneiramento.

Foram utilizadas peneiras em malhas de 4,76 mm (#4) 2,00 mm (#10), 1,19 mm (#16), 0,84 mm (#20), 0,59 mm (#30), 0,42 mm (#40) e 0,297 mm (#50) para determinar a massa total dos grânulos formados. Foi determinada também a massa total dos grânulos retidos para cada peneira, além da massa média dos grânulos de diferentes diâmetros, por meio de alíquotas contendo 20 grânulos, extraídos de cada peneira, em balança analítica de precisão de 0,00001 g.

Os diâmetros médios das gotas foram determinados com base na massa média dos grânulos, conforme Equação 8 proposta por Oliveira (1991):

$$d = 1,257 m^{0,353} \quad (8)$$

em que:

d – diâmetro da gota (mm);

m – massa do grânulo (mg).

O volume de água por peneira foi calculado com a multiplicação do número de gotas pelo volume de cada gota relativo à peneira. O volume das gotas, considerada esférica, foi calculado pela Equação 9:

$$V_{\text{gota}} = \frac{\pi d^3}{6} \quad (9)$$

em que:

V_{gota} – volume da gota d'água (mm^3);

Foram determinados os percentuais médios do número e do volume total de gotas para os diferentes diâmetros encontrados no perfil radial obtido, para cada pressão de operação e nos três bocais testados e o diâmetro médio de gotas, através da relação entre o volume de água acumulado e o diâmetro médio retido em cada peneira.

3.12 Determinação da energia cinética das gotas aspergidas pelo aspersor Super 10

A determinação da energia cinética por gota foi realizada conforme metodologia de Kohl et al. (1985) (Equação 10).

$$E_{\text{kd}} = \frac{1}{12} \pi d^3 \rho V^2 \quad (10)$$

em que:

E_{kd} – energia cinética (J);

d – diâmetro da gota (m);

ρ – massa específica da água (kg m^{-3});

V – velocidade terminal da gota (m s^{-1}).

A energia cinética aplicada por unidade de volume foi determinada a partir da energia cinética total das gotas e o volume total de um dado conjunto de gotas de tamanho “n”, conforme Equação 11, proposta por King e Bjorneberg (2010).

$$E_{kt} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{kdi}}{1000 \sum_{i=1}^n \frac{1}{6} \pi d_i^3} \quad (11)$$

em que:

E_{kt} – energia cinética por unidade de volume ($J L^{-1}$);

E_{kd} – energia cinética (J);

d – diâmetro da gota (m);

Para a determinação da velocidade terminal das gotas foi utilizada equação proposta por Bautista-Capetillo et al. (2009) (Equação 12).

$$V = 2,28 \ln(d) + 3,25 \quad (12)$$

em que:

V – velocidade terminal da gota ($m s^{-1}$);

d – diâmetro da gota (mm).

3.13 Simulação da erosividade em função da operação do aspersor Super 10

Para a determinação da erosividade em função das características de operação do equipamento (espaçamento entre aspersores e vazão média), inicialmente foi calculado o fluxo de energia cinética por unidade de área e tempo para cada caso, conforme adaptação da equação proposta por Bautista-Capetillo, Zavala e Playan (2012) (Equação 13):

$$\bar{\delta}_p = E_{kt} R_p \quad (13)$$

em que:

$\bar{\delta}_p$ – fluxo de energia cinética por unidade de área e tempo ($J m^{-2} s^{-1}$);

E_{kt} – energia cinética por unidade de volume ($J L^{-1}$);

R_p – a taxa de precipitação do aspersor ($L m^{-2} s^{-1}$).

A taxa de precipitação do aspersor, para cada pressão de operação e nos três bocais estudados, foi obtida a partir do cálculo da intensidade de precipitação obtido Equação 7. Foram utilizados para a estimativa do fluxo de energia cinética por unidade de área e tempo os espaçamentos de 6x6, 9x9 e 12x12 m entre aspersores e linhas.

Para o cálculo da erosividade, em função das características do equipamento em questão foi utilizada a Equação 14 a seguir:

$$R_i = 36 \delta_p I_a \quad (14)$$

em que:

R_i – fator erosividade de irrigação ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

δ_p – fluxo de energia cinética por unidade de área e tempo ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

I_a – lâmina aplicada por ano (mm ano^{-1}).

O fluxo de energia cinética por unidade de área e tempo e a intensidade de precipitação do aspersor são características obtidas do equipamento em questão (Super 10), nos itens 3.12 e 3.10 respectivamente. As lâminas aplicadas por ano utilizadas na simulação foram obtidas a partir de trabalho conduzido por Alencar et al. (2009), no município de Governador Valadares (MG) entre maio de 2003 e abril de 2005, com médias de precipitação e evapotranspiração potencial de referência durante os dois anos de experimento de 1.064 e 1.277 mm respectivamente, e que observaram maior produtividade de matéria seca para as gramíneas Marandu, Pioneiro e Mombaça nas lâminas de 560 e 672 mm ano^{-1} , respectivamente. Para avaliar a erosividade e a perda de solo em condições de superdimensionamento da utilização da irrigação, foi simulada também a lâmina de 840 mm ano^{-1} (150% da lâmina de 560 mm ano^{-1})

3.14 Determinação anual da perda de solo em função de diferentes cenários

A determinação anual da perda de solo foi obtida por meio de adaptação da Equação Universal da Perda de Solos (Equação 15) (adaptada de WISCHMEIER; SMITH, 1978)

$$A = R_i \ K \ LS \ C \ P \quad (15)$$

em que:

A – taxa de perda de solo ($t \ ha^{-1} \ ano^{-1}$);

R_i – fator erosividade de irrigação ($MJ \ mm \ ha^{-1} \ h^{-1} \ ano^{-1}$);

K – fator erodibilidade do solo ($t \ h \ MJ^{-1} \ mm^{-1}$);

LS – fator topográfico (adimensional);

C – fator de cobertura (adimensional);

P – fator de práticas de controle de erosão (adimensional).

Para obtenção dos fatores K, LS, C e P para simular as perdas de solo por um possível efeito da irrigação em uma determinada área, foram utilizados individualmente os fatores obtidos por Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012) e Valle Júnior (Tabela 5) que descreveram a variabilidade espacial destes fatores da erosão.

Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012) descreveram os fatores K, LS, C e P para uma área cuja ocupação do solo se divide em cultivo agrícola, pastagem, fruticultura e hortaliças, em solo predominantemente da classe dos Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos, relevo suave-ondulado e ondulado e textura arenosa ou francoarenosa. Já os dados utilizados de Valle (2008) tratam-se de uma área de pastagem, com solo da classe dos Latossolos Vermelho distroférico, de textura média, relevo predominantemente de declives suaves-ondulados a planos e comprimento de rampa médio a baixo.

Tabela 5. Fatores erodibilidade do solo (K), cobertura do solo e práticas conservacionistas (CP) e fator topográfico (LS) obtidos por Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012) e Valle Júnior (2008)

Fatores	Erodibilidade do Solo (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Cobertura do Solo e Práticas Conservacionistas	Fator Topográfico
Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012)	0,04	0,12	4,03
Valle Júnior (2008)	0,015	0,055	1

A utilização dos fatores obtidos por Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012) e Valle Júnior (2008) na simulação da perda de solo a partir da irrigação, representam conforme proposta de classificação realizada por Carvalho (2008), solos com alta erodibilidade ($K > 0,03$) e baixa erodibilidade ($K < 0,015$) respectivamente, o que representam solos com diferentes suscetibilidades ao processo erosivo. Segundo Minella, Merten e Ruhoff (2010), o fator topográfico 4,03 obtido por Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012) também pode ser considerado de médio a alto e representativo de relevo declivoso.

Os dados utilizados na obtenção da simulação de perda de solo representam a proposta de um esquema fatorial constituído de três lâminas de irrigação (560, 672 e 840 mm ano⁻¹), três espaçamentos entre aspersores (6 x 6, 9 x 9 e 12 x 12 m), nas quatro pressões avaliadas (25, 30, 35 e 40 m c. a.) e nos três bocais estudados (azul, verde e amarelo) e dois conjunto de fatores obtidos por Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012) e Valle (2008), em um total de 72 estimativas de perdas de solo por bocal e nas quatro pressões e expressas em tabelas individuais, totalizando 288 simulações:

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação da vazão e do coeficiente de variação de fabricação (CVF)

A variação na fabricação dos aspersores de acordo com as pressões estudadas é classificada de acordo com Solomon (1979) e representada pelo CVF, conforme Tabela 6.

Tabela 6. Classificação dos valores de CVF (%) do aspersor Super 10 para os bocais verde, amarelo e azul, segundo proposta de Solomon (1979).

Pressão (m c. a.)	CVF Bocal Verde (%)	CVF Bocal Amarelo (%)	CVF Bocal Azul (%)	Classificação Consolidada Solomon (1979)
25	1,12	2,09	1,60	Excelente
30	0,75	0,94	0,75	Excelente
35	0,79	0,93	0,75	Excelente
40	1,24	0,94	0,78	Excelente

Observou-se que o aspersor Super 10 apresentou uma variação do CVF entre 0,75 e 2,09%, sendo classificado, portanto como excelente em todos os bocais estudados, segundo proposta de Solomon (1979) e mostrando pequena variação no fluxo dos emissores devido ao processo de fabricação. De maneira geral, pode-se observar a partir da Tabela 6 que os maiores CVF foram encontrados predominantemente a baixas pressões. Esses resultados corroboram com Martins et al. (2012) e Guirra, Zanini e Silva (2013) que encontraram também pequena variação no fluxo de água dos emissores devido às diferenças no processo de fabricação para outros aspersores da empresa NaanDanJain (modelos 427 e 435). É importante ressaltar que a uniformidade de distribuição de água é dependente da precisão com que os aspersores são fabricados, por isso a importância de valores baixos referentes à CVF para validar os aspersores como repetições nos testes de uniformidade (KELLER; KARMELI, 1974).

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios encontrados nos testes de vazão em função das diferentes pressões de operação, assim como a vazão fornecida no catálogo do fabricante. Observa-se que os dados de vazão obtidos em relação aos dados informados pelo fabricante variaram no máximo 4%, estando em conformidade com a ABNT (1999a), que determinam variação limite de 5% para aspersores com vazão nominal superior a 250 L.h⁻¹.

Tabela 7. Valores médios e variações entre as vazões fornecidas pelo fabricante e as vazões médias obtidas nas avaliações do aspersor Super 10, para os bocais de cor verde, amarelo e azul, em diferentes pressões de operação

Bocal verde			
Pressão (m c.a.)	Vazão obtida (m ³ h ⁻¹)	Vazão informada (m ³ h ⁻¹)	Variação (%)
25	0,538	0,550	2,08
30	0,595	0,600	0,67
35	0,648	0,650	0,25
40	0,697	0,695	0,30
Bocal amarelo			
Pressão (m c.a.)	Vazão obtida (m ³ h ⁻¹)	Vazão informada (m ³ h ⁻¹)	Variação (%)
25	0,437	0,450	2,70
30	0,484	0,495	2,09
35	0,508	0,530	4,08
40	0,549	0,570	3,61
Bocal azul			
Pressão (m c.a.)	Vazão obtida (m ³ h ⁻¹)	Vazão informada (m ³ h ⁻¹)	Variação (%)
25	0,359	0,360	0,13
30	0,395	0,395	0,24
35	0,427	0,425	0,59
40	0,461	0,455	1,46

A partir dos dados de vazão obtidos em cada pressão de entrada utilizada nos ensaios foi determinada a equação característica vazão-pressão para os bocais verde, amarelo e azul, conforme proposta de Keller e Karmeli (1974) (Figuras 3, 4 e 5).

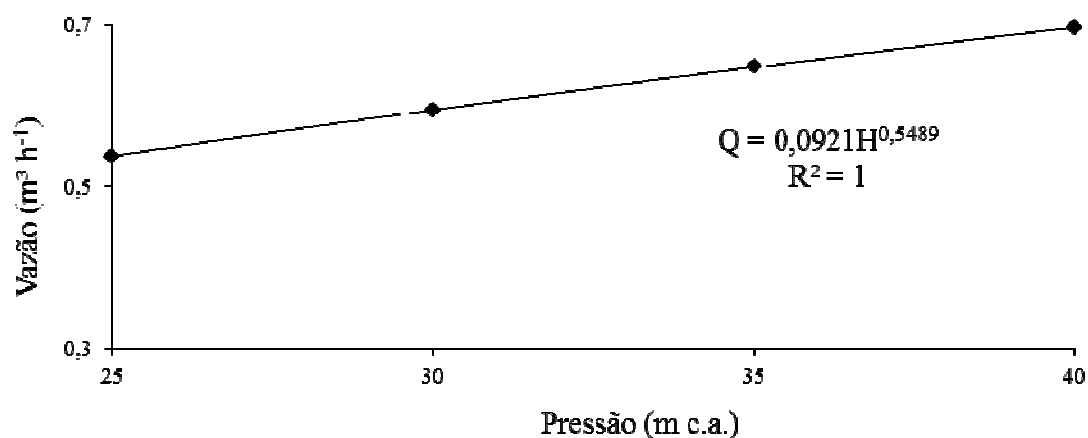


Figura 3. Curva característica vazão-pressão para o aspersor Super 10 com bocal verde

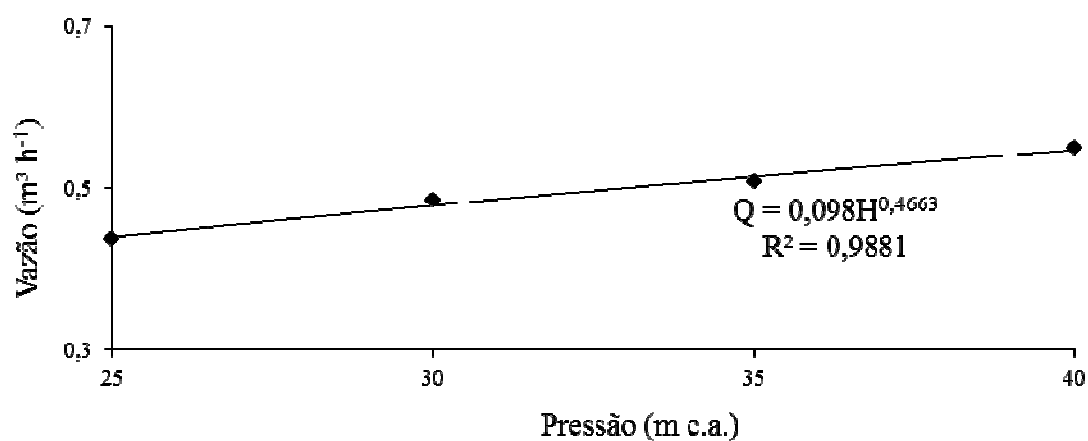


Figura 4. Curva característica vazão-pressão para o aspersor Super 10 com bocal amarelo

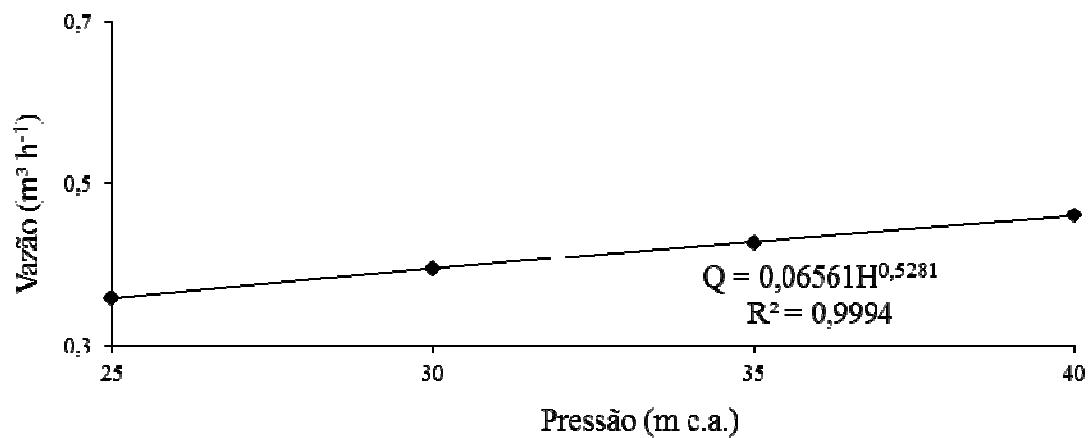


Figura 5. Curva característica vazão-pressão para o aspersor Super 10 com bocal azul

Em todos os casos (Figuras 3 a 5), observa-se a partir da análise do coeficiente de determinação (R^2) bom ajuste dos dados aos modelos obtidos para os intervalos de pressão de 25 a 40 m c.a. Os R^2 obtidos variaram de 0,98 a 1. Observa-se também que o expoente “n” tendeu a 0,5 para os três bocais, caracterizando o aspersor como um emissor de fluxo turbulento (KELLER; KARMELI, 1975)

4.2 Perfil radial e uniformidade de distribuição de água

Nas Tabelas 8, 9 e 10 a seguir estão apresentados os valores médios calculados de CUC e CUD do aspersor Super 10 com bocais verde, amarelo e azul, para os espaçamentos 6x6, 6x9, 6x12, 8x8, 9x9, 9x10, 9x12, 10x10, 10x12 e 12x12 m x m, nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a. utilizando o aplicativo computacional CATCH-3D (ALLEN, 1992).

