

## DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE MICROASPELADOR PARA DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS

GIULIANI DO PRADO<sup>1</sup>; TIAGO BUENO BRAGA COELHO<sup>1</sup>; ADRIANO CATOSSI TINOS<sup>1</sup>; DENISE MAHL<sup>1</sup> E EDMILSON CESAR BORTOLETTO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Agrícola - DEA, Universidade Estadual de Maringá - UEM, Rodovia PR 482, km 45, CEP: 87.820-000, Cidade Gaúcha-PR, Brasil. E-mail: gprado@uem.br, buenotiagobc@gmail.com, actinos@uem.br, demahl@gmail.com, ecbortoletto@uem.br.

### 1 RESUMO

O trabalho objetivou avaliar o microaspersor Naan Hadar®, modelo 7110, operando na ausência de ventos. Ensaios laboratoriais de distribuição de água foram realizados para 144 condições operacionais de: pressões de serviço (10, 15 e 20 mca), diâmetros de bocais (0,9; 1,0; 1,1 e; 1,2 mm), tipos de insertos (nebulizador - INeb e pequeno alcance - IPalc), alturas de instalação (0,5; 1,0, 1,5 m) e posições verticais (cima e baixo). A altura de instalação proporcionou maiores variações no raio de alcance para o IPalc posicionado para cima (23,4%) do que para baixo (1,3%), para o INeb, essas variações foram de 0,7 a 2,9%. Seis formas geométricas do perfil radial adimensional foram suficientes para caracterizar o microaspersor operando com o INeb e IPalc. Nas simulações da distribuição de água para diferentes arranjos de espaçamentos retangulares e triangulares, verificou-se que: o INeb, independentemente da altura e posição do microaspersor, com espaçamentos próximos a 50% do diâmetro molhado (DM), resultam em elevados valores de coeficiente de uniformidade (CU), e; para o IPalc, a posição do microaspersor para baixo deve ser preferida, pois resulta em altos valores de CU para espaçamentos até 60% do DM.

**Palavras-chave:** altura de instalação, pressão de serviço, diâmetro de bocal.

**PRADO, G; COELHO, T. B. B.; TINOS, A. C.; MAHL, D; BORTOLETTO, E. C.  
MICRO-SPRINKLER WATER DISTRIBUTION FOR DIFFERENT WORKING  
CONDITIONS**

### 2 ABSTRACT

The study aimed to evaluate the Naan Hadar® micro-sprinkler, model 7110, working in no-wind conditions. Laboratory tests of water distribution were performed for 144 working combinations, given by: working pressures (10, 15, and 20 mwc), nozzle diameters (0.9, 1.0, 1.1, and 1.2 mm), insert types (mist sprayer -MSP and small sprayer - SSP), nozzle heights (0.5, 1.0, and 1.5 m) and, vertical positions (upright and inverted). The nozzle height setup resulted in a larger range in the radius of throw for the SSP positioned upright (23.4%) than inverted (1.3%), for the MSP, these variations were from 0.7 to 2.9%. Six geometric shapes of the dimensionless water distribution curve were sufficient to characterize the micro-sprinkler working with MSP and SSP. Running out the water distribution simulations for different spacings in rectangular and triangular layouts, it was found that: the MSP, regardless of the

height and position of the micro-sprinkler, with spacings closer than 50% of the wetted diameter (WD), results in high values of uniformity coefficient (UC), and; for the SSp, the micro-sprinkler inverted position should be preferred, since results in high UC values for spacings up to 60% of WD.

**Keywords:** nozzle height, working pressure, nozzle diameter.

### 3 INTRODUÇÃO

A irrigação por microaspersão caracteriza-se pela aplicação de água pulverizada por meio de emissores (microaspersores), que operam com pressão de serviço em torno de 200 kPa e vazões de 20 a 150 L h<sup>-1</sup> (BERNARDO *et al.*, 2019). A adoção desse tipo de sistema de irrigação está, principalmente, ligada ao menor consumo de água e energia e à elevada eficiência de aplicação de água (PRADO *et al.*, 2021; FERNANDES *et al.*, 2022).

Além da reposição da demanda hídrica para as culturas, a irrigação por microaspersão pode ser utilizada para reduzir a temperatura do ar próximo às plantas, contribuindo, conseqüentemente, com o desenvolvimento fisiológico das culturas (LIU *et al.*, 2021). Os autores supracitados observaram no dossel de plantas cultivadas em ambiente aberto que, os tratamentos que receberam aplicações pulverizadas (2, 4 e 6 mm dia<sup>-1</sup>), por meio de microaspersores, tiveram reduções de temperatura média do ar de 1 a 3°C e aumento da umidade relativa do ar de 11 a 17%. Isso refletiu em maior produtividade e quantidade de açúcar e sólidos solúveis nos frutos da cultura avaliada (Jujube - *Ziziphus jujube*).

Conforme Bortoluzzi e Prado (2017), a irrigação por microaspersão pode ser utilizada no cultivo de culturas em campo aberto e cultivo protegido. Para condições de campo, normalmente, os microaspersores operam de forma isolada, sem sobreposição lateral e com insertos giratórios, que proporcionam maiores alcances do jato. Todavia, em casas de

vegetação, os microaspersores são usualmente empregados em conjunto, invertidos, suspensos e com insertos fixos (placas planas ou ranhuradas), que resultam em menores diâmetros molhados.

As diferentes combinações operacionais (pressão de serviço, diâmetro de bocal, tipo de inserto e altura de instalação) resultam em diferentes formas geométricas do perfil radial de distribuição de água do microaspersor. Para microaspersores que trabalham de forma individual, devem ser buscadas condições operacionais que resultem em perfis radiais com forma geométrica uniforme (perfil F de CHRISTIANSEN, 1942) e que proporcionem altos valores de coeficiente de uniformidade (BORTOLUZZI; PRADO, 2017).

Em contrapartida, para aspersores ou microaspersores que operam em conjunto, devem ser selecionadas condições operacionais que promovam decréscimos graduais na taxa de aplicação de água ao longo do alcance do emissor (perfis A, B e C de CHRISTIANSEN, 1942) para que a uniformidade de aplicação de água seja maximizada com a ocorrência da sobreposição lateral (PRADO, 2016).

A uniformidade de aplicação de água representa a dispersão das lâminas em relação à lâmina média, sendo que, quanto menor for essa dispersão, menores serão as áreas irrigadas em excesso e déficit (FERREIRA *et al.*, 2016). Esses valores de uniformidade (coeficientes) podem ser obtidos após a implantação do sistema de irrigação, a partir de avaliações de campo (IQBAL *et al.*, 2021), ou previamente à implantação do sistema de irrigação por

meio de simulações digitais com os perfis radiais dos emissores (BORTOLUZZI; PRADO, 2017).

Conforme Pradeep *et al.* (2021), avaliações da distribuição de água de sistemas de microaspersão se fazem necessárias para a seleção das condições operacionais que resultem em adequados valores de uniformidade. Entretanto, na literatura, grande parte dos trabalhos traz resultados de avaliação da distribuição de água de sistemas de microaspersão envolvendo apenas pressão de serviço e espaçamentos entre microaspersores (DWIVEDI; PANDYA, 2016; ANDRADE *et al.*, 2017; PATEL *et al.*, 2021).

