

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DESEMPENHO DE ASPERSOR MÓVEL PARA PEQUENAS
ÁREAS E HORTAS**

JAMERSON FÁBIO SILVA FILHO

CASCAVEL - Paraná - Brasil

Março de 2021

JAMERSON FÁBIO SILVA FILHO

**DESEMPENHO DE ASPERSOR MÓVEL PARA PEQUENAS
ÁREAS E HORTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola área de concentração em **Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Orientador: Dr. Marcio Antonio Vilas Boas

CASCADEL - Paraná - Brasil

Março de 2021

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Filho, Jamerson Fábio Silva
Desempenho de Aspersor Móvel Para Pequenas Áreas e Hortas / Jamerson Fábio Silva Filho; orientador(a), Márcio Antônio Vilas Boas, 2021.
41 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2021.

1. Irrigação. 2. Coeficiente de Uniformidade. I. Vilas Boas, Márcio Antônio . II. Título.

JAMERSON FÁBIO SILVA FILHO

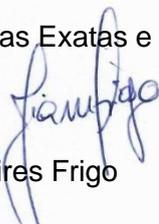
**CONTROLE DO PROCESSO DA IRRIGAÇÃO NO SISTEMA DE ASPERSÃO
CONVENCIONAL EM PALOTINA-PR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, para aprovação pela seguinte banca examinadora:



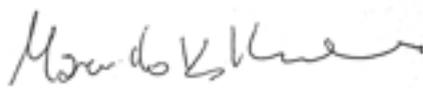
Orientador: Prof. Dr. Marcio Antônio Vilas Boas

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE



Prof. Dr. Jiam Pires Frigo

Departamento de Energia e Sustentabilidades, UNILA



Prof. Dr. Marcelo Bevilacqua Remor

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

CASCADEL - Paraná – Brasil

Março – 2021

BIOGRAFIA

JAMERSON FÁBIO SILVA FILHO – Nascido em 29 de setembro de 1995, natural de Uruaçu, Goiás. Possui graduação em Engenharia Agrícola no período de 2014 a 2018, pelo Instituto Federal de Ciências e Tecnologia Goiano, *campus* Urutaí, Goiás. Atualmente, é mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel, Paraná, vinculado à área de concentração de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, e atua na linha de Recursos Hídricos sob orientação do Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas.

“O que prevemos raramente ocorre; o que menos esperamos geralmente acontece.” (Benjamin Disraeli)

Ao meu saudoso pai, Jamerson Fábio Silva e à minha mãe, Crysthiene Carla de Andrade Fernandes Silva, pelos ensinamentos e pelo apoio para conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas, pelo incentivo, conhecimentos transmitidos e pela orientação;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da UNIOESTE, *campus* de Cascavel e, ao corpo docente da Instituição, pela oportunidade de realização desta conquista;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pela concessão do estudo realizado;

À minha família, pelo suporte, apoio e cuidado que recebi sempre que precisei.

Obrigado a todos que contribuíram para que fosse possível a conclusão desta etapa.