Tabela 8. Valores médios calculados de CUC (%) e CUD (%) do aspersor Super 10 de bocal verde a partir do software CATCH-3D para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a. em função do espaçamento entre aspersores

Pressão (m c. a.)	CUC e CUD	Espaçamento entre aspersores (m x m)									
		6 x 6	6 x 9	8 x 8	6 x 12	9 x 9	9 x 10	10 x 10	9 x 12	10 x 12	12 x 12
25	CUC	90,6	90,0	90,2	89,9	88,1	88,4	88,1	88,2	88,5	85,8
	CUD	90,1	85,5	84,0	85,5	84,3	83,7	82,9	80,3	79,9	81,2
30	CUC	91,1	91,3	91,8	90,4	89,3	89,2	89,0	89,8	90,0	87,7
	CUD	90,9	87,6	87,1	86,3	86,2	84,6	83,8	82,0	82,5	83,7
35	CUC	92,3	93,7	93,9	91,4	91,5	91,4	91,7	92,3	92,2	89,6
	CUD	92,2	90,6	91,7	87,3	88,2	86,6	86,7	85,4	86,1	85,3
40	CUC	92,9	94,0	94,9	92,5	92,3	91,9	91,5	92,5	92,6	91,6
	CUD	92,7	91,2	93,0	88,8	89,6	87,8	87,2	86,5	86,3	86,8

Legenda: Conjuntos de dados (CUC e CUD) com hachuras representam valores combinados considerados excelentes por Mantovani (2001).

Tabela 9. Valores médios calculados de CUC (%) e CUD (%) do aspersor Super 10 de bocal amarelo a partir do software CATCH-3D para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a. em função do espaçamento entre aspersores

Pressão (m c. a.)	CUC e CUD	Espaçamento entre aspersores (m x m)									
		6 x 6	6 x 9	8 x 8	6 x 12	9 x 9	9 x 10	10 x 10	9 x 12	10 x 12	12 x 12
25	CUC	92,4	87,9	81,6	91,5	82,4	88,1	89,1	84,6	82,1	76,6
	CUD	88,8	81,4	69,1	85,6	75,4	82,6	84,7	74,0	71,0	67,2
30	CUC	93,7	89,7	87,2	93,2	85,0	87,7	91,8	89,0	87,8	83,1
	CUD	89,8	83,6	76,8	87,9	76,5	83,3	89,8	81,1	77,7	71,4
35	CUC	94,6	92,0	86,7	93,6	88,4	91,7	93,6	90,9	88,4	83,8
	CUD	90,3	88,1	77,5	87,8	82,4	88,3	90,2	84,2	80,3	74,6
40	CUC	95,0	93,5	88,7	93,8	91,3	94,2	95,5	92,1	89,7	86,2
	CUD	90,7	90,7	81,0	87,9	87,6	92,1	91,8	86,3	82,8	78,6

Legenda: Conjuntos de dados (CUC e CUD) com hachuras representam valores combinados considerados excelentes por Mantovani (2001).

Tabela 10. Valores médios calculados de CUC (%) e CUD (%) do aspersor Super 10 de bocal azul a partir do software CATCH-3D para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a. em função do espaçamento entre aspersores

Pressão (m c. a.)	CUC e CUD	Espaçamento entre aspersores (m x m)									
		6 x 6	6 x 9	8 x 8	6 x 12	9 x 9	9 x 10	10 x 10	9 x 12	10 x 12	12 x 12
25	CUC	96,0	93,4	91,2	91,6	93,0	91,6	89,8	87,6	87,1	85,3
	CUD	93,6	88,8	87,6	83,4	89,4	86,5	83,8	81,8	77,1	75,7
30	CUC	96,7	95,1	94,2	91,1	94,9	94,9	94,1	89,4	88,8	85,7
	CUD	94,5	91,5	92,3	83,3	92,6	91,1	90,9	84,2	81,1	78,2
35	CUC	96,3	94,7	95,0	89,7	94,9	95,2	94,9	89,8	89,0	86,1
	CUD	93,8	91,4	91,1	85,6	90,8	91,1	91,9	85,0	83,2	78,2
40	CUC	96,6	95,0	94,7	87,2	95,4	94,8	93,7	86,3	85,4	81,2
	CUD	95,0	92,0	91,3	80,0	92,2	91,8	91,0	79,2	78,0	70,5

Legenda: Conjuntos de dados (CUC e CUD) com hachuras representam valores combinados considerados excelentes por Mantovani (2001).

Os valores de CUC e CUD foram avaliados conforme proposta de Mantovani (2001) e segundo as Tabelas 8, 9 e 10, pode-se observar que para a grande maioria dos dados obtidos houve diminuição dos valores de CUC e CUD com o aumento do espaçamento entre os aspersores, para todas as pressões e para os três diferentes bocais avaliados, corroborando com semelhantes resultados encontrados por Faria et al. (2009), Martins et al. (2012) e Ribeiro et al. (2012).

Pode-se observar na Tabela 8, para o bocal verde, que 65% dos espaçamentos avaliados, apresentaram grau máximo de classificação de CUC e CUD combinados, conforme proposta de Mantovani (2001); para o bocal amarelo (Tabela 9), foram encontrados 45% do conjunto de dados; e para o bocal azul (Tabela 10), 57,5%.

Em relação às recomendações de espaçamentos, pode-se observar nas Tabelas 9 e 10 que para os bocais amarelo e azul, os melhores resultados de CUC e CUD foram obtidos para os espaçamentos 10 x 10 m, nas pressões de 30, 35 e 40 m c. a.. A pressão de 25 m c. a. apresentou resultados classificados como “bom” conforme proposta de Mantovani (2001), porém é válido ressaltar, conforme Ribeiro et al. (2012), Rocha et al. (1999) e Rezende et al. (1998), que a água se redistribui no solo ao longo do tempo, pela tendência de se movimentar das regiões mais úmidas para as de menor umidade, aumentando a uniformidade, e conseqüentemente os índices CUC e CUD. Segundo Ribeiro et al. (2012), maiores espaçamentos resultará em menor número de

emissores por linha lateral reduzindo a vazão e o diâmetro da tubulação e consequentemente o consumo energético do sistema de bombeamento. Já para o bocal verde (Tabela 8), alta uniformidade de distribuição foi obtida no espaçamento 12 x 12 m. Estes resultados corroboram com Mantovani et al. (2006) e Martins et al. (2012) que relatam influência da pressão de serviço sobre a uniformidade dos sistemas de irrigação. É válido ressaltar que embora o aumento da pressão influencie positivamente a uniformidade de distribuição de água, El-Berry et al. (2009) relatam que as maiores pressões levam à maior demanda de energia, e como a oferta de energia elétrica é limitada, torna-se necessário incentivar o uso mais eficiente no meio rural (PEREIRA; COLOMBO; RABELO, 2013).

Em relação ao perfil de distribuição radial de água, observa-se nas Figuras 6 a 8 que para os três bocais estudados, os perfis de distribuição apresentaram pequenas amplitudes de precipitação (<3,5 mm para o bocal verde; <4,1 mm para o bocal amarelo; <4,3 mm para o bocal azul), justificando, segundo Sanchez, Faci e Zapata (2011), a boa uniformidade de distribuição de água obtida nas condições calculadas, devido à íntima relação entre o perfil radial molhado e o CUC. Pode-se acrescentar também o efeito combinado entre o orifício circular (de longo alcance) e o orifício não-circular (de baixo-médio alcance) pois conforme observado por Li, Kawano e Yu (1994), bocais de orifícios não-circulares podem apresentar distribuição de água aceitável ao longo do raio de alcance, contribuindo para o efeito da baixa amplitude de precipitação ao longo do raio de molhamento e a alta uniformidade de distribuição.

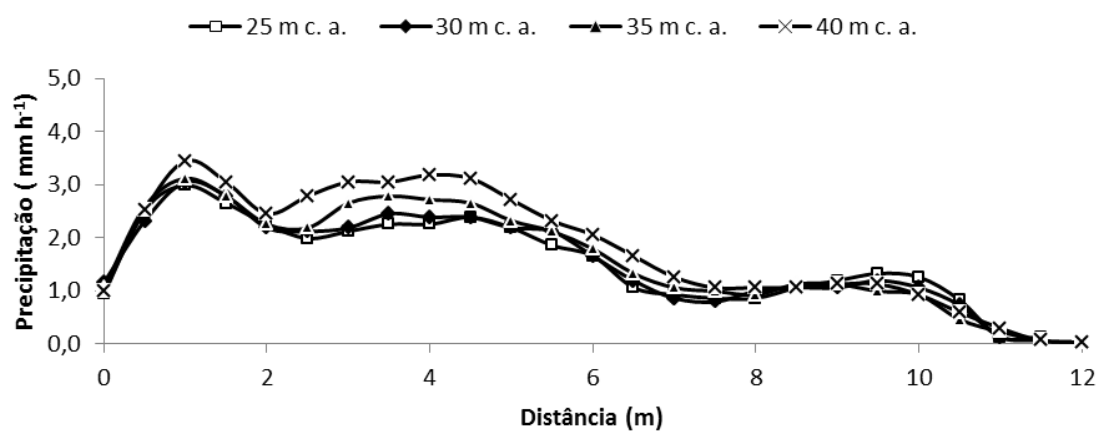


Figura 6. Perfil de distribuição de água do aspersor Super 10 com bocal verde operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

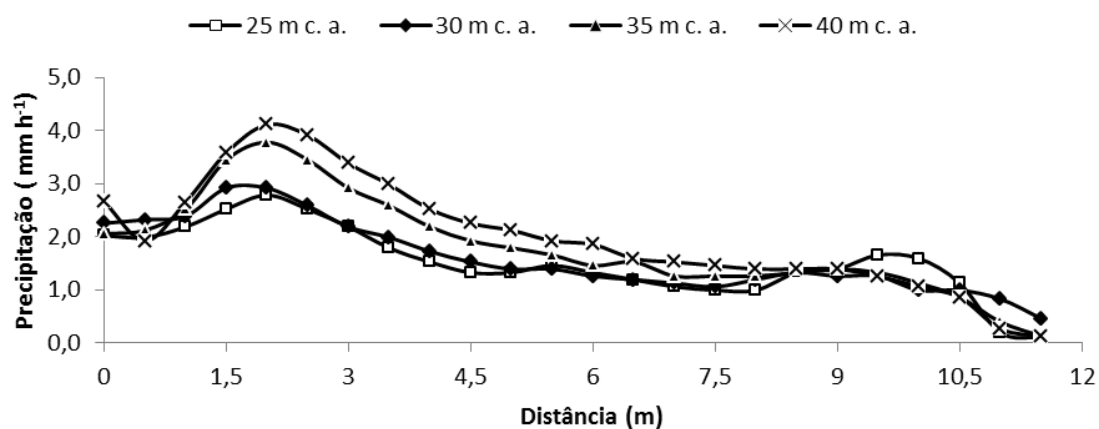


Figura 7. Perfil de distribuição de água do aspersor Super 10 com bocal amarelo operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

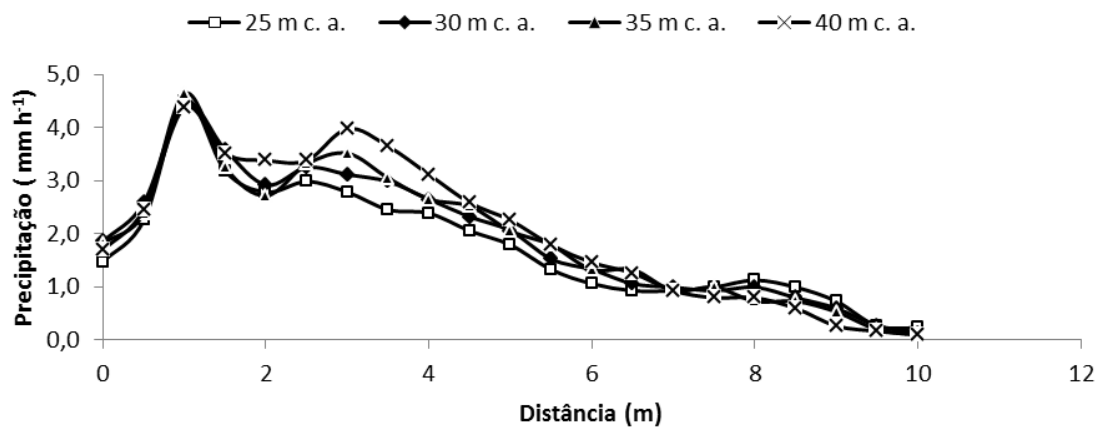


Figura 8. Perfil de distribuição de água do aspersor Super 10 com bocal azul operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Os resultados observados para o perfil de distribuição radial de água diferem dos resultados encontrados por Martins et al. (2012) e Guirra, Zanini e Silva (2013), que avaliaram respectivamente o perfil radial de distribuição para os aspersores NaanDanJain 427 e 435 sob diferentes regulagens do braço defletor, entre as pressões de 15 a 40 m c. a. para o aspersor 427 e 20 a 40 m c. a. para o aspersor 435. Apesar de os equipamentos (Super 10, 427 e 435) trabalharem em faixas de pressão e vazão similares e terem raios de molhamento semelhantes, o diferenciado mecanismo utilizado para o fracionamento de água do aspersor Super 10 se mostrou mais eficiente que o braço defletor, pois o aspersor Super 10 apresentou perfil de distribuição mais uniforme e com menores amplitudes e seguindo um mesmo padrão para todas as pressões avaliadas. É válido ressaltar também que quando comparados entre estes três trabalhos, os índices CUC e CUD em espaçamentos igualmente avaliados (6x6, 6x12, 8x8, 10x12 e 12x12 m) para as pressões de 30 e 40 m c. a. (pressões avaliadas nos três trabalhos), o aspersor Super 10 manteve o melhor desempenho, pois apresentou 58,3% do conjunto de dados CUC e CUD classificado como “Excelente” conforme proposta de Mantovani (2001), enquanto o aspersor 427 apresentou 32% e o aspersor 435, 18%. Apenas o aspersor Super 10 com bocal verde apresentou alta uniformidade de distribuição calculada no maior espaçamento (12x12 m).