Dados de distribuição de água de microaspersores operando em diferentes alturas de instalação, formas de instalação associadas à pressão de serviço e diâmetros de bocais, são mais escassos. Dessa forma, o presente trabalho objetivou determinar as características de distribuição de água de um microaspersor trabalhando sob diferentes condições operacionais (pressão de serviço, diâmetro de bocal, tipo de inserto, altura de instalação e posição do microaspersor) e avaliar o resultado das simulações da uniformidade de aplicação de água para as distintas situações de trabalho do microaspersor.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Universidade Estadual de Maringá, Campus do Arenito, em Cidade Gaúcha, PR. Neste estudo foram avaliadas as características de distribuição de água e raio de alcance do microaspersor Naan Hadar<sup>®</sup>, modelo 7110, operando em diferentes condições operacionais.

As características de distribuição de água e o raio de alcance do microaspersor foram determinados para 144 condições operacionais, dadas pela combinação de: i) três pressões de serviço (10, 15 e 20 mca),

expressas em relação ao peso específico da água ( $\gamma = 1.000 \text{ kgf m}^{-3}$ ); ii) quatro diâmetros de bocais (0,9 mm - cinza; 1,0 mm - roxo; 1,1 mm - vermelho e; 1,2 mm - alaranjado); iii) dois tipos de inserto difusor (nebulizador e pequeno alcance); iv) três alturas de instalação do bocal do microaspersor em relação ao topo dos coletores (0,5; 1,0, 1,5 m), e; duas posições de operação do microaspersor (para cima e para baixo).

Previamente aos ensaios de distribuição de água, foram determinadas as relações de vazão *versus* pressão de serviço do microaspersor. Nesses ensaios, com intuito de minimizar o efeito da variação de pressão ao longo da linha de emissores, foi utilizada uma linha de PVC rígido de 1 ½", com diâmetro interno de 40,1 mm e três metros de comprimento. Cinco conectores para acoplamento dos bocais do microaspersor, espaçados em 0,265 m, foram inseridos nessa linha.

Na determinação da vazão, pelo método ponderal ou do peso, os bocais do microaspersor (0,9, 1,0, 1,1 e 1,2 mm) foram submetidos a pressões crescentes (10, 15 e 20 mca). As pressões foram reguladas com auxílio de registro de gaveta e monitoradas com manômetro digital, na escala de 0 a 5  $\text{kgf cm}^{-2}$ , com tomada de pressão acoplada no centro da linha. A vazão de emissão de cada bocal do microaspersor, para uma pressão de operação, foi a vazão média dos cinco emissores avaliados.

Nos ensaios de distribuição de água do microaspersor, foi adotado o método da malha de coletores de água, conforme a norma técnica ISO 8026 (ISO, 2009), sendo os coletores distribuídos em torno do microaspersor com espaçamento de 0,3 x 0,3 m. Esses coletores plásticos, com diâmetro de captação igual a oito centímetros, foram instalados em área plana coberta e os ensaios foram realizados em ambiente fechado na condição de ausência de ventos.

Para aferição da pressão de operação do microaspersor, com auxílio de registro de gaveta, foi empregado um manômetro instalado na altura do bocal do microaspersor e, durante os ensaios, as pressões foram verificadas a cada 15 minutos. Cada ensaio teve duração de aproximadamente uma hora e os volumes de água contidos nos coletores foram transformados em intensidade de aplicação de água.

Conforme sugerido por Bortoluzzi e Prado (2017), ao término de cada ensaio, o valor de vazão determinado em função da pressão de operação foi comparado com o valor de vazão coletada. A vazão coletada corresponde ao somatório do produto das intensidades de aplicação, observadas em cada coletor, multiplicada pela área de influência de cada coletor (0,09 m<sup>2</sup>).

Nos casos em que houve diferenças entre os valores de vazão coletada e aplicada, para evitar erros volumétricos nas simulações, os valores de intensidade de aplicação de água observados foram corrigidos pela razão entre a vazão coletada e aplicada.

Os dados das intensidades de aplicação observados em cada malha de coletores foram utilizados para estabelecer o raio de alcance do microaspersor, que

$$DR = \frac{(R_h - R_{1,5})}{R_{1,5}} * 100 = \left[ \left( \frac{h}{1,5} \right)^{a_5} - 1 \right] * 100 \quad (3)$$

Em que: DR é o decréscimo no raio de alcance do microaspersor (%); R<sub>h</sub> é o raio de alcance do microaspersor para a altura de instalação h (m), e; R<sub>1,5</sub> é o raio de alcance do microaspersor para a altura de 1,5 m.

Os dados de intensidade de aplicação (mm h<sup>-1</sup>) corrigidos na malha de coletores foram utilizados para construir os perfis radiais do microaspersor operando sob diferentes condições operacionais. Para

representa o ponto mais distante onde ocorre a intensidade de 0,13 mm h<sup>-1</sup>, de acordo com a norma ISO 8026 (ISO 2009).

Os valores de vazão de descarga e raio de alcance do microaspersor, para as diferentes condições operacionais, foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, conforme as Equações 1 e 2.

$$Q = a_1 * b^{a_2} * p^{a_3} \quad (1)$$

$$R = a_4 * h^{a_5} * b^{a_6} * p^{a_7} \quad (2)$$

Em que: Q é a vazão de descarga (L h<sup>-1</sup>); R é o raio de alcance (m); b é o diâmetro do bocal (mm); p é a pressão de serviço (mca); h é a altura de instalação em relação ao ponto de aplicação de água (m), e; a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub>, a<sub>5</sub>, a<sub>6</sub> e a<sub>7</sub> são as constantes de ajuste das equações.

Em relação ao raio de alcance obtido com a altura de instalação do microaspersor de 1,5 m, para uma dada pressão de serviço (p) e diâmetro do bocal (b), foi calculado o decréscimo no raio de alcance (PRADO *et al.*, 2013) com a redução da altura de instalação do microaspersor de acordo com a Equação 3.

esse procedimento, foi determinada a média dos valores de intensidades de aplicação observados a mesma distância radial ao microaspersor.

Os perfis de distribuição de água foram adimensionalizados de acordo com a metodologia apresentada por Solomon e Besdek (1980), em que as distâncias ao microaspersor são expressas em termos de fração do raio de alcance (Equação 4), e os valores de intensidade de aplicação em

termos da fração da intensidade média de aplicação de água (Equação 5).

$$ra_j = \frac{dr_j}{R} \quad (4)$$

$$ia_j = \frac{ip_j * \pi * R^2}{Q} \quad (5)$$

Em que:  $ra_j$  é a fração do raio de alcance do microaspersor (adimensional);  $ia_j$  é a fração da intensidade média de aplicação de água (adimensional);  $dr_j$  é a distância radial de um ponto de amostragem  $j$ , em relação ao microaspersor (m), e;  $ip_j$  é a intensidade de água em um ponto de amostragem  $j$  ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

Com as informações obtidas em cada perfil radial de distribuição de água, foram gerados por interpolação com *spline* cúbico (BURDEN; FAIRES, 2003), vinte valores de intensidade adimensional de precipitação correspondente a vinte frações do raio de alcance ( $ra_t$ ), Equação 6.

$$ra_t = 0,025 + (t - 1) * 0,05 \quad (6)$$

Em que:  $t$  é o índice de identificação que varia de 1 a 20.