Em relação ao comportamento típico encontrado na literatura para a forma geométrica da curva formada pelo perfil radial (triangular, retangular e elíptica) citada por Prado et al. (2012), não se observou para o aspersor Super 10, nas Figuras 6 a 8, nenhum dos três comportamentos, mas sim a combinação de todos. Comportamento similar foi observado por Stambouli, Zapata e Faci (2014) utilizando o aspersor RC130-BY fabricado pela empresa Riegos Costa. Montero et al. (2003) relatam que aspersores que apresentam perfis de distribuição de água mais uniformes sofrem menos influência do vento (um dos agentes que influenciam a uniformidade de distribuição de água), quando comparados com aspersores que apresentam perfil radial de distribuição de água com forma geométrica tendendo a triangular, como os aspersores 427 (MARTINS et al., 2012) e o aspersor 435 (GUIRRA; ZANINI; SILVA, 2013). Segundo Stambouli, Zapata e Faci (2014) as informações observadas nos catálogos dos fabricantes são muito limitadas e insuficientes para fins de projetos de aspersão, e torna-se fundamental para elaboração de um bom projeto que a distribuição radial padrão em função das características de operação do equipamento façam parte das informações técnicas disponibilizadas pelo fabricante em seu catálogo.

Em relação ao raio de molhamento, na Tabela 11 a seguir, são apresentados os valores médios para o Super 10.

Tabela 11. Valores médios obtidos do raio de molhamento do aspersor Super 10 com bocais verde, amarelo e azul para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Bocal	Pressão (m c. a.)			
	25	30	35	40
	Raio (m)			
Verde	11,5**	11,5**	12,0**	12,0**
Amarelo	11,5**	11,5*	11,5*	11,5*
Azul	10,0*	10,0*	10,0**	10,0**

Legenda: Dados identificados com um “*” (um asterisco) representam valores observados onde o último coletor apresentou intensidade de precipitação de água inferior a $0,25 \text{ mm h}^{-1}$. Dados identificados com um “**” (dois asteriscos) representam valores observados onde os dois últimos coletores apresentaram intensidade de precipitação de água inferior a $0,25 \text{ mm h}^{-1}$.

Pode-se observar (Tabela 11) para o bocal verde o aumento do raio de molhamento nas pressões de 35 e 40 m c. a. em relação às pressões inferiores. Para os bocais azul e amarelo, observou-se que o raio se manteve constante independente da pressão de operação. De maneira geral, o bocal de maior vazão (verde) apresentou maior raio de molhamento em relação aos outros bocais, quando utilizado nas pressões de 35 e 40 m c. a. ($R_{\text{verde}} > R_{\text{amarelo}} > R_{\text{azul}}$).

Conforme proposta da ABNT (1999a), foi considerado raio efetivo de alcance, a distância do aspersor ao coletor que obteve precipitação mínima de $0,25 \text{ mm h}^{-1}$. Entretanto, como se pode observar na Tabela 11, esta premissa não foi atendida em todos testes radiais realizados. Os raios efetivos, conforme metodologia da ABNT (1999a) podem ser observados na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12. Valores médios obtidos do raio de molhamento do aspersor Super 10 com bocais verde, amarelo e azul para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a. conforme metodologia estabelecida pela ABNT (1999a)

Bocal	Pressão (m c. a.)			
	25	30	35	40
	Raio (m)			
Verde	10,5	10,5	11,0	11,0
Amarelo	10,5	11,0	11,0	11,0
Azul	9,5	9,5	9,0	9,0

Para os três bocais avaliados, conforme Tabela 4, que descreve as características do aspersor Super 10 de acordo com as informações contidas no catálogo do fabricante, e a Tabela 12, que descreve os valores médios obtidos para o raio de molhamento no mesmo equipamento a partir do método radial, pode-se observar que os valores médios obtidos para o raio de molhamento superam aos informados no catálogo do fabricante em todas as pressões.

4.3 Intensidade de precipitação de água

Nas Tabelas 13 a 15 a seguir estão apresentados os valores de intensidade de aplicação de água do aspersor Super 10 nos bocais verde, amarelo e azul, em diferentes espaçamentos e nas pressões de serviço utilizadas nos ensaios.

Tabela 13. Valores obtidos para a intensidade de aplicação de água (mm h^{-1}) para o aspersor Super 10 com bocal verde e operando a 25, 30, 35 e 40 m c. a. em diferentes espaçamentos entre aspersores e linhas laterais.

Espaçamentos (m x m)	Pressão (m c. a.)			
	25	30	35	40
	Vazão média ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)			
	0,54	0,60	0,65	0,70
6 x 6	14,96	16,55	18,01	19,36
6 x 8	11,22	12,42	13,51	14,52
6 x 9	9,97	11,04	12,01	12,91
6 x 10	8,98	9,93	10,81	11,62
8 x 8	8,42	9,31	10,13	10,89
6 x 12	7,48	8,28	9,01	9,68
8 x 9	7,48	8,28	9,01	9,68
8 x 10	6,73	7,45	8,10	8,71
9 x 9	6,65	7,36	8,00	8,61
9x10	5,98	6,62	7,20	7,75
8 x12	5,61	6,21L	6,75	7,26
10x10	5,39	5,96	6,48	6,97
9x12	4,99	5,52	6,00	6,45
10x12	4,49	4,97	5,40	5,81
12x12	3,74	4,14	4,50	4,84

Tabela 14. Valores obtidos para a intensidade de aplicação de água (mm h^{-1}) para o aspersor Super 10 com bocal amarelo e operando a 25, 30, 35 e 40 m c. a. em diferentes espaçamentos entre aspersores e linhas laterais.

Espaçamentos (m x m)	Pressão (m c. a.)			
	25	30	35	40
	Vazão média ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)			
	0,44	0,48	0,51	0,55
6 x 6	12,16	13,46	14,12	15,26
6 x 8	9,12	10,10	10,59	11,45
6 x 9	8,11	8,97	9,41	10,17
6 x 10	7,30	8,08	8,47	9,16
8 x 8	6,84	7,57	7,94	8,58
6 x 12	6,08	6,73	7,06	7,63
8 x 9	6,08	6,73	7,06	7,63
8 x 10	5,47	6,06	6,35	6,87
9 x 9	5,41	5,98	6,28	6,78
9x10	4,86	5,38	5,65	6,10
8 x12	4,56	5,05	5,30	5,72
10x10	4,38	4,85	5,08	5,49
9x12	4,05	4,49	4,71	5,09
10x12	3,65	4,04	4,24	4,58
12x12	3,04	3,37	3,53	3,82

Tabela 15. Valores obtidos para a intensidade de aplicação de água (mm h^{-1}) para o aspersor Super 10 com bocal azul e operando a 25, 30, 35 e 40 m c. a. em diferentes espaçamentos entre aspersores e linhas laterais.

Espaçamentos (m x m)	Pressão (m c. a.)			
	25	30	35	40
	Vazão média ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)			
	0,36	0,40	0,43	0,46
6 x 6	9,99	11,00	11,88	12,82
6 x 8	7,49	8,25	8,91	9,62
6 x 9	6,66	7,33	7,92	8,55
6 x 10	5,99	6,60	7,13	7,69
8 x 8	5,62	6,19	6,68	7,21
6 x 12	4,99	5,50	5,94	6,41
8 x 9	4,99	5,50	5,94	6,41
8 x 10	4,49	4,95	5,34	5,77
9 x 9	4,44	4,89	5,28	5,70
9x10	3,99	4,40	4,75	5,13
8 x12	3,74	4,12	4,45	4,81
10x10	3,60	3,96	4,28	4,62
9x12	3,33	3,67	3,96	4,27
10x12	3,00	3,30	3,56	3,85
12x12	2,50	2,75	2,97	3,21

Conforme observado nas Tabelas 13 a 15, o aumento da pressão influencia na amplitude da intensidade de aplicação de água e que as maiores intensidades são encontradas nos menores espaçamentos entre aspersores. Entretanto, é válido ressaltar que Thompson e James (1985) relataram efeito direto entre o crescimento da intensidade de aplicação de água e a redução da infiltração de água no solo, sendo complementados por Sun, Kang e Jiang (2008) que observaram redução da porosidade total com o aumento da intensidade de aplicação de água.

4.4 Distribuição do diâmetro médio de gotas

Pode-se observar nas Figuras 9 a 11, que os bocais verde, amarelo e azul, operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a., não apresentaram grandes discrepâncias entre si em relação ao comportamento dos percentuais do número de gotas. As gotas agrupadas nos intervalos de diâmetros menores que 1 mm, entre 1 e 2

mm e maiores que 2 mm tiveram praticamente o mesmo comportamento em todas as pressões avaliadas, nos três diferentes bocais.

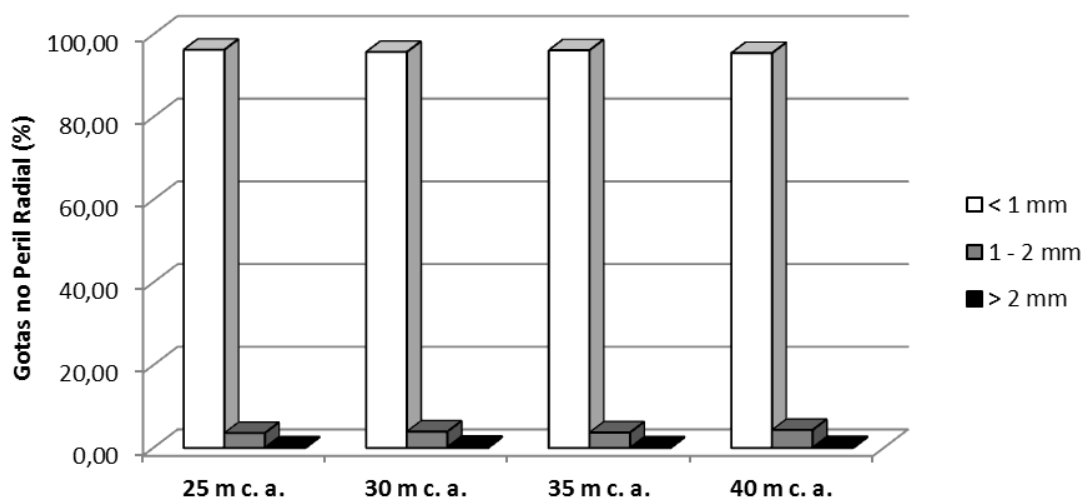


Figura 9. Distribuição percentual do número de gotas em relação aos seus diferentes diâmetros (<1 mm, 1-2 mm e >2 mm), no perfil radial do aspersor Super 10 com bocal verde operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

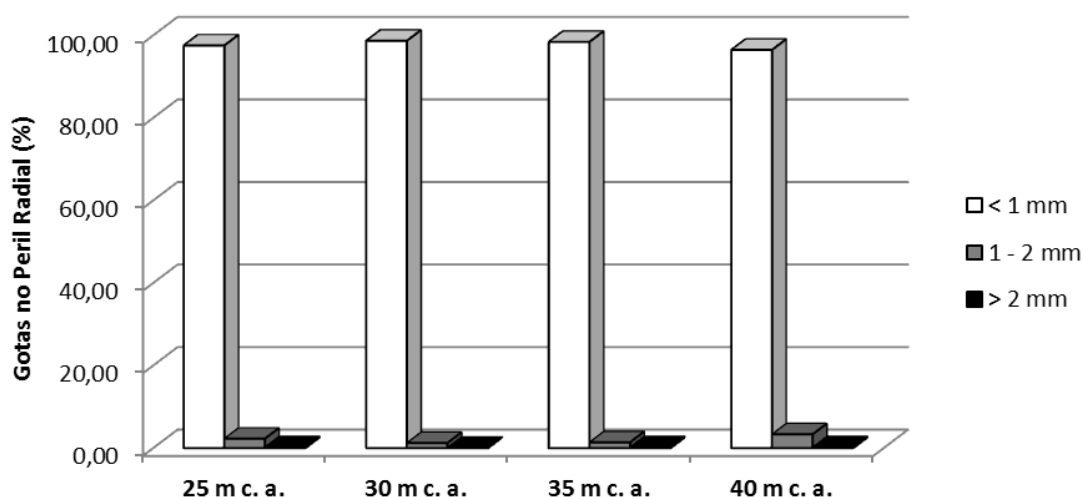


Figura 10. Distribuição percentual do número de gotas em relação aos seus diferentes diâmetros (<1 mm, 1-2 mm e >2 mm), no perfil radial do aspersor Super 10 com bocal amarelo operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

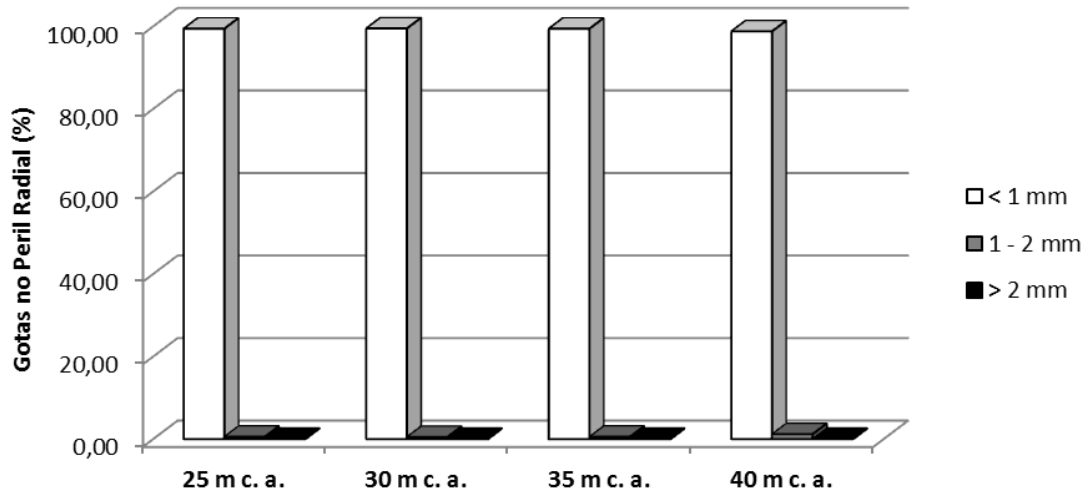


Figura 11. Distribuição percentual do número de gotas em relação aos seus diferentes diâmetros (<1 mm, 1-2 mm e >2 mm), no perfil radial do aspersor Super 10 com bocal azul operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

O diâmetro médio de gotas obtido variou entre 0,46 mm e 5,39 mm (Tabela 16), corroborando com Carvalho (1991) que obteve para aspersores de média pressão, operando com pressões entre 200 e 500 kPa (20,39 e 50,98 m c. a.), intervalos de diâmetros de gotas entre 0,58 e 5,77 mm.

Tabela 16. Diâmetros médios de gotas obtidos para o aspersor Super 10, submetido ao teste da farinha em quatro pressões de serviço, conforme metodologia proposta por Oliveira (1991) em peneiras de 4, 10, 16, 20, 30, 40 e 50 mesh.

Peneira	4 mesh	10 mesh	16 mesh	20 mesh	30 mesh	40 mesh	50 mesh
Diametro médio (mm)	5,39	2,93	1,60	1,45	0,82	0,55	0,46

Conforme se observa na Tabela 17, as gotas menores que 1 mm de diâmetro representam, em todos os bocais, entre 95,49 e 99,48%. Apesar da grande diferença de vazão entre os tipos de irrigação, os resultados são similares aos obtidos por Conceição (2002) que avaliou os diâmetros de gota do microaspersor Dan 2001 operando com pressão de serviço de 250 kPa e também por Friso e Bortolini (2010) com o aspersor

Nelson F32 e pressão de 400 kPa. Essa baixa heterogeneidade de gotas é justificada através da eficiência do mecanismo de fracionamento de jato do aspersor Super 10 e diferindo, segundo César et al. (2005) do consagrado sistema de braço oscilante, cujo espectro de gotas apresenta grande amplitude. Em seguida, as gotas de diâmetro entre 1 e 2 mm apresentaram percentuais entre 0,51 e 4,35%; enquanto que as porcentagens de gotas maiores que 2 mm de diâmetro não superaram 0,21% em nenhum dos bocais e pressões avaliadas.

É válido acrescentar também que o comportamento do espectro de gotas pode ser explicado com o aumento da vazão (Tabela 7: nas mesmas pressões: $Q_{\text{verde}} > Q_{\text{amarelo}} > Q_{\text{azul}}$), onde, conforme observado na Tabela 17, o bocal de maior vazão apresentou espectro mais desuniforme (maior variação no diâmetro de gotas) em relação ao bocal de menor vazão, sucessivamente. Não foi observado o comportamento relatado por Kohl (1974) e César et al. (2005) de aumento no diâmetro médio das gotas, com a redução da pressão.

Tabela 17. Distribuição de gotas (%) observadas para aspersor Super 10 com bocais verde, azul e amarelo para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a. nos intervalos de diâmetros menores que 1 mm, entre 1 e 2 mm e maiores que 2 mm.

Pressão (m c. a.)												
Bocal	25 m c. a.			30 m c. a.			35 m c. a.			40 m c. a.		
	Intervalos de diâmetros de gotas (mm)											
	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	> 2
Verde	96,29	3,59	0,12	95,75	3,96	0,29	96,17	3,72	0,11	95,49	4,35	0,16
Amarelo	97,53	2,26	0,21	98,68	1,24	0,08	98,68	1,24	0,08	96,49	3,34	0,17
Azul	99,42	0,56	0,02	99,48	0,51	0,01	99,42	0,56	0,02	98,78	1,20	0,02

Em relação ao volume total de água aplicado na área, para cada bocal, em função do diâmetro de gotas e admitindo-se que as gotas possuem formato esférico, pode-se observar nas Figuras 12 a 14, que os maiores percentuais relativos foram encontrados para gotas de diâmetros menores que 1 mm, exceto para a pressão de 40 m c. a. no bocal verde.

A grande amplitude observada entre os intervalos de diâmetros de gotas nas Figuras 9 a 11, que representavam o percentual de gotas no perfil, não preponderaram na avaliação do volume de água no perfil radial (Figuras 12 a 14). Isso ocorre porque o volume de gotas é proporcional ao cubo dos seus diâmetros, fazendo com que as gotas maiores representem um volume significativamente maior, justificando a menor amplitude entre os intervalos de diâmetros. Embora o número de gotas de maior diâmetro seja menor, a contribuição em relação ao volume é significativa. É válido ressaltar conforme relataram Carrión et al. (2001) que gotas de maior diâmetro apresentam menores perdas por evaporação e arraste. É válido ressaltar, conforme observado nas Figuras 12 a 14, que à medida que se utilizou os bocais de menor vazão, a participação das gotas de menor diâmetro em relação ao volume de água destas no perfil radial aumentou, quando comparadas as mesmas pressões, nos três bocais estudados.

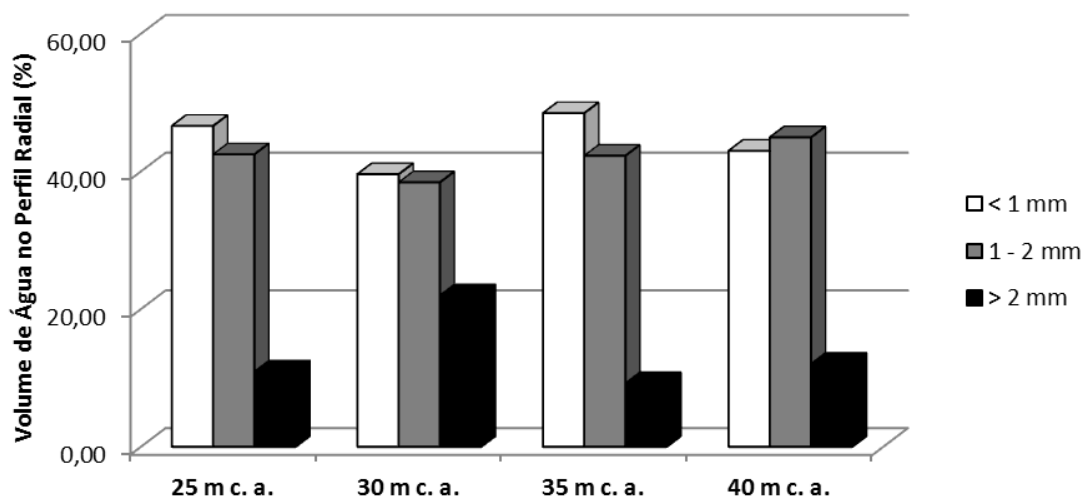


Figura 12. Distribuição percentual do volume coletado na área molhada em relação aos seus diferentes diâmetros (<1mm, 1-2 mm e >2 mm), no perfil radial do aspersor Super 10 com bocal verde operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m.c.a.

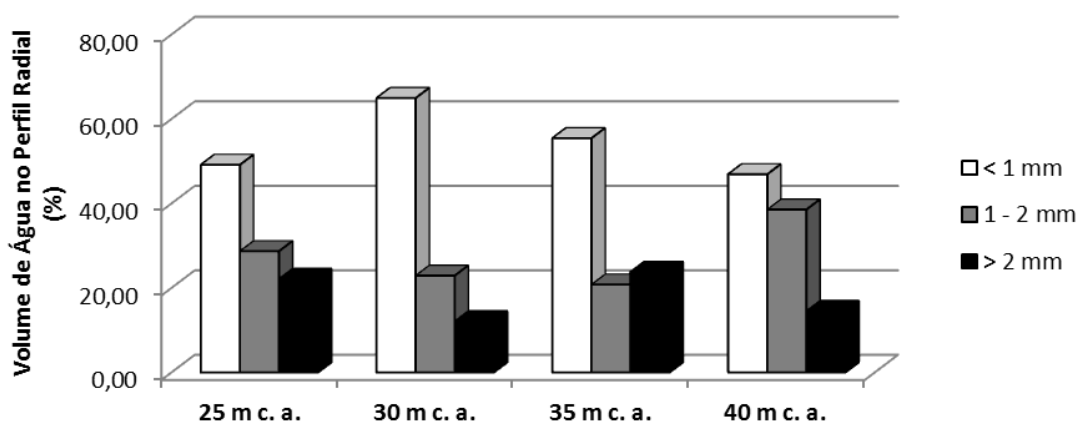


Figura 13. Distribuição percentual do volume coletado na área molhada em relação aos seus diferentes diâmetros (<1mm, 1-2 mm e >2 mm), no perfil radial do aspersor Super 10 com bocal amarelo operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

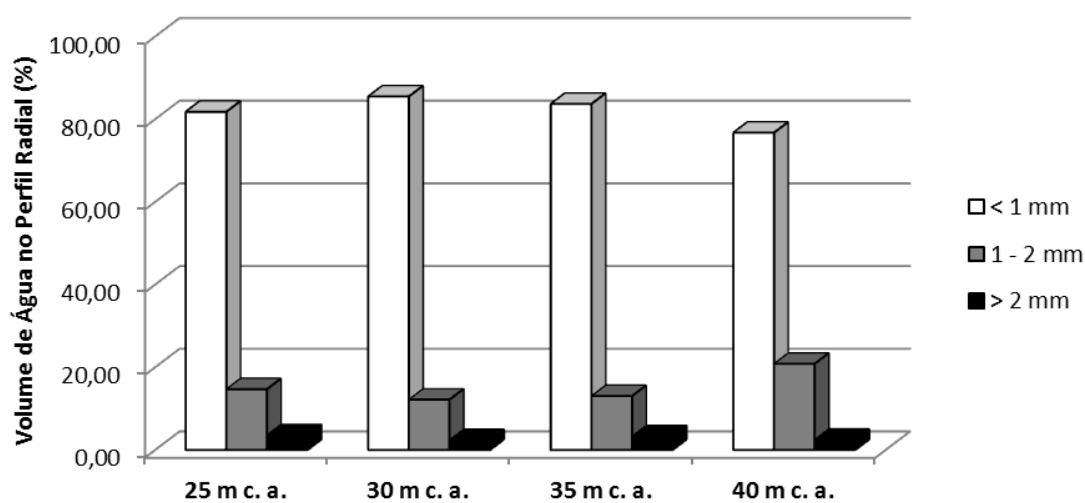


Figura 14. Distribuição percentual do volume coletado na área molhada em relação aos seus diferentes diâmetros (<1mm, 1-2 mm e >2 mm), no perfil radial do aspersor Super 10 com bocal azul operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Tabela 18. Distribuição do volume aplicado no perfil radial (%) observada para o aspersor Super 10 com bocais verde, amarelo e azul para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a. nos intervalos de diâmetros menores que 1 mm, entre 1 e 2 mm e maiores que 2 mm.

Pressão (m c. a.)												
Bocal	25 m c. a.			30 m c. a.			35 m c. a.			40 m c. a.		
	Intervalos de diâmetros de gotas (mm)											
	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	>2	< 1	1 – 2	> 2
Verde	46,59	42,47	10,92	39,58	38,40	22,00	48,45	42,28	9,25	42,98	44,94	12,07
Amarelo	49,14	28,69	22,16	64,95	22,91	12,12	55,44	20,79	23,76	46,91	38,54	14,53
Azul	81,76	14,67	3,55	85,47	12,16	2,36	83,67	13,02	3,29	76,72	20,83	2,44

Em cada pressão avaliada (Tabela 18), o bocal de maior vazão apresentou menor volume percentual de gotas de diâmetro menor que 1 mm (Tabela 7: nas mesmas pressões: $Q_{\text{verde}} > Q_{\text{amarelo}} > Q_{\text{azul}}$).

As Tabelas 19 a 21 apresentam o percentuais de gotas por intervalo de diâmetros em função do raio de molhamento, para cada pressão de serviço. Segundo César et al. (2005), para o comportamento padrão em aspersores, normalmente têm-se um crescimento no diâmetro médio de gotas com o aumento do raio, conforme observado por Rocha (1998), Conceição (2002), Sun, Kang e Jiang (2008) e Salvador et al. (2012), fato este não apresentado nas Tabelas 19 a 21, que apresentam um comportamento similar em todas as pressões avaliadas, com a presença maciça das gotas de menor diâmetro (diâmetro menores que 1 mm) em todo o raio de molhamento, mostrando a eficiência no sistema de fracionamento do jato do aspersor Super 10. No trabalho realizado por César et al. (2005) com o aspersor Mercury da empresa SIME, que da mesma forma que o aspersor Super 10, asperge água a partir de dois orifícios, também não foi observado crescimento no diâmetro médio de gotas em função do raio de molhamento.

É válido ressaltar que os resultados obtidos nas Tabelas 19 a 21 corroboram com Salvador et al. (2009), Bautista-Capetillo, Zavala e Playan (2012) e Salvador et al. (2012) no sentido de que a frequência de gotas de diâmetro maior cresce com o aumento da distância ao aspersor.

Em relação à mudança de comportamento das gotas observadas nas Tabelas 19 a 21, entre o 4^o e 8^o metro do perfil radial, isto pode ser atribuído ao fato de que estas gotas podem tanto terem sido emitidas diretamente do bocal de saída do aspersor quanto separadas de outras durante sua trajetória, o que explicaria a mudança de comportamento entre as posições centrais e o extremo final do perfil radial. A grande presença de gotas de menor diâmetro ao longo de todo o raio de molhamento, predominantemente para os bocais amarelo e azul (de menores vazões em relação ao bocal verde) pode ser justificada segundo Li, Kawano e Yu (1994), pois bocais não-circulares geralmente produzem menores raios molhados e diâmetros de gotas inferiores aos produzidos por bocais circulares, mostrando um efeito compensatório em relação ao espectro do diâmetro de gotas devido a presença de orifícios circulares e não-circulares ao mesmo bocal.