A fim de identificar formas geométricas típicas assumidas pelos perfis radiais adimensionais, os setenta e dois perfis radiais adimensionais para cada tipo de inserto do microaspersor, foram submetidos à análise de agrupamento utilizando-se o algoritmo *K-Means* (PRADO; COLOMBO, 2005).

Para as simulações das sobreposições laterais em função dos espaçamentos entre microaspersores, na linha e na entre linha, de 30 a 100% do diâmetro molhado do microaspersor, e o cálculo da uniformidade de aplicação por meio do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), foi desenvolvida uma

rotina computacional, escrita em *Visual Basic* para aplicativos na planilha eletrônica *Excel*, conforme descrito por Prado (2016).

Os valores de uniformidade de aplicação de água em função dos espaçamentos na linha e na entre linha foram representados em gráficos de contorno, nos quais foram indicadas as condições operacionais que promovem os melhores valores de uniformidade ( $\text{CUC} > 80\%$ ) (BERNARDO *et al.*, 2019) do microaspersor, operando com o inserto nebulizador e com o de pequeno alcance.

Em todos os gráficos de contorno gerados, foi traçada a curva que delimita as combinações de espaçamento entre microaspersores, a partir da qual a sobreposição das áreas molhadas é incompleta. As combinações de espaçamentos entre microaspersores a partir das quais se inicia o comprometimento da cobertura completa da área irrigada foram determinadas, respectivamente, para arranjos retangulares e triangulares (PRADO, 2016), Equações 7 e 8.

$$\frac{Sl}{DM} = \sqrt{1 - \left(\frac{Sp}{DM}\right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{Sl}{DM} = \sqrt{1 - 4 * \left(\frac{Sp}{DM} - 0,5\right)^2} \quad (8)$$

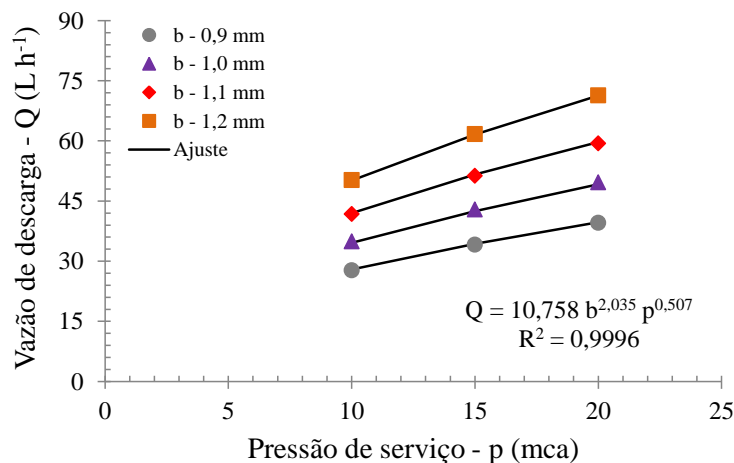
Em que:  $Sl$  é o espaçamento entre microaspersores na linha (m);  $Sp$  é o espaçamento entre microaspersores na entre linha (m), e;  $DM$  é o diâmetro molhado do microaspersor (m).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentados os valores de vazão de descarga *versus* pressão de serviço para os quatro bocais do microaspersor avaliado. Nesta figura é notável que, com o aumento da pressão de

serviço, para todos os bocais avaliados, há um incremento na vazão de descarga do emissor.

**Figura 1.** Vazão de descarga do microaspersor em função do diâmetro do bocal (b em mm) e da pressão de serviço (p em mca).



Aos valores de vazão observados nos ensaios, foi ajustada uma equação potencial em função do diâmetro do bocal e da pressão de serviço (Figura 1). No ajuste dessa equação, observou-se um coeficiente de determinação próximo à unidade ( $R^2 = 0,9996$ ), revelando que os dados observados possuem boa adequação ao modelo potencial (PRADO *et al.*, 2021). O expoente de pressão igual a 0,507 dessa equação revela que, o microaspersor ensaiado pode ser classificado como emissor de regime turbulento (FRIZZONE *et al.*, 2012).

Nos ensaios de distribuição de água

do microaspersor operando com o inserto nebulizador, foram observadas variações nos raios de alcance de 1,06 a 1,29 m e 1,06 a 1,36 m, respectivamente, para o microaspersor instalado verticalmente para cima e para baixo. Em contrapartida, para o inserto de pequeno alcance, essas variações foram de 1,10 a 1,96 m com o microaspersor instalado para cima e de 1,66 a 2,21 m para baixo. A esses dados observados, foram ajustadas equações para a estimativa do raio de alcance em função da altura do bocal em relação aos coletores, diâmetro de bocal e pressão de serviço do microaspersor (Tabela 1).

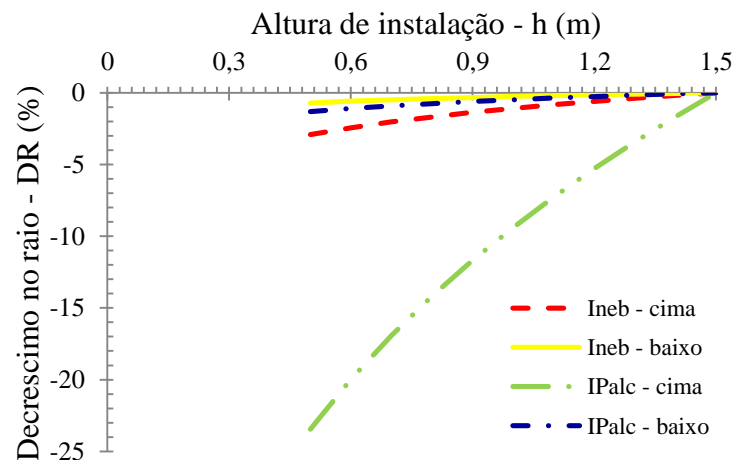
**Tabela 1.** Equações de raio de alcance (R em m) do microaspersor nas posições para cima e para baixo com os insertos nebulizador e de pequeno alcance em função do diâmetro do bocal (b em mm), da pressão de serviço (p em mca) e da altura de instalação (h em m).

Inserto	Posição	Equação	R <sup>2</sup>
Nebulizador	Cima	$R = 0,7163 * h^{0,0270} * b^{0,3731} * p^{0,1598}$	0,5588
	Baixo	$R = 0,8521 * h^{0,0065} * b^{0,3226} * p^{0,1363}$	0,5771
Pequeno alcance	Cima	$R = 1,0770 * h^{0,2432} * b^{0,7441} * p^{0,1187}$	0,9372
	Baixo	$R = 1,5076 * h^{0,0120} * b^{0,5222} * p^{0,0835}$	0,7714

As menores variações no raio de alcance do microaspersor operando com o inserto nebulizador proporcionaram coeficientes de determinação das equações de 55,88% (posição para cima) e 57,71% (posição para baixo) (Tabela 1). Por outro lado, as maiores variações nos valores observados de raio de alcance, para o inserto de pequeno alcance, resultaram em coeficientes de determinação das equações de 93,72% (posição para cima) e 77,14% (posição para baixo). Bortoluzzi e Prado (2017), ao ajustarem equações de raio de alcance para o mesmo microaspersor, operando com insertos rotativos, observaram valores de coeficientes de determinação que variaram entre 68,9 e 88,7%.