Tabela 19. Variação do diâmetro das gotas (%) ao longo do perfil radial observadas para aspersor Super 10 com bocal verde para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Pressão (m c. a.)												
Perfil radial (m)	25 m c. a.			30 m c. a.			35 m c. a.			40 m c. a.		
	Intervalos de diâmetros de gotas (mm)											
	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	>2	< 1	1 – 2	> 2
0	99,55	0,42	0,02	99,50	0,50	0,00	99,27	0,73	0,00	99,59	0,41	0,00
1	95,59	4,34	0,07	98,09	1,83	0,08	98,37	1,63	0,00	97,94	1,99	0,07
2	94,72	5,27	0,01	96,13	3,27	0,59	95,33	4,65	0,02	95,20	4,62	0,18
3	95,62	4,37	0,01	96,77	3,23	0,00	91,83	8,17	0,00	93,96	5,88	0,16
4	85,68	14,10	0,22	88,05	11,88	0,07	90,35	9,60	0,04	93,33	6,56	0,11
5	91,70	8,03	0,28	88,60	10,75	0,65	92,22	7,65	0,14	93,13	6,78	0,09
6	95,56	4,16	0,28	94,80	5,11	0,09	88,19	11,48	0,33	93,64	6,08	0,28
7	98,09	1,78	0,13	91,88	7,84	0,28	92,51	7,29	0,20	94,90	4,89	0,21
8	92,81	6,85	0,34	93,78	5,84	0,38	97,76	2,10	0,14	91,45	7,94	0,61
9	98,09	1,61	0,30	96,89	2,66	0,45	92,54	6,92	0,54	93,73	5,64	0,63
10	97,63	2,04	0,33	94,27	4,49	1,24	97,91	1,79	0,29	95,98	3,44	0,57
11	99,15	0,80	0,05	98,46	1,36	0,18	98,61	1,16	0,23	97,86	2,07	0,07
12	98,37	1,63	0,00	98,66	1,25	0,10	98,76	1,24	0,00	98,74	1,23	0,03

Tabela 20. Variação do diâmetro das gotas (%) ao longo do perfil radial observadas para aspersor Super 10 com bocal amarelo para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Perfil radial (m)	Pressão (m c. a.)											
	25 m c. a.			30 m c. a.			35 m c. a.			40 m c. a.		
	Intervalos de diâmetros de gotas (mm)											
	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	>2	< 1	1 – 2	> 2
0	98,44	1,56	0,00	99,11	0,89	0,00	99,06	0,79	0,15	99,53	0,47	0,00
1	98,93	1,07	0,00	99,18	0,82	0,00	98,55	1,12	0,34	97,87	2,10	0,02
2	99,13	0,74	0,13	98,18	1,76	0,06	99,26	0,74	0,00	95,69	3,97	0,34
3	95,83	4,00	0,17	98,80	1,12	0,08	98,98	1,02	0,00	95,46	4,41	0,13
4	95,71	4,04	0,25	97,79	2,21	0,00	97,49	2,48	0,03	94,91	4,57	0,52
5	98,51	1,43	0,06	97,30	2,66	0,04	97,16	2,49	0,35	93,07	6,85	0,09
6	95,96	3,79	0,26	97,72	2,26	0,02	92,75	7,16	0,09	94,21	5,69	0,11
7	95,88	3,80	0,33	99,08	0,74	0,17	97,93	1,88	0,19	94,98	4,70	0,32
8	98,48	1,34	0,18	98,97	0,82	0,21	98,02	1,54	0,43	97,17	2,78	0,05
9	95,16	3,74	1,10	98,51	1,19	0,30	99,18	0,58	0,24	94,91	4,65	0,45
10	98,39	1,54	0,07	99,21	0,79	0,00	98,50	1,04	0,46	96,30	3,65	0,05
11	99,38	0,52	0,10	99,69	0,31	0,00	99,01	0,99	0,00	98,43	1,42	0,15
12	99,42	0,53	0,05	99,77	0,15	0,00	99,64	0,36	0,00	98,60	1,40	0,00

Tabela 21. Variação do diâmetro das gotas (%) ao longo do perfil radial observadas para aspersor Super 10 com bocal azul para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Perfil radial (m)	Pressão (m c. a.)											
	25 m c. a.			30 m c. a.			35 m c. a.			40 m c. a.		
	Intervalos de diâmetros de gotas (mm)											
	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	> 2	< 1	1 – 2	>2	< 1	1 – 2	> 2
0	99,81	0,08	0,10	99,90	0,10	0,00	99,59	0,41	0,00	98,91	1,16	0,03
1	99,74	0,26	0,00	99,95	0,05	0,00	99,97	0,03	0,00	99,95	0,05	0,00
2	99,75	0,25	0,00	99,90	0,10	0,00	99,96	0,04	0,00	99,53	0,47	0,00
3	99,04	0,96	0,00	99,29	0,71	0,00	99,90	0,06	0,05	99,21	0,79	0,00
4	99,25	0,75	0,00	98,96	1,04	0,00	98,69	1,31	0,00	96,62	3,38	0,00
5	98,66	1,33	0,01	98,79	1,19	0,02	98,90	1,10	0,00	96,57	3,43	0,00
6	99,46	0,51	0,03	98,40	1,59	0,01	99,50	0,50	0,00	98,11	1,84	0,00
7	99,71	0,25	0,04	97,42	2,54	0,04	98,70	1,28	0,02	98,70	1,30	0,00
8	97,26	2,72	0,03	99,54	0,40	0,05	99,29	0,61	0,11	98,33	1,60	0,08
9	99,89	0,09	0,02	99,88	0,08	0,04	98,87	1,08	0,05	97,28	2,53	0,18
10	99,81	0,19	0,00	99,92	0,07	0,02	99,20	0,78	0,02	98,20	1,70	0,10

Em relação ao diâmetro médio de gotas, observa-se através da Tabela 22 a amplitude variando entre 0,47 mm e 0,74 mm. De maneira geral, quando avaliadas as mesmas pressões entre os diferentes bocais, observa-se que o bocal de maior vazão ($Q_{\text{verde}} > Q_{\text{amarelo}} > Q_{\text{azul}}$) apresentou maior diâmetro médio de gotas ao longo do perfil radial em relação ao bocal de vazão inferior. Para as avaliações do efeito da pressão ao longo do raio, não se observou um padrão uniforme em todos os bocais e pressões avaliadas, diferindo de Conceição (2002), César et al. (2005) e El-Berry et al. (2009) que observaram para uma mesma pressão, o aumento do diâmetro médio de gotas ao longo do raio.

Ainda com relação à Tabela 22, também é importante salientar que para os mesmos bocais, operando nas quatro pressões avaliadas, foi observado que de maneira geral o diâmetro médio de gotas aumentou em função da pressão para os bocais verde e azul. Os resultados não corroboram com El-Berry et al. (2009) que observaram uma redução do diâmetro médio de gotas com o aumento da pressão utilizando o aspersor RC-160-S que possui o mecanismo do braço defletor de fracionamento do jato.

Tabela 22. Variação do diâmetro médio das gotas (mm) ao longo do perfil radial observadas para aspersor Super 10 com bocais verde, amarelo e azul para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Perfil radial (m)	Pressão (m c. a.)											
	25 m c. a.			30 m c. a.			35 m c. a.			40 m c. a.		
	Bocais											
	Verde	Amarelo	Azul	Verde	Amarelo	Azul	Verde	Amarelo	Azul	Verde	Amarelo	Azul
0	0,51	0,50	0,47	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,52	0,52	0,52
1	0,57	0,50	0,49	0,57	0,51	0,48	0,57	0,50	0,50	0,56	0,56	0,49
2	0,59	0,55	0,50	0,58	0,51	0,51	0,57	0,51	0,51	0,61	0,55	0,59
3	0,58	0,59	0,51	0,58	0,54	0,54	0,60	0,51	0,50	0,61	0,55	0,55
4	0,67	0,56	0,48	0,74	0,53	0,51	0,63	0,52	0,52	0,62	0,57	0,59
5	0,63	0,56	0,48	0,63	0,50	0,50	0,57	0,52	0,51	0,58	0,54	0,54
6	0,57	0,53	0,48	0,52	0,50	0,50	0,66	0,66	0,48	0,56	0,53	0,51
7	0,54	0,57	0,48	0,59	0,50	0,50	0,59	0,51	0,49	0,55	0,55	0,49
8	0,59	0,51	0,50	0,59	0,51	0,50	0,57	0,52	0,48	0,61	0,57	0,55
9	0,53	0,52	0,48	0,51	0,48	0,48	0,58	0,49	0,49	0,59	0,54	0,51
10	0,53	0,52	0,48	0,54	0,49	0,48	0,59	0,51	0,50	0,57	0,53	0,49
11	0,48	0,48		0,48	0,48		0,50	0,48		0,51	0,50	
12	0,51	0,48		0,49	0,48		0,51	0,50		0,50	0,49	
Média	0,56	0,53	0,49	0,56	0,50	0,49	0,57	0,52	0,50	0,57	0,54	0,53

4.5 Determinação da energia cinética e da velocidade terminal das gotas

A velocidade terminal e a energia cinética por gota foram determinadas conforme propostas de Bautista-Capetillo et al. (2009) e Kohl et al. (1985), respectivamente, e os resultados estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23. Velocidade terminal média e energia cinética das gotas aspergidas pelo aspersor Super 10 em função do diâmetro médio de gotas obtidas para as peneiras de malhas de 5,39, 2,93, 1,60, 1,45, 0,82, 0,55 e 0,46 mm.

Diâmetro médio (mm)	5,39	2,93	1,60	1,45	0,82	0,55	0,46
Velocidade Terminal (m s^{-1})	7,09	5,70	4,33	4,10	2,80	1,92	1,51
Energia Cinética ($\text{J } 10^{-7}$)	20.691,25	2.141,72	203,05	134,14	11,41	1,67	0,60

Em trabalho realizado por Thompson e James (1985), com diversas gotas com energia cinética entre $67,9 \cdot 10^{-7}$ e $1.206 \cdot 10^{-7}$ J observou-se que com o aumento da intensidade de precipitação e da energia cinética das gotas, houve redução da infiltração de água no solo em até 51%, no solo avaliado. Esses autores também descreveram que a infiltração do solo diminui com o aumento do fluxo de energia cinética.

A energia cinética aplicada por unidade de volume é apresentada na Tabela 24. Em todas as pressões avaliadas, o bocal azul, de menor vazão, apresentou a menor energia cinética por unidade de volume aplicado. A amplitude da energia cinética por unidade de volume variou de 2,84 a 8,09 J L⁻¹.

Tabela 24. Energia Cinética por unidade de volume (J L⁻¹) para aspersor Super 10 com bocais verde, amarelo e azul para as pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Pressão (m c. a.)											
25 m c. a.			30 m c. a.			35 m c. a.			40 m c. a.		
Bocais											
Verde	Amarelo	Azul	Verde	Amarelo	Azul	Verde	Amarelo	Azul	Verde	Amarelo	Azul
6,54	7,53	3,04	8,09	5,23	2,84	6,36	6,92	3,05	6,90	6,75	3,45

Em relação ao comportamento da energia cinética por unidade de volume em função do perfil radial, observa-se conforme Figuras 15 a 17, comportamento similar em todas as pressões avaliadas e para os três bocais e pouca variação em relação à distância da base do aspersor, demonstrando uma característica importante do aspersor Super 10. Entretanto, os resultados encontrados diferem de Li e Kawano (1995), Bautista-Capetillo et al. (2008), Bautista-Capetillo, Zavala e Playan (2012) que observaram o aumento da energia cinética com o aumento da distância da base do aspersor. Isso pode ser justificado pela diferença do mecanismo de fracionamento de gota do aspersor Super 10 em relação aos equipamentos utilizados nesses trabalhos, conforme já observado na avaliação da uniformidade de distribuição de água e no comportamento do perfil uniforme dos diâmetros de gota ao longo do raio.

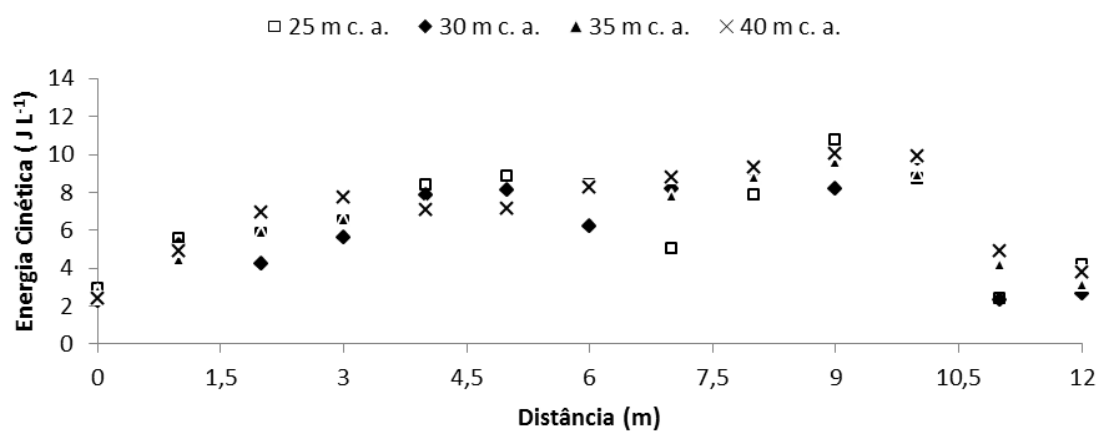


Figura 15. Energia cinética por unidade de volume em função da distância da base do aspersor Super 10 com bocal verde operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

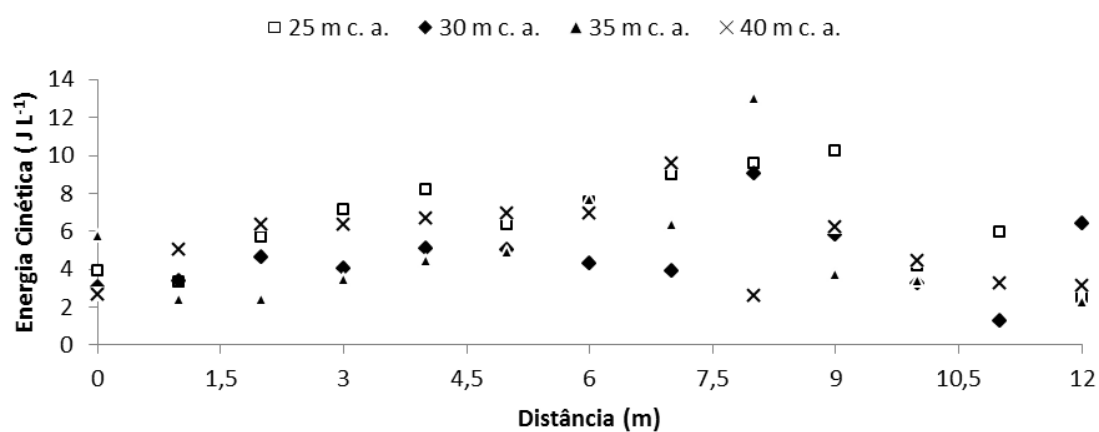


Figura 16. Energia cinética por unidade de volume em função da distância da base do aspersor Super 10 com bocal amarelo operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

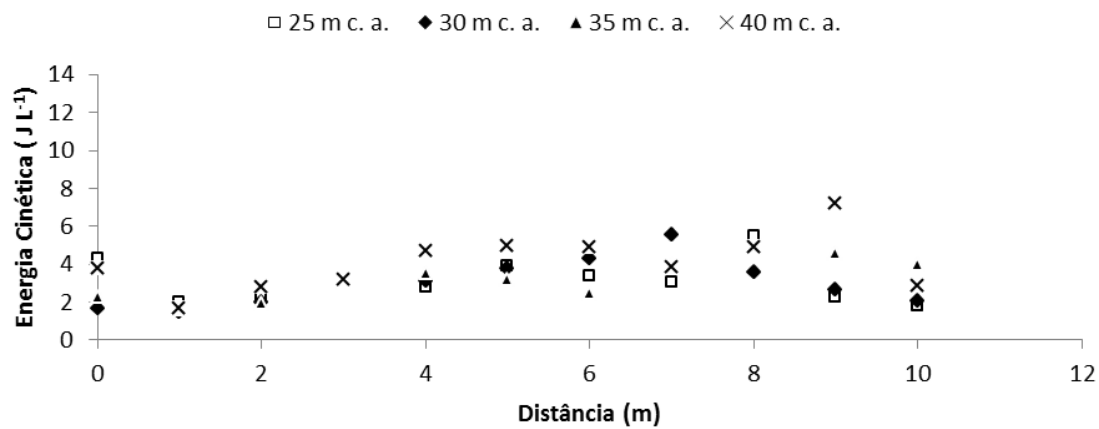


Figura 17. Energia cinética por unidade de volume em função da distância da base do aspersor Super 10 com bocal azul operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

4.6 Fluxo de energia cinética das gotas aspergidas pelo aspersor Super 10

As Tabelas 25 a 27 apresentam os valores do fluxo de energia cinética por unidade de área e tempo (δ_p), a energia cinética por unidade de volume (E_{kt}) e a taxa de precipitação do aspersor (R_p) para os bocais verde, amarelo e azul operando com espaçamentos de 6x6, 9x9 e 12x12 m entre aspersores e linhas. Embora não seja a maior vazão entre todas as condições avaliadas, o bocal verde operando com pressão de 30 m c. a. apresentou maior fluxo de energia cinética ($0,03719 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) devido à sua distribuição de gotas. Pode-se observar na Figura 12 e na Tabela 18, que este emissor operando com 30 m c. a. apresentou menor amplitude na distribuição do volume aplicado no perfil radial (%) que as demais condições avaliadas, justificando a maior energia cinética devido à significativa participação percentual das gotas de maior volume.