Segundo Ouazaa *et al.* (2014), quanto maior a pulverização do jato d'água de um aspersor, menor é o tamanho das gotas produzidas, resultando numa menor área molhada. Desta forma, devido a maior pulverização proporcionada pelo microaspersor operando com o inserto nebulizador (placa lisa), os decréscimos no alcance ao reduzir a altura de instalação, independentemente da posição do emissor, não foram tão acentuados (Figura 2). Ao reduzir a altura de instalação do microaspersor de 1,5 m para 0,5 m, observaram-se reduções de 2,9 e 0,7% no raio de alcance, respectivamente, para o microaspersor posicionado verticalmente para cima e para baixo.

**Figura 2.** Decréscimo no raio de alcance para os insertos nebulizador (INeb) e pequeno alcance (IPalc) em função da redução na altura e posição de instalação do microaspersor.



Para o microaspersor operando com o inserto de pequeno alcance (placa ranhurada côncava) instalado verticalmente para baixo com a concavidade para cima, a redução do alcance também não foi tão acentuada (1,3%) ao reduzir-se a altura de instalação (Figura 2). Todavia, quando o microaspersor foi instalado verticalmente para cima, com a concavidade do inserto voltada para baixo, esse decréscimo no raio de alcance foi acentuado (23,4%). Em sistemas de irrigação tipo pivô centrais,

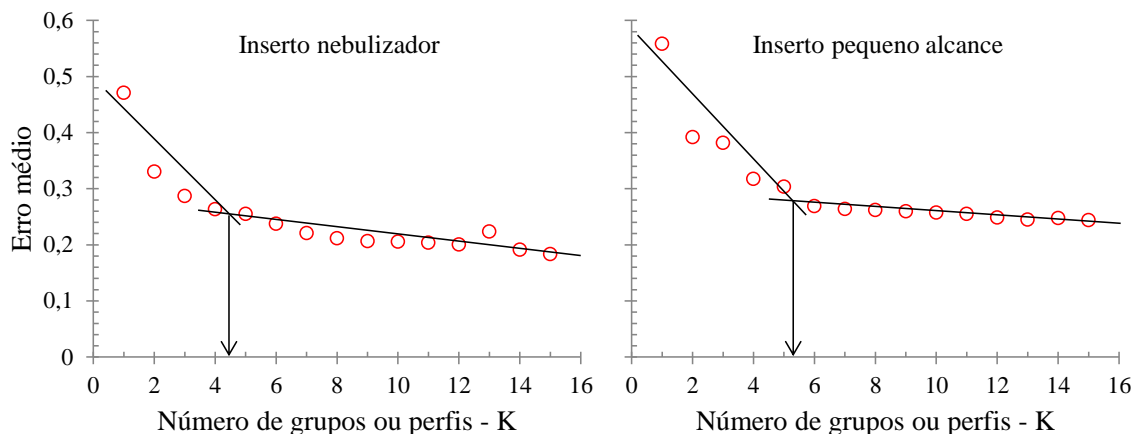
usualmente, as placas fixas ranhuradas são empregadas com a concavidade voltada para cima (SOBENKO *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019).

Os resultados das análises de agrupamento (*K-Means*) dos perfis radiais adimensionais de distribuição de água são apresentados na Figura 3. Essa análise de agrupamento foi realizada separadamente com os perfis radiais adimensionais obtidos nas condições operacionais de alturas de instalação, posição do microaspersor,

diâmetro de bocais e pressões para o inserto nebulizador (72 perfis) e para o inserto de

pequeno alcance (72 perfis).

**Figura 3.** Erro médio em relação ao número (K) de perfis representativos empregados.



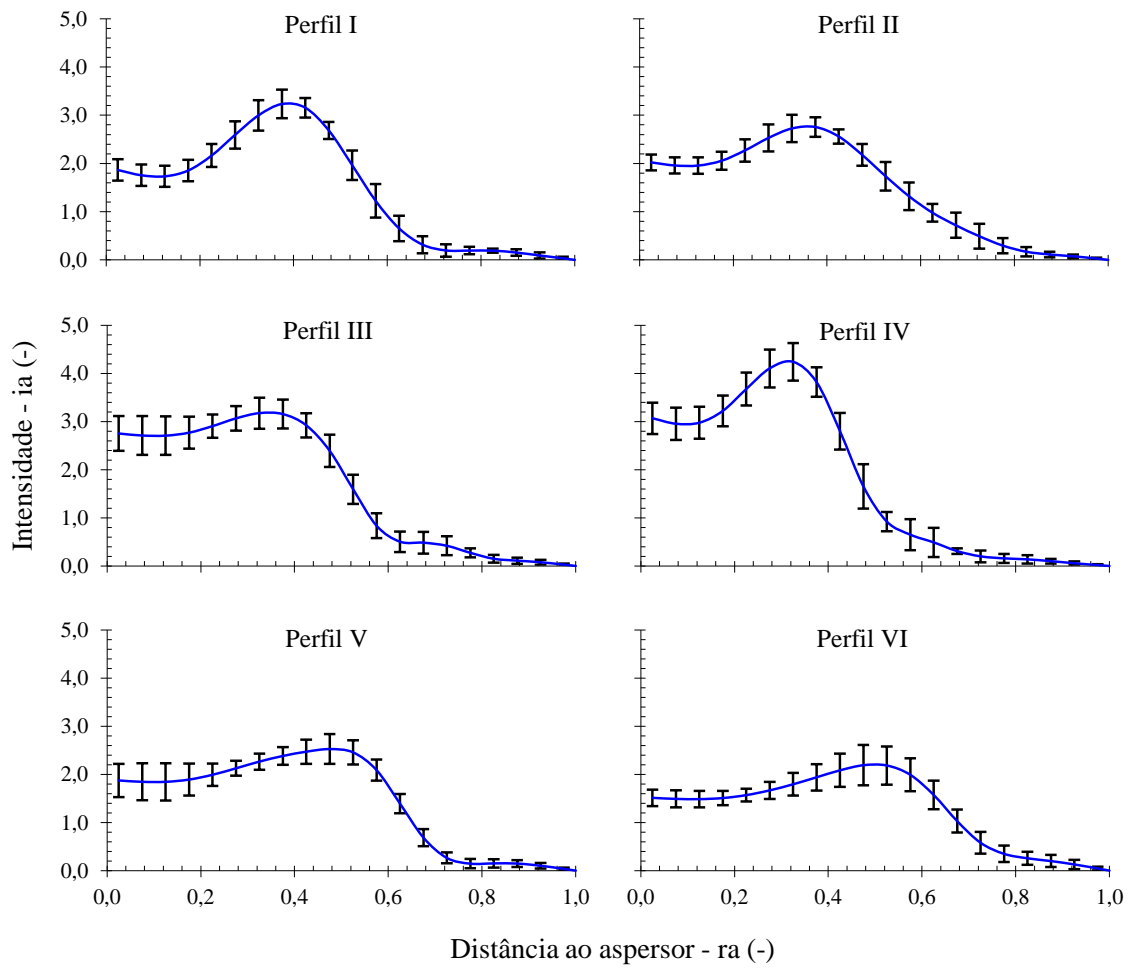
De acordo com Solomon e Bezdek (1980), o número de perfis é escolhido nas proximidades do ponto de inflexão entre o erro médio e o número K de perfis (Figura 3). Dessa forma, ao estabelecer-se seis perfis radiais ( $K = 6$ ) para as condições operacionais dos insertos nebulizador e de pequeno alcance, o erro médio na intensidade adimensional de aplicação variou de 0,24 a 0,27 e, a partir desse ponto ( $K = 6$ ), com o aumento no número de “K” perfis, o erro médio decresceu até assumir o valor igual a zero ( $K = 72$ ). Prado (2016), ao agrupar 16 perfis radiais adimensionais

de um aspersor de tamanho médio em três perfis típicos, obteve um erro médio igual a 0,19.