Ainda em relação ao fluxo de energia cinética, não se observou comportamento padrão para os bocais verde e amarelo. Para o bocal azul, de menor vazão, houve aumento do fluxo de energia cinética à medida que se aumentou a pressão, quando avaliados os mesmos espaçamentos, corroborando com os resultados obtidos por Bautista-Capetillo, Zavala e Playan (2012).

Tabela 25. Fluxo de energia Cinética por unidade de área e tempo (δ_p), energia cinética por unidade de volume (E_{kt}) e a taxa de precipitação do aspersor (R_p) para o bocal verde operando com 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Pressão de operação (m c. a.)	Taxa de Precipitação (mm h^{-1})	Taxa de Precipitação ($\text{L m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Espaçamento (m x m)	Energia Cinética (J L^{-1})	Fluxo de Energia Cinética ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
25	14,96	0,004156	6x6	6,54	0,02718
25	6,65	0,001847	9x9	6,54	0,01208
25	3,74	0,001039	12x12	6,54	0,00680
30	16,55	0,004597	6x6	8,09	0,03719
30	7,36	0,002044	9x9	8,09	0,01654
30	4,14	0,001150	12x12	8,09	0,00930
35	18,01	0,005003	6x6	6,36	0,03182
35	8,00	0,002222	9x9	6,36	0,01413
35	4,50	0,001250	12x12	6,36	0,00795
40	19,36	0,005378	6x6	6,90	0,03711
40	8,61	0,002392	9x9	6,90	0,01650
40	4,84	0,001344	12x12	6,90	0,00927

Tabela 26. Fluxo de energia cinética por unidade de área e tempo (δ_p), energia cinética por unidade de volume (E_{kt}) e a taxa de precipitação do aspersor (R_p) para o bocal amarelo operando com 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Pressão de operação (m c. a.)	Taxa de Precipitação (mm h^{-1})	Taxa de Precipitação ($\text{L m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Espaçamento (m x m)	Energia Cinética (J L^{-1})	Fluxo de Energia Cinética ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
25	12,16	0,003378	6x6	7,53	0,025435
25	5,41	0,001503	9x9	7,53	0,011316
25	3,04	0,000844	12x12	7,53	0,006359
30	13,46	0,003739	6x6	5,23	0,019554
30	5,98	0,001661	9x9	5,23	0,008688
30	3,37	0,000936	12x12	5,23	0,004896
35	14,12	0,003922	6x6	6,92	0,027142
35	6,28	0,001744	9x9	6,92	0,012072
35	3,53	0,000981	12x12	6,92	0,006785
40	15,26	0,004239	6x6	6,75	0,028613
40	6,78	0,001883	9x9	6,75	0,012713
40	3,82	0,001061	12x12	6,75	0,007163

Tabela 27. Fluxo de energia cinética por unidade de área e tempo (δ_p), energia cinética por unidade de volume (E_{kt}) e a taxa de precipitação do aspersor (R_p) para o bocal azul operando com 25, 30, 35 e 40 m c. a.

Pressão de operação (m c. a.)	Taxa de Precipitação (mm h^{-1})	Taxa de Precipitação ($\text{L m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Espaçamento (m x m)	Energia Cinética (J L^{-1})	Fluxo de Energia Cinética ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
25	9,99	0,002775	6x6	3,04	0,008436
25	4,44	0,001233	9x9	3,04	0,003749
25	2,50	0,000694	12x12	3,04	0,002111
30	11,00	0,003056	6x6	2,84	0,008678
30	4,89	0,001358	9x9	2,84	0,003858
30	2,75	0,000764	12x12	2,84	0,002169
35	11,88	0,003300	6x6	3,05	0,010065
35	5,28	0,001466	9x9	3,05	0,004473
35	2,97	0,000825	12x12	3,05	0,002516
40	12,82	0,003561	6x6	3,45	0,012286
40	5,70	0,001583	9x9	3,45	0,005463
40	3,21	0,000892	12x12	3,45	0,003076

Nas Figuras 18 a 20 foi observado efeito linear ($p < 0,01$) para os três bocais avaliados com a variação do fluxo de energia cinética se correlacionando com a taxa de precipitação ($r_{\text{verde}} = 0,9826$, $r_{\text{amarelo}} = 0,9701$, $r_{\text{azul}} = 0,9893$). O estudo de regressão estimou que entre 94,12 e 97,88% da variabilidade do fluxo de energia cinética pode ser explicado pela variação da taxa de precipitação, para os três bocais avaliados. Segundo King e Bjorneberg (2012), é importante a observação desse efeito devido aos esforços por parte dos fabricantes no desenvolvimento de aspersores com maior raio de molhamento, com o objetivo de reduzir a taxa de precipitação, que por consequência tendem também a reduzir o fluxo de energia cinética transmitido para o solo através das gotas de água aspergidas. Entretanto, é válido ressaltar que o fluxo de energia cinética é função também do espectro de diâmetros de gotas aspergidas, por meio da energia cinética aplicada por unidade de volume (Equação 13) e por isso, não necessariamente a simples redução da taxa de precipitação através do aumento do raio de molhamento resultará em redução do fluxo de energia cinética. Esse contraste pode ser observado na Tabela 25 quando comparado o fluxo de energia cinética para as pressões de 30 e

40 m c. a. no espaçamento 6x6 m. Embora o aspersor operando com pressão de 40 m c. a. apresente taxa de precipitação cerca de 17% maior, o espectro de gotas na pressão de 30 m c. a. apresenta (Tabela 20) maior participação % em volume das gotas de maior diâmetro (diâmetro > 2 mm) que na pressão de 40 m c. a. e por isso é dotada de maior energia cinética por unidade de volume de água aspergida, compensando assim a menor taxa de precipitação, mostrando a importância do projeto e design do mecanismo de fracionamento do jato.

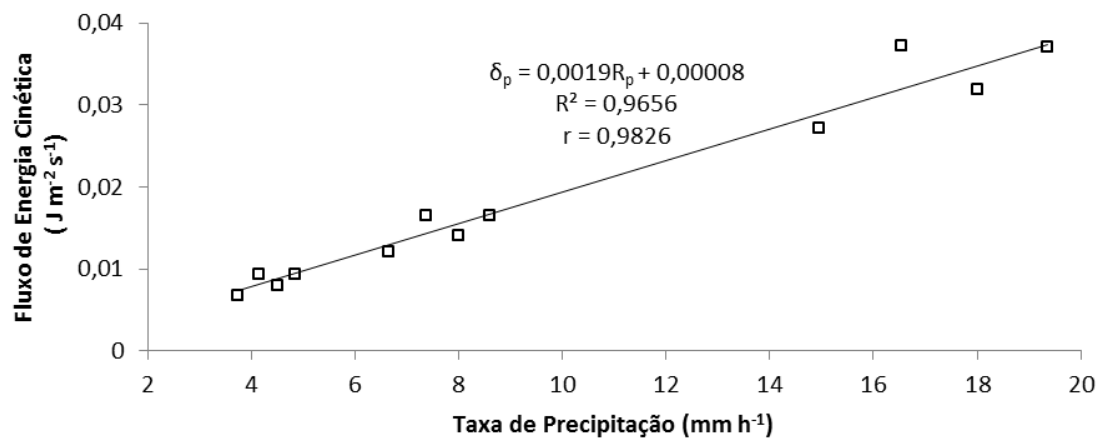


Figura 18. Correlação linear entre a taxa de precipitação (R_p) e o fluxo de energia cinética (δ_p) do aspersor Super 10 com bocal verde operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

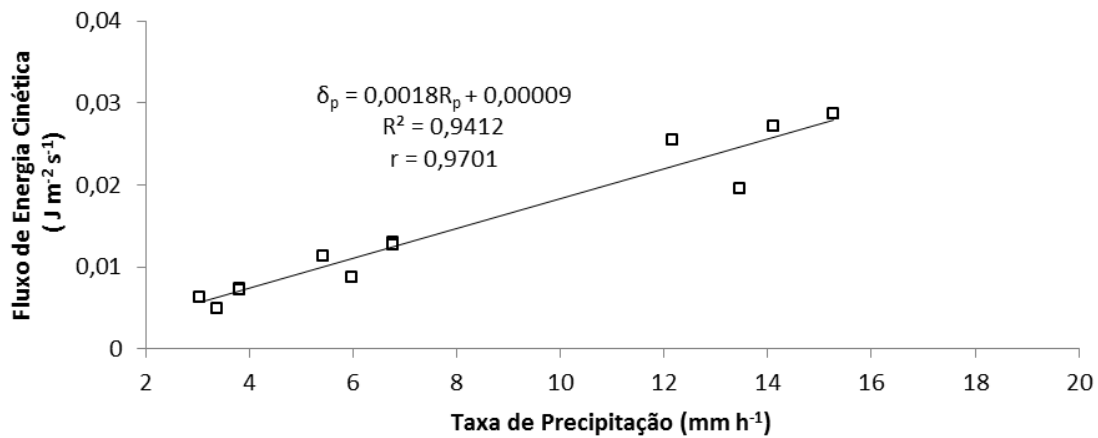


Figura 19. Correlação linear entre a taxa de precipitação (R_p) e o fluxo de energia cinética (δ_p) do aspersor Super 10 com bocal amarelo operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

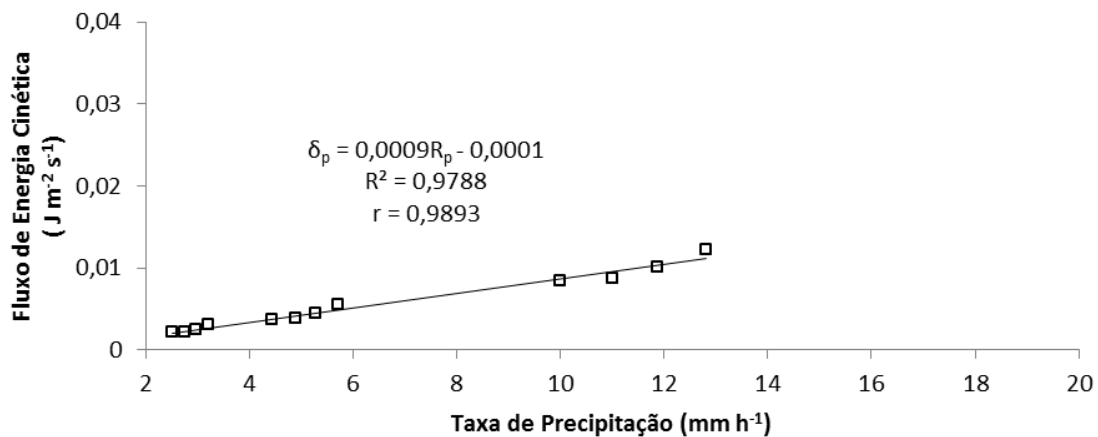


Figura 20. Correlação linear entre a taxa de precipitação (R_p) e o fluxo de energia cinética (δ_p) do aspersor Super 10 com bocal azul operando nas pressões de 25, 30, 35 e 40 m c. a.

4.7 Simulação da erosividade e aplicação na Equação Universal de Perda de Solo

A erosividade de irrigação (R_i) e a Perda anual de Solo sob o cenário apresentado por Miqueloni, Bueno e Ferraud (2012) foram estimadas a partir das Equações 15 e 16 e são apresentadas nas Tabelas 28 a 30. De maneira geral, observa-se que os bocais de maior vazão (Tabela 7: nas mesmas pressões: $Q_{\text{verde}} > Q_{\text{amarelo}} > Q_{\text{azul}}$) apresentaram

através dos dados simulados as maiores perdas anuais de solo, quando comparadas as mesmas pressões de operação e os mesmos espaçamentos entre aspersores e linhas. Em todos os bocais avaliados (Tabelas 28 a 30) ficou evidente que os menores espaçamentos (6 x 6) apresentaram perdas anuais de solo cerca de 75% superiores aos maiores espaçamentos (12 x 12), devido às maiores lâminas aplicadas.

Segundo dados obtidos por Lombardi Neto e Bertoni (1975), os limites de tolerância de perdas de solo, que representam a quantidade de solo que pode ser perdida pela erosão acelerada, mantendo os níveis iniciais de fertilidade com equivalente produtividade, por um dado período de tempo, para Argissolos estão entre 4,5 a 9,1 t ha⁻¹ ano⁻¹, indicando que algumas faixas de operação do equipamento, para as condições observadas por Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012), e principalmente nos menores espaçamentos (6x6 e 9x9), podem estar acima do tolerável. Todos os dados hachurados (Tabelas 28 a 30) e classificados como Perda de Solo Moderada, por FAO (1980), se apresentaram acima dos limites de tolerância.

Em experimento realizado por Santos et al. (2003a) com o objetivo de avaliar a perda de solo resultante de três períodos de trinta minutos de irrigação por aspersão com gotas possuindo energia cinética estimada em 17 J L⁻¹, em dez diferentes tipos de solo e com coletas do escoamento superficial a cada cinco minutos, observaram-se perdas de até 2,5 t ha⁻¹ ano⁻¹ de solo. Embora possua energia cinética superior às calculadas na Tabela 24 para o aspersor Super 10, é válido ressaltar que os ensaios realizados por Santos et al. (2003a) foram conduzidos por período inferior ao simulado nas Tabelas 28 a 30, com condições de relevo mais suave e em solos menos suscetíveis ao processo erosivo (erodibilidade inferior à obtida por Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012)) justificando, em alguns casos, as perdas inferiores às simuladas. Conforme a proposta de estimativa de perda de solo a partir da irrigação (Equações 13 a 15), as perdas de solo são funções além da energia cinética por unidade de volume, da taxa de precipitação do aspersor, da lâmina aplicada por ano e dos fatores restantes da Equação Universal da Perda de Solos (Erodibilidade, Fator topográfico, Fator de cobertura e o Fator de práticas de controle de erosão). Em trabalho realizado por

Bjorneberg, Westermann e Aase (2002) em irrigação por superfície e aplicando 1000 mm de lâmina durante o período irrigado foram obtidas perdas de 10 t ha⁻¹ de solo.

Tabela 28. Estimativa da erosividade de irrigação (R_i) para o bocal verde do aspersor Super 10 operando com 25, 30, 35 e 40 m c. a. em função de três espaçamentos entre aspersores e linhas (6x6, 9x9 e 12x12 m), quatro lâminas anuais de irrigação (560, 672 e 840 mm ano⁻¹) em função dos fatores obtidos por Miqueloni, Bueno e Ferraudo (2012).