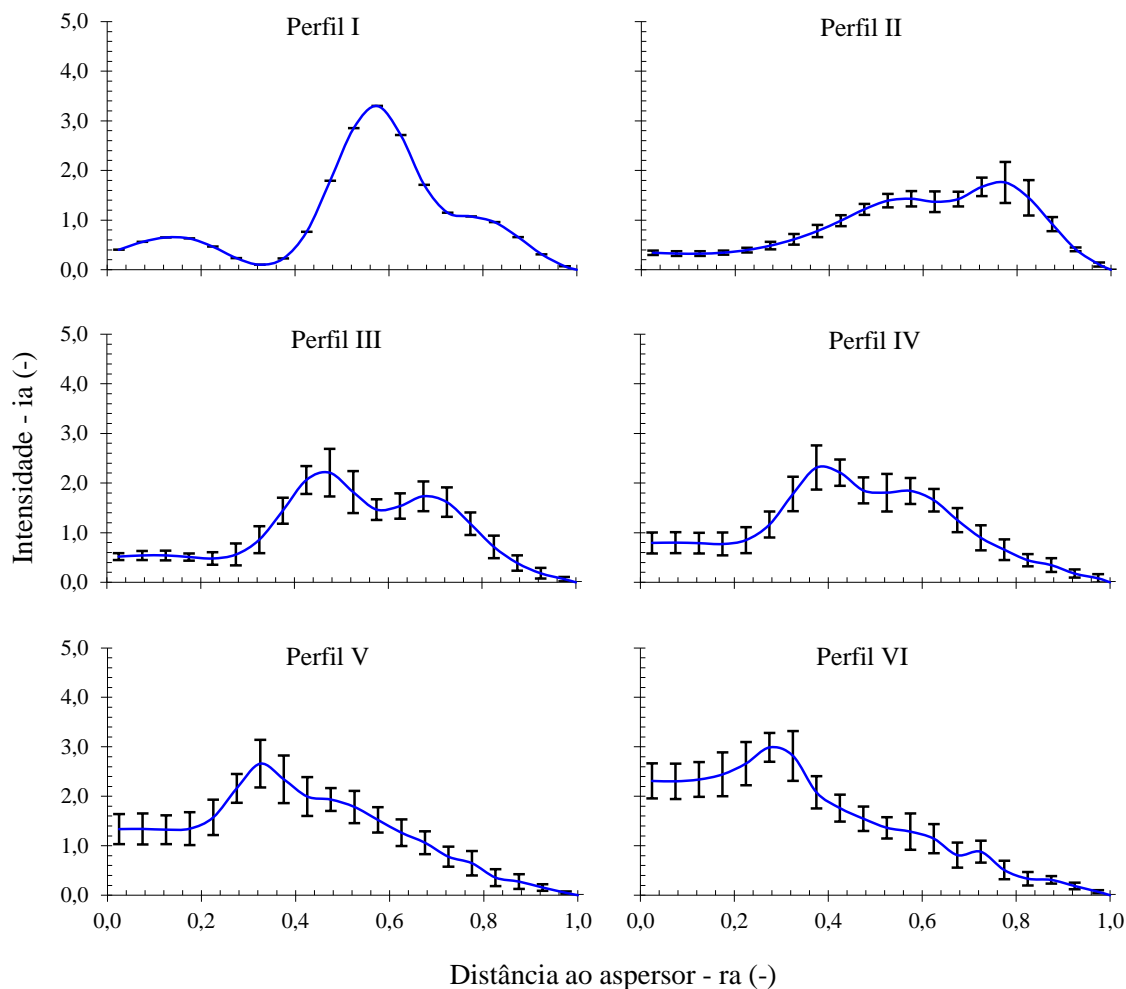
Nas Figuras 4 e 5 são apresentados, respectivamente, os perfis radiais adimensionais representativos das condições operacionais do microaspersor operando com os insertos nebulizador e de pequeno alcance. As barras verticais, apresentadas nessas duas figuras, representam um erro de mais ou menos um desvio padrão no valor da intensidade adimensional obtida em cada ponto.



**Figura 4.** Perfis adimensionais representativos do microaspersor operando com o inserto nebulizador.



**Figura 5.** Perfis adimensionais representativos do microaspersor operando com o inserto de pequeno alcance.



As formas geométricas assumidas pelos perfis radiais adimensionais, obtidos com as diferentes condições operacionais do microaspersor operando com inserto nebulizador (Figura 4), no intervalo entre 0,3 e 0,6 da fração do raio de alcance, apresentam uma elevação nos valores da intensidade de aplicação de água. Para as formas geométricas I e IV, esse aumento na intensidade de aplicação foi mais acentuado, quando comparado às demais formas geométricas (II, III, V e VI). Após essa elevação, os valores de intensidade de aplicação decrescem até o valor de zero, característica típica das formas geométricas teóricas A, B e C de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942).

Com exceção das formas

geométricas V e VI, os perfis radiais obtidos com as diferentes condições operacionais do microaspersor, trabalhando com o inserto de pequeno alcance, apresentaram baixos valores de intensidade de aplicação de água próximo ao microaspersor ( $ia < 1$ ) e, à medida que se distancia do microaspersor, esses valores crescem de forma acentuada, atingem um pico, e decrescem novamente (Figura 5). De acordo com Bortoluzzi e Prado (2017), condições operacionais que proporcionam esse tipo de perfil radial, conhecido como perfil rosquilha, devem ser evitadas, pois resultam em inadequados valores de uniformidade de aplicação de água. Todavia, as formas geométricas V e VI assemelham-se aos perfis A, B e C

descritos por Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942).

Nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, estão definidas as condições operacionais (posição do emissor x altura de instalação x diâmetro do bocal x pressão de serviço) do microaspersor operando com os insertos nebulizador e de pequeno alcance

pertencentes a cada grupo (I, II, III, IV, V e VI). Ao identificar o perfil adimensional representativo da condição operacional de interesse, com os dados de raio de alcance e intensidade de aplicação de água, é possível proceder a dimensionalização do perfil radial de distribuição de água.

**Tabela 2.** Perfis representativos do microaspersor operando com o inserto nebulizador nas posições para cima e para baixo em função do diâmetro do bocal (b), pressão de serviço (p) e alturas de instalações de 0,5 (h1), 1,0 (h2) e 1,5 m (h3).

b (mm)	p (mca)	Posição para cima			Posição para baixo		
		h1	h2	h3	h1	h2	h3
0,9	10	I	III	I	I	II	III
	15	I	III	III	IV	II	IV
	20	II	III	II	IV	III	IV
1,0	10	I	II	II	III	III	V
	15	V	II	II	IV	III	III
	20	VI	I	II	III	III	III
1,1	10	V	V	V	I	I	IV
	15	VI	VI	II	III	III	III
	20	VI	II	II	III	II	III
1,2	10	VI	VI	V	I	III	IV
	15	V	VI	II	II	II	II
	20	VI	V	V	V	VI	V

**Tabela 3.** Perfis representativos do microaspersor operando com o inserto de pequeno alcance nas posições para cima e para baixo em função do diâmetro do bocal (b), pressão de serviço (p) e alturas de instalações de 0,5 (h1), 1,0 (h2) e 1,5 m (h3).

b (mm)	p (mca)	Posição para cima			Posição para baixo		
		h1	h2	h3	h1	h2	h3
0,9	10	I	III	III	IV	V	IV
	15	II	IV	IV	IV	V	V
	20	II	IV	IV	V	V	V
1,0	10	II	III	III	V	V	V
	15	III	IV	IV	V	VI	VI
	20	III	IV	IV	VI	VI	VI
1,1	10	III	III	IV	V	V	V
	15	III	IV	IV	VI	VI	V
	20	III	IV	IV	VI	VI	V
1,2	10	III	IV	V	V	V	V
	15	III	V	V	VI	VI	VI
	20	III	IV	V	VI	VI	VI

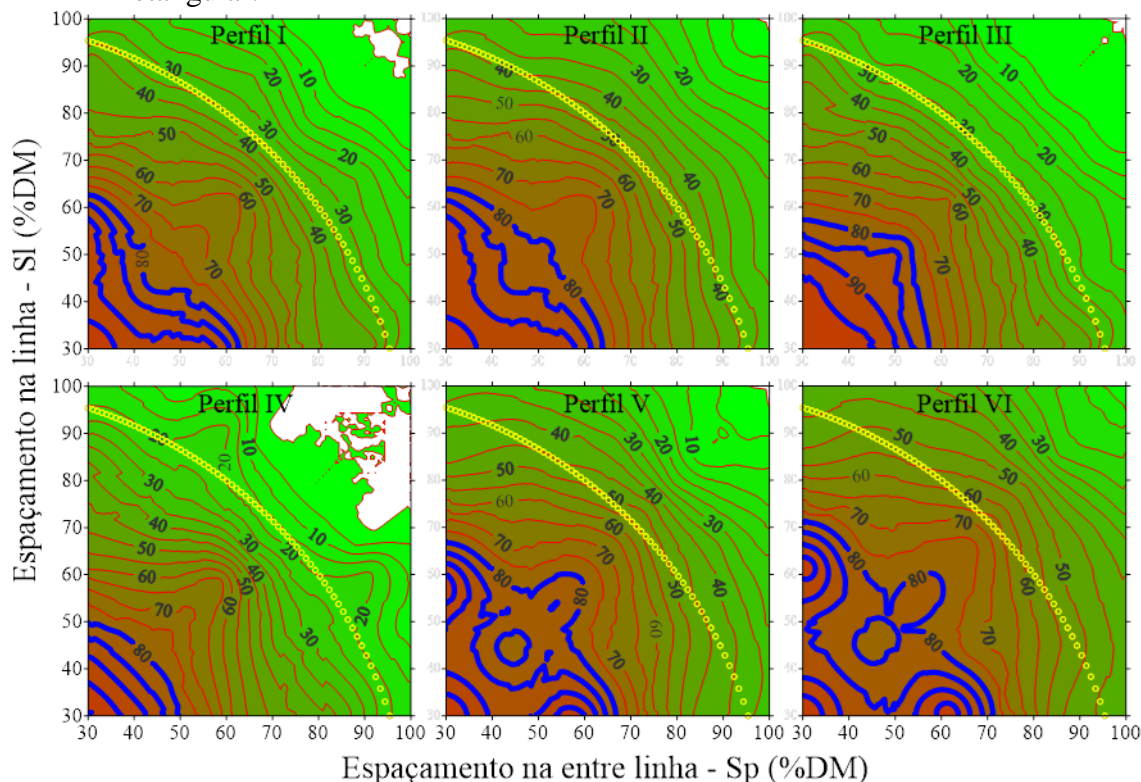
Segundo Solomon e Bezdek (1980) e Prado (2016), determinadas condições operacionais do emissor tendem a apresentar uma forma geométrica específica do perfil radial de distribuição de água. Para o inserto nebulizador, isso não é tão evidente, mas a forma geométrica I aparece com maior frequência para condições operacionais de baixa pressão de serviço ( $p = 10$  mca) e as formas geométricas V e VI para pressões mais elevadas (Tabela 2).

Ao considerar as formas geométricas do perfil radial para o inserto de pequeno alcance (Tabela 3), é notório observar que, as formas geométricas I, II, III e IV são mais frequentes para as condições do microaspersor instalado verticalmente para cima e, para o emissor alocado verticalmente para baixo, apenas há

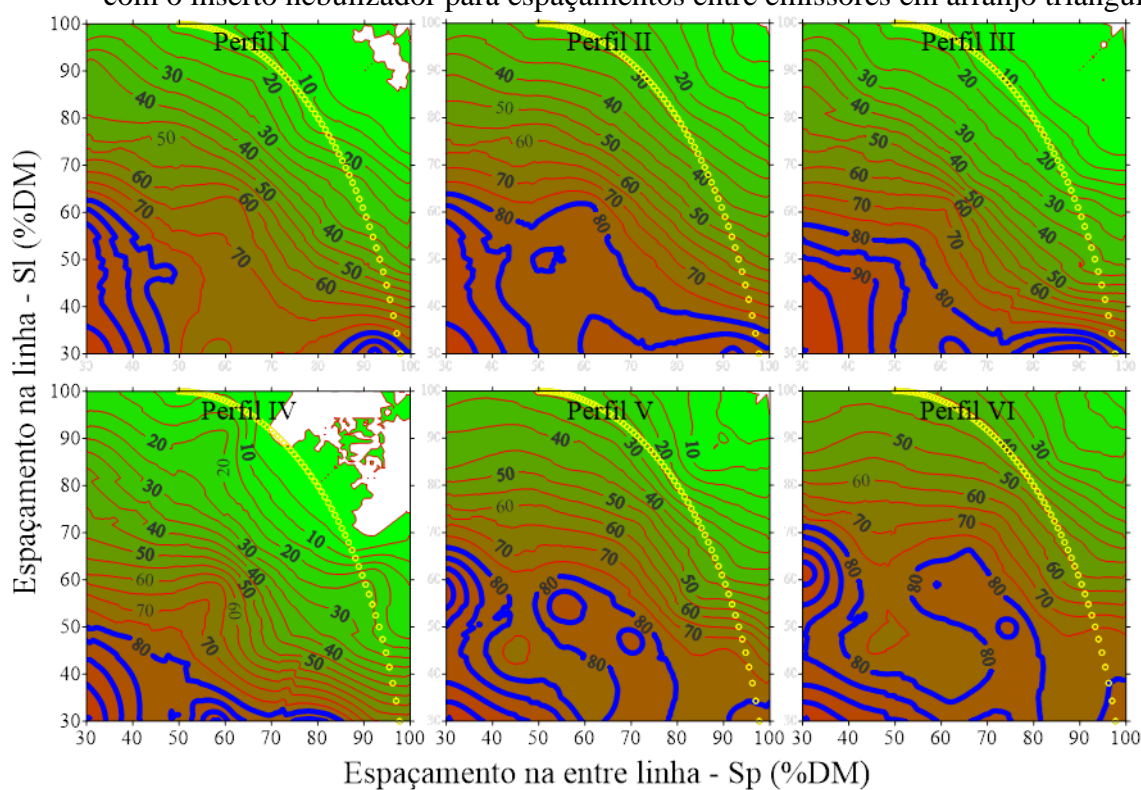
a ocorrência das formas geométricas IV, V e VI.