Pressão (m c. a.)	Espaçamento (m x m)	Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)			Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)		
		560	672	840	560	672	840
		Erosividade de Irrigação (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)			Perda de Solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)		
25	6x6	547,95	657,54	821,93	10,60*	12,72*	15,90*
25	9x9	243,52	292,22	365,28	4,71	5,65	7,07
25	12x12	136,99	164,39	205,48	2,65	3,18	3,97
30	6x6	749,74	899,69	1124,62	14,50*	17,40*	21,75*
30	9x9	333,36	400,04	500,05	6,45	7,74	9,67*
30	12x12	187,56	225,07	281,34	3,63	4,35	5,44
35	6x6	641,47	769,77	962,21	12,41*	14,89*	18,61*
35	9x9	284,90	341,88	427,35	5,51	6,61	8,27
35	12x12	160,27	192,33	240,41	3,10	3,72	4,65
40	6x6	748,10	897,72	1122,15	14,47*	17,37*	21,71*
40	9x9	332,74	399,28	499,11	6,44	7,72	9,65*
40	12x12	186,96	224,35	280,43	3,62	4,34	5,42

Legenda: Dados identificados com hachuras representam valores da perda de solo simulada classificada como Moderada segundo a FAO (1980). Dados identificados com asterisco (*) apresentam valor acima do limite máximo de tolerância (9,1 t ha⁻¹ ano⁻¹) apresentado por Lombardi Neto e Bertoni (1975).

Tabela 29. Estimativa da erosividade de irrigação (R_i) para o bocal amarelo do aspersor Super 10 operando com 25, 30, 35 e 40 m c. a. em função de três espaçamentos entre aspersores e linhas (6x6, 9x9 e 12x12 m), quatro lâminas anuais de irrigação (560, 672 e 840 mm ano⁻¹) em função dos fatores obtidos por Miqueloni, Bueno e Ferraudó (2012).

Pressão (m c. a.)	Espaçamento (m x m)	Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)			Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)		
		560	672	840	560	672	840
		Erosividade de Irrigação (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)			Perda de Solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)		
25	6x6	512,76	615,32	769,14	9,92*	11,90*	14,88*
25	9x9	228,13	273,75	342,19	4,41	5,30	6,62
25	12x12	128,19	153,83	192,29	2,48	2,98	3,72
30	6x6	394,22	473,06	591,32	7,63	9,15*	11,44*
30	9x9	175,14	210,17	262,71	3,39	4,07	5,08
30	12x12	98,70	118,44	148,05	1,91	2,29	2,86
35	6x6	547,18	656,61	820,77	10,58*	12,70*	15,88*
35	9x9	243,36	292,03	365,04	4,71	5,65	7,06
35	12x12	136,79	164,15	205,19	2,65	3,18	3,97
40	6x6	576,83	692,19	865,24	11,16*	13,39*	16,74*
40	9x9	256,28	307,54	384,43	4,96	5,95	7,44
40	12x12	144,40	173,28	216,59	2,79	3,35	4,19

Legenda: Dados identificados com hachuras representam valores da perda de solo simulada classificada como Moderada segundo a FAO (1980). Dados identificados com asterisco (*) apresentam valor acima do limite máximo de tolerância (9,1 t ha⁻¹ ano⁻¹) apresentado por Lombardi Neto e Bertoni (1975).

Tabela 30. Estimativa da erosividade de irrigação (R_i) para o bocal azul do aspersor Super 10 operando com 25, 30, 35 e 40 m c. a. em função de três espaçamentos entre aspersores e linhas (6x6, 9x9 e 12x12 m), quatro lâminas anuais de irrigação (560, 672 e 840 mm ano⁻¹) em função dos fatores obtidos por Miqueloni, Bueno e Ferraudo (2012).

Pressão (m c. a.)	Espaçamento (m x m)	Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)			Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)		
		560	672	840	560	672	840
		Erosividade de Irrigação (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)			Perda de Solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)		
25	6x6	170,07	204,08	255,10	3,29	3,95	4,93
25	9x9	75,59	90,70	113,88	1,46	1,75	2,20
25	12x12	42,56	51,07	63,84	0,82	0,99	1,23
30	6x6	174,94	209,93	262,42	3,38	4,06	5,08
30	9x9	77,77	93,32	116,66	1,50	1,81	2,26
30	12x12	43,74	52,48	65,60	0,85	1,02	1,27
35	6x6	202,91	243,49	304,37	3,93	4,71	5,89
35	9x9	90,18	108,22	135,27	1,74	2,09	2,62
35	12x12	50,73	60,87	76,09	0,98	1,18	1,47
40	6x6	247,68	297,22	371,52	4,79	5,75	7,19
40	9x9	110,12	132,15	165,19	2,13	2,56	3,20
40	12x12	62,02	74,42	93,03	1,20	1,44	1,80

Pode-se observar na Tabela 28, para o bocal verde, que cerca de 33,3% dos espaçamentos avaliados, apresentaram grau Moderado de classificação de perda anual de solo, segundo classificação da FAO (1980); para o bocal amarelo foram encontrados 25% dos dados nessa classificação (Tabela 29); enquanto que para o bocal azul, todas as perdas de solo simuladas foram consideradas através da classificação da FAO (1980) como Nenhuma ou Ligeira (Tabela 30). É importante enfatizar que mesmo sob característica de solo considerado de alta erodibilidade e declividade (CARVALHO, 2008), o equipamento quando utilizado no maior espaçamento (12x12) apresentou perdas potenciais simuladas menores que os limites de tolerâncias (LOMBARDI NETO; BERTONI, 1975) e classificadas como Ligeira ou Nenhuma (FAO, 1980).

Em relação às perdas de solo simuladas através do cenário apresentado por Valle Júnior (2008), estas são apresentadas nas Tabelas 31 a 33. Pode-se observar que todas as simulações de perdas de solo foram inferiores a 1 t ha⁻¹ ano⁻¹, classificadas

como Nenhuma ou Ligeira, segundo classificação da FAO (1980), enfatizando a grande influência dos fatores de erodibilidade, cobertura do solo, práticas conservacionistas e do fator topográfico, que levaram à um potencial de perda de solo cerca de 24 vezes menor quando comparados os mesmos cenários de erosividade.

Para Latossolos, Lombardi Neto e Bertoni (1975) indicam os limites de tolerância de perda de solos entre 9,8 e 15,0 t ha⁻¹ ano⁻¹, o que indica conforme dados obtidos nas Tabelas 31 a 33 que para as condições estabelecidas por Valle Júnior (2008), o equipamento pode operar sob perdas bem abaixo da tolerável.

Tabela 31. Estimativa da erosividade de irrigação (R_i) para o bocal verde do aspersor Super 10 operando com 25, 30, 35 e 40 m c. a. em função de três espaçamentos entre aspersores e linhas (6x6, 9x9 e 12x12 m), quatro lâminas anuais de irrigação (560, 672 e 840 mm ano⁻¹) em função dos fatores obtidos por Valle Júnior (2008).

Pressão (m c. a.)	Espaçamento (m x m)	Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)			Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)		
		560	672	840	560	672	840
		Erosividade de Irrigação (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)			Perda de Solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)		
25	6x6	547,95	657,54	821,93	0,45	0,54	0,68
25	9x9	243,52	292,22	365,28	0,20	0,24	0,30
25	12x12	136,99	164,39	205,48	0,11	0,14	0,17
30	6x6	749,74	899,69	1124,62	0,62	0,74	0,93
30	9x9	333,36	400,04	500,05	0,28	0,33	0,41
30	12x12	187,56	225,07	281,34	0,15	0,19	0,23
35	6x6	641,47	769,77	962,21	0,53	0,64	0,79
35	9x9	284,90	341,88	427,35	0,24	0,28	0,35
35	12x12	160,27	192,33	240,41	0,13	0,16	0,20
40	6x6	748,10	897,72	1122,15	0,62	0,74	0,93
40	9x9	332,74	399,28	499,11	0,27	0,33	0,41
40	12x12	186,96	224,35	280,43	0,15	0,19	0,23

Tabela 32. Estimativa da erosividade de irrigação (R_i) para o bocal amarelo do aspersor Super 10 operando com 25, 30, 35 e 40 m c. a. em função de três espaçamentos entre aspersores e linhas (6x6, 9x9 e 12x12 m), quatro lâminas anuais de irrigação (560, 672 e 840 mm ano⁻¹) em função dos fatores obtidos por Valle Júnior (2008).

Pressão (m c. a.)	Espaçamento (m x m)	Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)			Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)		
		560	672	840	560	672	840
		Erosividade de Irrigação (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)			Perda de Solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)		
25	6x6	512,76	615,32	769,14	0,42	0,51	0,63
25	9x9	228,13	273,75	342,19	0,19	0,23	0,28
25	12x12	128,19	153,83	192,29	0,11	0,13	0,16
30	6x6	394,22	473,06	591,32	0,33	0,39	0,49
30	9x9	175,14	210,17	262,71	0,14	0,17	0,22
30	12x12	98,70	118,44	148,05	0,08	0,10	0,12
35	6x6	547,18	656,61	820,77	0,45	0,54	0,68
35	9x9	262,74	315,29	394,11	0,22	0,26	0,33
35	12x12	148,03	177,64	222,05	0,12	0,15	0,18
40	6x6	576,83	692,19	865,24	0,48	0,57	0,71
40	9x9	256,28	307,54	384,43	0,21	0,25	0,32
40	12x12	144,40	173,28	216,59	0,12	0,14	0,18

Tabela 33. Estimativa da erosividade de irrigação (R_i) para o bocal azul do aspersor Super 10 operando com 25, 30, 35 e 40 m c. a. em função de três espaçamentos entre aspersores e linhas (6x6, 9x9 e 12x12 m), quatro lâminas anuais de irrigação (560, 672 e 840 mm ano⁻¹) em função dos fatores obtidos por Valle Júnior (2008).

Pressão (m c. a.)	Espaçamento (m x m)	Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)			Lâmina de Irrigação Anual (mm ano ⁻¹)		
		560	672	840	560	672	840
		Erosividade de Irrigação (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)			Perda de Solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)		
25	6x6	170,07	204,08	255,10	0,14	0,17	0,21
25	9x9	75,59	90,70	113,88	0,06	0,07	0,09
25	12x12	42,56	51,07	63,84	0,04	0,04	0,05
30	6x6	174,94	209,93	262,42	0,14	0,17	0,22
30	9x9	77,77	93,32	116,66	0,06	0,08	0,10
30	12x12	43,74	52,48	65,60	0,04	0,04	0,05
35	6x6	202,91	243,49	304,37	0,17	0,20	0,25
35	9x9	90,18	108,22	135,27	0,07	0,09	0,11
35	12x12	50,73	60,87	76,09	0,04	0,05	0,06
40	6x6	247,68	297,22	371,52	0,20	0,25	0,31
40	9x9	110,12	132,15	165,19	0,09	0,11	0,14
40	12x12	62,02	74,42	93,03	0,05	0,06	0,08

5. CONCLUSÕES

1. O mecanismo de fracionamento do jato do aspersor Super 10 é mais eficiente que o tradicional braço defletor, pois o equipamento apresentou alta uniformidade de distribuição de água, inclusive nos maiores espaçamentos calculados, e baixa amplitude dos diâmetros de gotas na maioria das situações simuladas.

2. O raio de molhamento é pouco influenciado com o aumento da pressão de operação do equipamento, mantendo boa uniformidade e pequena amplitude de intensidade de precipitação entre os pontos do perfil radial.

3. O banco de dados formado permite mensurar o diâmetro de gotas e a velocidade terminal destas, possibilitando a caracterização da energia cinética por gota e por volume, o fluxo de energia cinética por unidade de área e tempo e o potencial da erosividade de irrigação para o aspersor Super 10. A técnica proposta possibilita

estimar o potencial de perda de solo relativa à irrigação utilizando o aspersor Super 10 em diferentes cenários, permitindo o uso estratégico da ferramenta do ponto de vista ambiental e econômico ou auxiliar na prática da gestão das atividades agrícolas.

4. O aspersor Super 10 apresentou excelente desempenho, com CUC e CUD acima de 90 e 84% respectivamente em diversas combinações entre pressões e bocais e com espaçamentos a partir de 10 x 10 m.

5. A pressão de 40 m c. a., aliada ao espaçamento de 12 x 12 m entre aspersores, para o bocal verde, apresenta a melhor relação entre alta uniformidade de distribuição de água e baixa perda de solo na condição simulada mais favorável ao processo erosivo, principalmente sob 100 e 120% dos valores de referência da lâmina simulada aplicada.

6. Para os bocais amarelo e azul, o espaçamento de 12 x 12 m tem boa uniformidade de distribuição de água aliada a baixas perdas de solo, principalmente para o bocal azul.

7. Os diâmetros de gotas se mantiveram praticamente constantes ao longo do raio de molhamento do aspersor. As medições efetuadas detectaram a presença maciça das gotas de menor diâmetro ao longo de todo o raio de molhamento em todas as condições avaliadas.

6. REFERÊNCIAS

ADEOYE, K. B. Physical changes induced by rainfall in the surface layer of an Alfisol, northern Nigeria. **Geoderma**, v. 39, p. 59-66, 1986.

ALENCAR, C. A. B. de; OLIVEIRA, R. A. de; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CUNHA, F. da; FIGUEIREDO, J. L. A. Produção de capins cultivados sob pastejo em diferentes lâminas de irrigação e estações anuais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 680-686, 2009.

ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P. A.; PRUSKY, F. F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 337-344, 2002.

ALLEN, R.G. **Cath-3D sprinkler pattern analysis software**: user's manual. Logan: Utah State University, Department of Biological and Irrigation Engineering, 1992. 14 p.

ALVARES, M. T. P.; PIMENTA, M. T. Erosão hídrica e transporte sólido em pequenas bacias hidrográficas. In: Congresso da água, 4., 1998, Lisboa-Portugal. **Anais...**Lisboa: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos: APRH, 1998. 1 CD.

ANDRADE, L. A. **Estudo da uniformidade de emissão de água utilizando diferentes espaçamentos entre gotejadores na linha lateral**. 2009. 105 p. Tese (Doutorado em Agronomia. Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Equipamentos de irrigação agrícola**: Aspersores rotativos. Parte 1: Requisitos para projetos e operação. Projeto 04:015.08-012. Rio de Janeiro, 1999a. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Equipamentos de irrigação agrícola**: aspersores rotativos. Parte 2: Uniformidade de distribuição e método de ensaio. Projeto 04:015.08-013. Rio de Janeiro, 1999b. 8 p.

BAUTISTA-CAPETILLO, C.; PLAYAN, E. J. La teoría balística aplicada en el Riego por aspersión. **Revista Investigación Científica**, v. 4, n. 3, 13p. 2008.

BAUTISTA-CAPETILLO, C.; PLAYAN, E.; SALVADOR, R.; MONTERO, J.; BURGUETE, J.; TARJUELO, J. M.; ZAPATA, N.; GONZÁLEZ, T. J. Energía cinética de las gotas emitidas por un aspersor. In: CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS, 26., 2008, Huesca. **Anais...** Huesca, 2008.

BAUTISTA-CAPETILLO, C.; SALVADOR, R.; BURGUETE, J.; MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; ZAPATA, N.; GONZALEZ, J.; PLAYAN, E. Comparing methodologies for the characterization of water drops emitted by an irrigation sprinkler. **Transactions of the ASABE**, v. 52, n. 5, 1493-1504, 2009.

BAUTISTA-CAPETILLO, C.; ZAVALA, M.; PLAYAN, E. J. Kinetic energy in sprinkler irrigation: diferente sources of drop diameter and velocity. **Irrigation Science**, v. 30, n. 1, p. 29-41, 2012.

BERNARDI, C. C. **Reuso de água para irrigação**. Brasília: ISAEFGV/ ECOBUSINESS SCHOOL, 2003. 52p.