Os perfis radiais representativos, apresentados nas Figuras 4 e 5, foram empregados para simular a distribuição de água do microaspersor operando em conjunto para diferentes espaçamentos entre emissores, expressos em termos de diâmetro molhado (DM). Com os valores de sobreposição lateral entre emissores, para espaçamentos em arranjos retangulares (Figuras 6 e 8) e triangulares (Figuras 7 e 9), foram determinados os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC). Nas Figuras 6, 7, 8 e 9, as combinações de espaçamento, abaixo à linha pontilhada amarela, garantem um mínimo de sobreposição entre microaspersores.

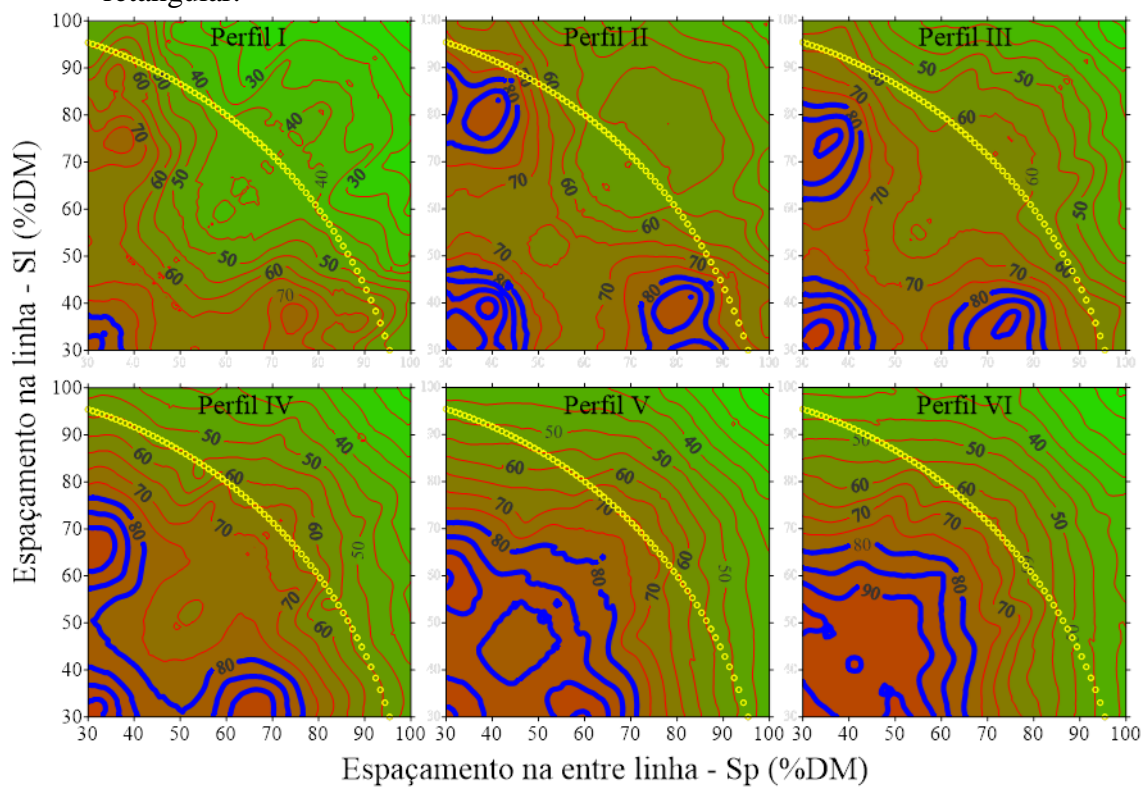
**Figura 6.** Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) do microaspersor operando com o inserto nebulizador para espaçamentos entre emissores em arranjo retangular.



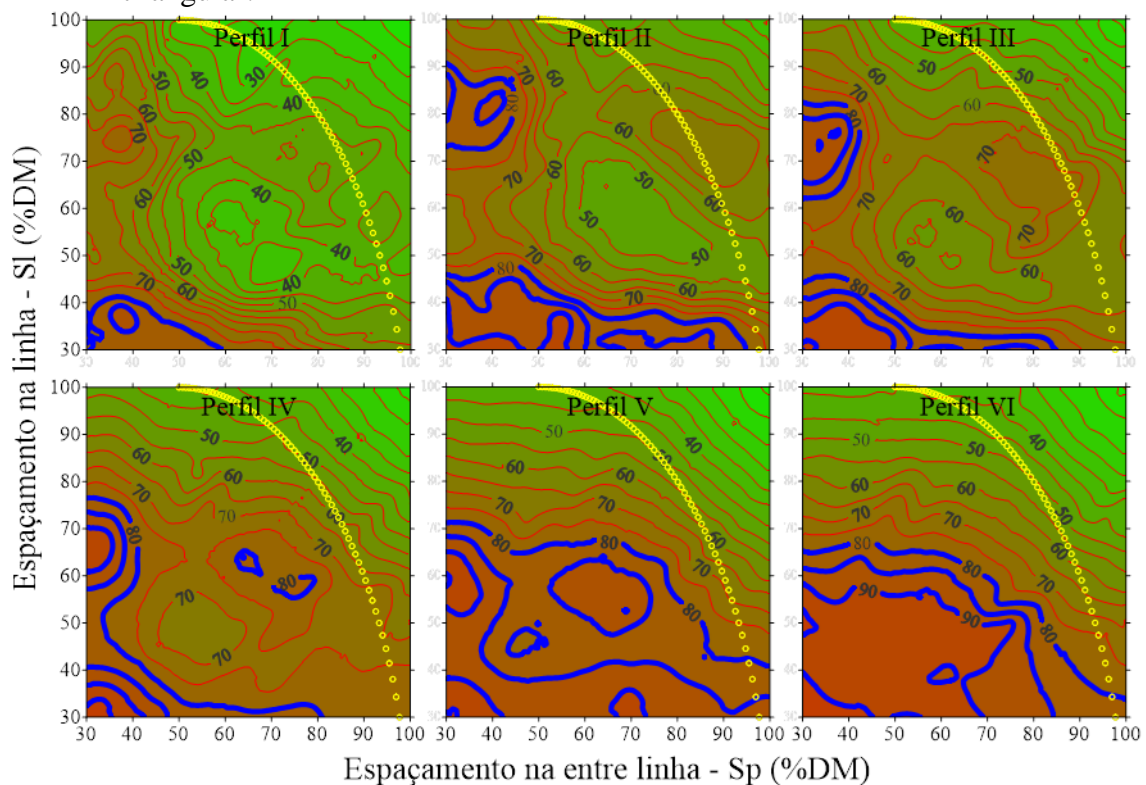
**Figura 7.** Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) do microaspersor operando com o inserto nebulizador para espaçamentos entre emissores em arranjo triangular.



**Figura 8.** Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) do microaspersor operando com o inserto de pequeno alcance para espaçamentos entre emissores em arranjo retangular.



**Figura 9.** Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) do microaspersor operando com o inserto de pequeno alcance para espaçamentos entre emissores em arranjo triangular.