BERNARDO, S. Impacto Ambiental da Irrigação no Brasil. **A Água em Revista**, Belo Horizonte, n.5, p. 30-35, 1995.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; AMARAL, A. J. Erodibilidade de um Cambissolo Húmico aluminico léptico, determinada sob chuva natural entre 1989 e 1998 em Lages - SC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 465-471, 2002.

BERTRAND, A. R.; SOR, K. The effects of rainfall intensity on soil structure and migration of colloidal materials in soils. **Soil Science Society of American**, v. 26, p. 297-300, 1962.

BJORNEBERG, D. L.; WESTERMANN, D. T.; AASE, J. L. K. Nutrient losses in surface irrigation runoff. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, n. 6, p. 524-529, 2002.

BRALTS, V. F.; WU, I. P.; GITLIN, H. M. Manufacturing variation and drip irrigation uniformity. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 1, p. 113-119, 1981.

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J. M.; MONTERO, J. SIRIAS: A simulation model for sprinkler irrigation. Part I: Description of model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p. 73-84, 2001.

CARTER, C. E.; GREER, J. D.; BRAUD, H. J. FLOYD, J. M. Raindrop characteristics in South Central United States. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 6, p. 1033-1037, 1974.

CARVALHO, J. A. **Tamanho de gotas e uniformidade de distribuição de água de dois aspersores de média pressão**. 1991. 73p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 600p.

CÉSAR, J. H, F.; ROCHA, F. A.; SILVA, A. M. da; MELLO, R. de. Desempenho hidráulico e diâmetro de gotas de um canhão do tipo turbina. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 2, p. 193-204, 2005.

CHRISTOFIDIS, D. O futuro da irrigação e a gestão das águas. **Item**, Brasília, n. 80, p. 40-47, 2008.

CHRISTOFIDIS, D. **Água: gênese, gênero e sustentabilidade alimentar no Brasil**. Brasília, 2006. 18p.

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

CRIDDLE, W. D.; DAVIS, S.; PAIR, C. H.; SHOCKLEY, D. G. **Methods for evaluating irrigation systems**. Washington: SCS-USDA, 1956. 24 p. (Agricultural handbook, 82).

CONCEIÇÃO, M. A. F. **Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento**. 2002. 121f. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

CUNHA, C. M. L. **Quantificação e mapeamento das perdas de solo por erosão com base na malha fundiária**. 1997. 152f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.

DA SILVA MARTINS, C. A.; REIS, E. F. dos; PASSOS, R. R.; GARCIA, G. de O. Desempenho de sistemas de irrigação por aspersão convencional na cultura do milho (*Zea mays* L.). **Idesia**, v. 29, n. 3, p. 65-74, 2011.

DECHMI, F.; PLAYAN, E.; FACI, J.; CRAVERO, J. Simulation of sprinkler irrigation water uniformity impact on corn yield. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 8, p. 143-151, 2010.

EIGEL, J. D.; MOORE, I. D. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. **Transactions of the ASAE**, v. 27, n. 4, p. 1079-1084, 1983

EL-BERRY, A. M.; RAMADAN, M. H.; EL-ADLY, A. M.; MAHMOUD, M. H. Effect of nozzle shape and pressure on droplet size distribution. **Misr Journal of Agricultural Engineering**. V, 6, n. 1, p. 208-223, 2009.

FAO. **Metodologia provisional para evaluation de la degradacion de los suelos**. Roma: FAO PNUMA: UNESCO. 1980. 86p.

FARIA, L. C.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E. de; PRADO, G. do. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 19-27, 2009.

FARIA, L. C.; BESKOW, S.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E. de. Modelagem dos efeitos do vento na uniformidade da irrigação por aspersão: aspersores de tamanho médio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 133-141, 2012.

FOLEGATTI, M. V. **Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso**. 1996. 84f. Tese (Livre-Docência). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

FRISO, D.; BORTOLINI, L. Calculation of sprinkler droplet-size spectrum from water distribution radial curve. **International Journal of Energy; Technology**, v. 24, n. 2, p. 1-11, 2010.

FRÓES, M. N.; KARAM, K. F. Possibilidade de gestão de recursos hídricos: a situação na sub-bacia do Arroio Duro – Camaquã – RS. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 1, p. 757-760, 2007.

GUIRRA, A. P. P. M.; ZANINI, J. R.; SILVA, E. R. da. Desempenho do aspersor NaanDanJain 435 em função da posição do defletor. **Científica**, Jaboticabal, v. 41, n. 1, p.21-32, 2013.

HALL, M. J. Use of the stain method in determining the drop-size distributions of coarse liquid sprays. **Transactions of the ASAE**, v. 13, n. 1, p. 33-41, 1970.

HILLS, D. J.; GU, Y. Sprinkler volume mean droplet diameter as a function of pressure. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 2, p. 471-476, 1989.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 17, n. 2, p. 678-684, 1974.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design parameters**. Glendora, Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133p.

KINCAID, D. C.; SOLOMON, K. H.; OLIPHANT, J. C. Drop size distributions for irrigation sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v. 39, n. 3, p. 839-845, 1996.

KINCAID, D. C. Spraydrop kinetic energy from irrigation sprinklers. **Transactions of the ASCE**, Reston, v. 121, n. 2, p. 152-158, 1996.

KING, B. A.; BJORNEBERG, D. L. Characterizing droplet kinetic energy applied by moving spray-plate center-pivot irrigation sprinkler. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 1, p. 137-145, 2010.

KING, B. A.; BJORNEBERG, D. L. Droplet kinetic energy of moving spray-plate center-pivot irrigation sprinklers. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 2, p. 505-512, 2012.

KING, B. A.; KINCAID, D. C. **Optimal performance from center pivot sprinkler systems**. University of Idaho Coop. Ext. System, Agricultural Experiment Station, 1997, 20p. (Bulletin 797)

KING, B. A.; WINWARD, T. W.; BJORNEBERG, D. L. Laser precipitation monitor for measurement of drop size and velocity of moving sprayer plate sprinklers. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 26, p. 263-271, 2010.

KING, B. A.; WINWARD, T. W.; BJORNEBERG, D. L. Comparison of sprinkler droplet size and velocity measurements using a laser precipitation meter and photographic method. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, v. 2, p. 1579-1591, 2013.

KOHL, R. A. Drop size distribution from medium-sized agricultural sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 4, p. 690-693, 1974.

KOHL, R. A.; BERNUTH, R. D. von; HUEBNER, G. Drop size distribution measurement problems using a laser unit. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 1, p. 190-192, 1985.

KOHL, R. A.; DEBOER, D. W. Drop size distributions for a low pressure spray type agricultural sprinkler. **Transactions of the ASAE**, v. 27, n. 6, p. 1836-1840, 1984.

LI, J.; KAWANO, H.; YU, K. Droplet size distributions from different shaped sprinkler nozzles. **Transactions of the ASAE**, v. 37, n. 6, p. 1871-1878, 1994.

LI, J.; KAWANO, H. Simulating water-drop movement from noncircular sprinkler nozzles. **Irrigation and Drainage Engineering**, v. 121, p. 152-158, 1995.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terra para solo do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1975. 12p. (Boletim Técnico, 28).

LUCAS, A. A. T. **Impacto da irrigação na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins**. 2007. 102 p. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

MAIA NETO, R. F. Água para o desenvolvimento sustentável. **A Água em Revista**, Belo Horizonte, n.9, p.21-32, 1997.

MAMEDOV, A. I.; LEVY, G. J.; MIKAILSOY, F. D. Runoff and erosion as affected by soil spatial variation and temporal conditions. **Igdir University Journal of the Institute of Science and Technonology**, v. 2, n. 2, p. 105-112, 2012.

MANTOVANI, E. C. **AVALIA**: Programa de avaliação da irrigação por aspersão e localizada. Viçosa, MG: UFV, 2001.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação**: princípios e métodos. Viçosa: UFV, 2006. 318p.

MARTÍN-BENITO, J. M. T.; GOMEZ, M. V.; PARDO, J. L. Working conditions of sprinkler to optimize application of water. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v. 118, n. 6, p. 895-914, 1992.

MARTINS, P. E. S.; SILVA, E. R. da; LIMA SANTOS, N.; LEMOS FILHO, M. A. F. GALZERANO, L. Práticas de manejo de irrigação como medida de conservação do solo e da água. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 6, n. 10, 2010, 19p.

MARTINS, P. E. S. **Perfil radial e uniformidade de precipitação do aspersor NaanDanJain 427, em função do defletor de ajuste**. 2011. 47f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

MARTINS, P. E. S.; SILVA, E. R. da; ZANINI, J. R. Irrigação e suas interações com os atributos físicos do solo. In: FERNANDES, C. **Tópicos em física do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2012. p. 88-106.

MARTINS, P. E. S.; ZANINI J. R.; SILVA, E. R. da; LEMOS FILHO, M. A. F. Perfil radial e uniformidade de precipitação do aspersor NaanDanJain 427, em função da regulação do defletor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 3-9, 2012.

MIGUEL, P. **Caracterização pedológica, uso da terra e modelagem da perda de solo em áreas de encosta do rebordo do planalto do RS**. 2010. 112f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; RUHOFF, A. L. Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1455-1462, 2010.

MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P.; FERRAUDO, A. S. Análise espacial dos fatores da equação universal de perda de solo em área de nascentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1358-1367, 2012.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Plano Diretor de Agricultura Irrigada de Minas Gerais**: Relatório 7, 153p. 2011.

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

NAANDANJAIN. **Aspersor Super 10**: especificações técnicas. Disponível em: < <http://www.NaanDanJain.com.br/index.php/pt/produtos/irristand/stand-systems/item/download/103> > Acesso em 10 de janeiro de 2014.

OLIVEIRA, R. A. de. **Distribuição de gotas por tamanho e perfil de precipitação de um aspersor fixo**. 1991. 103p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, H. F. E. de; COLOMBO, A.; FARIA, L. C.; PRADO, G. Efeitos da velocidade e da direção do vento na uniformidade de aplicação de água de sistemas autopropelidos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 4, p. 669-678, 2012.

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

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V.; ZOLIN, C. A.; ROMÁN, R. M. S.; JOSÉ, J.V.; Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p.163-176, 2011.

PEREIRA, G. M. **Irrigação por aspersão convencional**. Lavras: FAEPE, 2000. 90 p.

PEREIRA, G. M. Aspersão Convencional. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, 703 p.

PEREIRA, P. H. C.; COLOMBO, A.; RABELO, G. F. O uso da engenharia de automação na redução do consume de energia elétrica em um sistema de irrigação por pivô centrl. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 11., 2013, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBA, 2013.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia - goteo – microaspersion - exudacion**. 3 ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513p.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Composição de perfis radiais de distribuição de água de aspersores. **Irriga**, v. 14, n. 1, p. 41-53, 2009.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Ajuste de parâmetros para distorção da distribuição de água aplicada por canhões hidráulicos em condições de vento. **Irriga**, Botucatu, v. 16, p. 52-69, 2011.

PRADO, G. do; COLOMBO, A. Interpolação de perfis radiais de distribuição de água de aspersores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 355-361, 2013.

PRADO, G. do; COLOMBO, A; OLIVEIRA, H. F E. de; FARIA, L. C. Uniformidade de aplicação de água de equipamentos autopropelidos de irrigação com aspersores de perfil radial triangular, elíptico e retangular. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 3, p. 522-529, 2012.

RAGAB, R. A.. The effects of sprinkler intensity and energy of falling drops on soil surface selling. **Soil Science Society of American**, v. 136, n. 2, p. 117-123, 1983.

REZENDE, R.; FRIZZONE, J. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FREITAS, P. S. L. Influência do espaçamento entre aspersores na uniformidade de distribuição de água acima e abaixo da superfície do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 257-261, 1998.

RIBEIRO, D. R.; DEUS, F. P. de; BARBOSA, E. A.; FEITOSA, D. R. C.; TUTA, N. F.; GONÇALVES, I. Z.; MATSURA, E. E. Uniformidade da umidade do solo para diferentes espaçamentos em um sistema de irrigação por aspersão convencional. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 220-233, 2012.

ROCHA, W. W. **Influência de ângulos setoriais e pressão de serviço na uniformidade de distribuição de água de um equipamento de irrigação autopropelido**. 1998. 46f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ROCHA, E. M. M.; COSTA, R. N. T.; MAPURUNGA, S. M. S.; CASTRO, P. T. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície e no perfil do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 154-160, 1999.

SALVADOR, R.; BAUTISTA-CAPETILLO, C.; BURGUETE, J.; ZAPATA, N.; SERRETA, A.; PLAYAN, E. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers. **Irrigation Science**, v. 27, n. 4, p. 307-317, 2009.

SALVADOR, R.; MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; MORENO, M. A.; BURGUETE, J.; PLAYAN, E.; ZAPATA, N. Caracterización de los diámetros de gotas aplicadas por emisores de máquinas de Riego tipo spray. In: CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS, 30., 2012, Albacete. **Anais...** Albacete, 2012.

SANCHEZ, I.; FACI, J. M.; ZAPATA, N. The effects of pressure, nozzle diameter and meteorological conditions on the performance of agricultural impact sprinklers. **Agricultural Water Management**, v. 102, n. 1, p. 13-24, 2011.

SANTOS, F. L.; REIS, J. L.; MARTINS, O. C.; CASTANHEIRA, N. L.; SERRALHEIRO, R. P. Comparative assessment of infiltration runoff and erosion of sprinkler irrigation soils. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 3, p. 355-364, 2003a.

SANTOS, R. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; FERREIRA, E. J. S.; VANZELA, L. S.; LIMA, R. C. Uniformidade de distribuição de água em irrigação por gotejamento em sub-superfície instalado na cultura de pupunheiras (*Bactris gasipaes* H. B. K.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32, 2003, **Anais...** Goiânia, 2003b.

SEGINER, I. Water distribution from medium pressure sprinklers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 89, p. 13-29, 1963.

SILVA, A. M. da.; MELLO, C. R. de.; CURI, N.; OLIVEIRA, P. M. de. Simulação da variabilidade espacial da erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica de latossolos no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2125-2134, 2008.

SILVA, E. R. da.; MARTINS, P. E. S.; ZANINI, J. R. Manejo da irrigação e atributos físicos do solo. In: FERNANDES, C. **Tópicos em física do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2012. p. 107-128.

SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v. 22, n. 5, p. 1034-1038, 1979.

SOUZA, Z. M. de.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de fatores de erosão em latossolo vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 105-114 2005.

STAMBOULI, T.; ZAPATA, N.; FACI, J. M. Performance of new agricultural impact sprinkler fitted with plastic nozzles. **Biosystems Engineering**, v. 118, p. 39-51, 2014.

SUN, Z.; KANG, Y.; JIANG, S. Effects of water application intensity , drop size and water application amount on the characteristics of topsoil pores under sprinkler irrigation. **Agriculture Water Management**, v. 95, p. 869-876, 2008.

THOMPSON, A. L.; JAMES, L. G. Water droplet impact and its effect on infiltration. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 5, p. 1506-1510, 1985.

VALLE JÚNIOR, R. F. do. **Diagnóstico de áreas de risco de erosão e conflito de uso dos solos na bacia do Rio Uberaba**. 2008. 233f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

VILLAS-BOAS, M. A. **Análise de métodos de amostragem da distribuição espacial de água de aspersores rotativos**. 1994. 121 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA, 1978. 58 p. (Agricultural handbook, 537)