Conforme apresentado na literatura (BERNARDO *et al.*, 2019; FRIZZONE *et al.*, 2012; PRADO, 2016), valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen iguais ou superiores a 80% proporcionam uma adequada distribuição de água de emissores. Entretanto, condições operacionais que resultem em maiores espaçamentos entre microaspersores promovem um menor custo do projeto de irrigação e devem ser preferidas.

De modo geral, para o microaspersor operando com o inserto nebulizador, independentemente do arranjo entre microaspersores, espaçamentos, tanto na linha (Sl) como na entre linha (Sp), menores que 45% do DM do microaspersor, resultam em adequados valores de CUC (Figuras 6 e 7). Exceções a isso são condições operacionais que resultem em perfis radiais com as formas geométricas V e VI para os arranjos retangular e triangular, e II para o arranjo triangular. Nessas

condições, espaçamentos iguais ou menores que 50% do DM na linha (Sl) e iguais ou inferiores a 60% do DM na entre linha (Sp) geram valores de CUC superiores a 80% (Figuras 6 e 7).

Para as formas geométricas dos perfis radiais I, II, III e IV, obtidas com o inserto de pequeno alcance (Figura 5), espaçamentos muito próximos (menor que 40% do DM) devem ser empregados para gerar valores de CUC superiores a 80% (Figuras 8 e 9). Devido aos baixos valores de CUC obtidos com o perfil representativo I (Tabela 3), essa condição operacional do microaspersor deve ser evitada.

As condições operacionais que levam aos perfis representativos V e VI, nos arranjos retangulares, permitem atingir altos valores de coeficientes de uniformidade com espaçamentos menores que 60% do diâmetro molhado (Figura 8). Por outro lado, para arranjos triangulares (Figura 9), espaçamentos na linha (Sl)

iguais ou inferiores a 60% do DM e espaçamentos na entre linha ( $S_p$ ) iguais ou inferiores a 70% do DM proporcionam adequados valores de CUC ( $CUC > 80\%$ ).

A redução no espaçamento entre microaspersores promove melhoras na uniformidade de aplicação de água (ANDRADE *et al.*, 2017; PATEL *et al.* 2021). Essa maior proximidade entre os emissores leva a uma maior intensidade de aplicação de água e aumento do custo de instalação do sistema de irrigação. Assim, combinações operacionais que permitam maior espaçamento entre emissores devem ser priorizadas.

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que: i) condições operacionais com o inserto de pequeno alcance proporcionaram maiores raios de alcance; ii) variações no raio de alcance com o inserto de pequeno alcance, instalado verticalmente para cima, foram mais acentuadas; iii) seis formas geométricas são suficientes para representar os perfis radiais do microaspersor operando com o inserto nebulizador e de pequeno alcance; iv) espaçamentos entre emissores próximos a 50% do diâmetro molhado resultaram em adequados valores de CUC na maioria das situações avaliadas, e; v) o emprego do inserto de pequeno alcance com o microaspersor instalado verticalmente para cima deve ser evitado.

## 7 REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. G.; VILAS BOAS, M. A.; SIQUEIRA, J. A. C.; SATO, M.; DIETER, J.; HERMES, E.; MERCANTE, E. Uniformity microsprinkler irrigation system using statistical quality control. **Revista Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 4, p. 1-7, 2017.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A.; **Manual de Irrigação**. 9ª ed. Viçosa: Editora da UFV, 2019. 545 p.
- BORTOLUZZI, D. D.; PRADO, G. Modelagem da distribuição de água de microaspersores. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 7, p. 2063-2075, 2017.
- BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 740 p.
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. 124 p. Bulletin, 670
- DWIVEDI, D. K.; PANDYA, P. A. Evaluation of hydraulic performance of micro-sprinkler irrigation. **International Journal of Agricultural Science and Research**, Rochester, v. 6, n. 3, p. 397-406, 2016.
- FERNANDES, G. S. T.; MORALES, K. R. M.; PESSOA, V. G.; OLIVEIRA, V. B.; LIMA, E. A.; SILVA, T. G. P. Simulation of the energy gradient of the lateral line with type MF2 micro-sprinkler. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 16, n. 1, p. 21-30, 2022.

FERREIRA, L. L. N.; LEMOS FILHO, L. C.; TORRES, M. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. F.; VALE, C. N. C.; FRANCO, M. S. B. P. Spatial variability of available water and micro-sprinkler irrigation in cambisol. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, n. 6, p. 782-788, 2016.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8026. **Agricultural irrigation equipment – Sprayers: General requirements and test methods**. Geneva, 2009. 18p.

IQBAL, U.; AHMAD, I.; ZAMAN, M.; KHAN, N. M.; SARWAR, M. K. Performance evaluation of micro sprinkler irrigation system in tunnel farms and open area conditions. **Fresenius Environmental Bulletin**, Freising, v. 30, n. 3, p. 2888-2898, 2021.

LIU, Z.; JIAO, X.; ZHU, C.; KATUL, G. G.; MA, J.; GUO, W. Micro-climatic and crop response to micro-sprinkler irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 243, p. 1-11, 2021.

OUAZAA, S.; BURGUETE, J.; PANIAGUA, M. P.; SALVADOR, R.; ZAPATA, N. Simulating water distribution patterns for fixed spray plate sprinkler using the ballistic theory. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 12, n. 3, p. 850-863, 2014.

PATEL, R. J.; VEKARIYA, P. B.; VADAR, H. R.; RANK, H. D.; PANDYA, P. A.; MODHAVADIA, J. M. Hydraulic performance evaluation of double nozzle full circle micro-sprinkler irrigation system under semi-arid conditions. **International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science**, Indore, v. 3, n. 1, p. 39-50, 2021.

PRADEEP, S. A.; GOVIND, D. S.; DHARMARAJ, J. K.; SURESH, K. A. Performance evaluation of micro sprinkler system. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Kancheepuram, v. 10, n. 1, p. 1630-1635, 2021.

PRADO, G. Water distribution from medium-size sprinkler in solid set sprinkler systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 3, p. 195-201, 2016.

PRADO, G.; BRUSCAGIN, R. R.; TINOS, A. C.; BORTOLETTO, E. C.; MAHL, D. Iterative calculation of local head loss coefficient of emitter in lateral lines. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 25, n. 5, p. 291-296, 2021.

PRADO, G.; FARIA, L. C.; OLIVEIRA, H. F. E.; COLOMBO, A. Efeito do ângulo do jato nas características técnicas de um canhão hidráulico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 7, p. 689-697, 2013.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 53-63, 2005.



SOBENKO, L. R.; CAMARGO, A. P.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A.; OLIVEIRA, M. F.; LAVANHOLI, R.; SANTOS, J. D. M. DUARTE, S. N. Performance of an iris mechanism equipped with fixed and rotating deflector plates for variable rate sprinkler irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 145, n. 12, p. 1-10, 2019.

SOLOMON, K.; BEZDEK, J. C. Characterizing sprinkler distribution patterns with a clustering algorithm. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 23, p. 899- 906, 1980.

ZHANG, Y.; GUO, J.; SUN, B.; FANG, H.; ZHU, D.; WANG, H. Modeling and dynamic-simulating the water distribution of a fixed spray-plate sprinkler on a lateral-move sprinkler irrigation system. **Water**, Basel, v. 11, n. 1, p. 1-16, 2019.