DESEMPENHO DE ASPERSOR MÓVEL PARA PEQUENAS ÁREAS E HORTAS

RESUMO

O volume de água utilizado é superior ao que realmente necessita para a produção de alimentos em grande parte das áreas agrícolas irrigadas. A irrigação é considerada uma das principais atividades humana consumidora de água, portanto, a aplicação deve ser tratada com precisão para evitar o uso desnecessário. Desse modo, tornam-se importantes tanto a utilização eficiente da água com conhecimento adequado como a de alternativas que otimizem seu uso. Diversas medidas podem ser tomadas para o uso racional da água como a utilização de equipamentos projetados adequadamente que apresentem boa otimização da quantidade de água aplicada e manejo adequado. Nesse trabalho, objetivou-se avaliar um aspersor móvel alternativo de pequeno porte, trabalhando de modo estático. Assim, foram avaliados aspersor móvel, o *grid* amostral 1 com os coletores nas suas laterais, em que os ensaios foram realizados durante a manhã (das 8h às 12h), a tarde (das 13h às 18h) e durante a noite (das 19h às 23h) e *grid* amostral 2 com os mesmos horários, mas com os coletores nas laterais e também na parte da frente e na parte de trás. Portanto, os dados e a comparação com diferentes intensidades de vento foram obtidos bem como a pressão de serviço de uma torneira convencional de baixa pressão. Para a realização da estatística descritiva e gráficos de controle, a partir da utilização do programa Minitab, do software RStudio, do SigmaPlot®, os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste de média. Na análise de variância, foi empregado o teste F em nível de 5% de probabilidade. As médias foram comparadas ao teste Tukey, a 5% de probabilidade. Nota-se que, com base na análise descritiva, de modo geral, o espaçamento entre coletores de 0,50 m para ambos os *grids* apresentou as maiores médias, os menores desvios, variâncias e coeficiente de variação dos dados para Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, Coeficiente de uniformidade de distribuição e Coeficiente de uniformidade estático. Entretanto, o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen e o Coeficiente de uniformidade de distribuição apresentaram as melhores médias, os menores desvios, variâncias e coeficiente de variação quando se utilizou o *grid* em malha. Em contrapartida, o Coeficiente de uniformidade estático no *grid* em cruz apresentou a maior média, o menor desvio padrão, variância e coeficiente de variação. As variações observadas nos coeficientes de uniformidade ao longo dos ensaios estão associadas às variações climáticas, uma vez que os ensaios foram realizados em diferentes períodos do dia. Desta forma, o irrigante e/ou técnico deve monitorar as condições climáticas locais, principalmente, a velocidade do vento para que não ocorra interferência na uniformidade de aplicação de água pelo sistema de irrigação por aspersão. Os *grids* não influenciaram nas respostas dos: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, Coeficiente de uniformidade de distribuição e Coeficiente de uniformidade estático. O espaçamento entre coletores de 0,50 m proporcionou os melhores valores para os coeficientes de uniformidade. A velocidade do vento afetou diretamente os coeficientes de uniformidade. O estudo do controle estático de qualidade possibilitou a observação da variabilidade dos dados ao longo dos ensaios e, de modo geral, grande parte dos dados estavam dentro dos limites de qualidade. De acordo com a capacidade de processo, todos os coeficientes de uniformidade estão dentro do ponto de especificação do processo.

Palavras-chave: irrigação; otimização; precisão; sobreposição.

PERFORMANCE OF A MOBILE SPRINKLER FOR SMALL AREAS AND VEGETABLE GARDEN

ABSTRACT

Water flow applied in most irrigated agricultural areas is higher than what is actually needed for food production. Irrigation is considered one of the most important water consuming activities, so, its application must be treated with precision avoiding unnecessary use. Thus, it becomes important to use water efficiently with the right knowledge and to use alternatives that optimize its use. Several measures can be taken for the rational use of water, such as the use of correct designed equipment that presents good optimization of water amount to be applied and the best management. Thus, this work aimed at evaluating a small alternative mobile sprinkler, that could work in a static pattern. So, a mobile sprinkler and a sampling grid 1 with collectors on its sides were evaluated, in which the tests were carried out during the morning (from 8 AM to 12 PM), in the afternoon (from 1 PM to 6 PM) and at night (from 7 PM to 11 PM) and a sampling grid 2 with the same times, but with the collectors on their sides and also in their front and back. Therefore, the data and comparison with different wind intensities were obtained as well as the operating pressure of a conventional low pressure faucet. The performance of descriptive statistics and control graphics, using the Minitab program, RStudio software, SigmaPlot® and the data were submitted to the analysis of variance and average test. In the analysis of variance, the F test was used at 5% level of probability. The averages were compared to the Tukey test, at 5% probability. Based on the descriptive analysis, it was observed that, in general, the raw spacing among collectors of 0.50 m for both grids presented the highest averages, smallest deviations, variances and variation coefficient of data for Christiansen's Uniformity Coefficient, Distribution uniformity coefficient and Static uniformity coefficient. However, the Christiansen's Uniformity Coefficient, Distribution Uniformity Coefficient showed the best averages, the smallest deviations, variances and variation coefficient when using the mesh grid. On the other hand, the Static uniformity coefficient in the cross grid showed the highest average, the lowest standard deviation, variance and variation coefficient. The variations observed in the uniformity coefficients throughout the tests were associated with climatic changes, since the tests were carried out at different times of the day. Consequently, the irrigator and / or technician must monitor the local climatic conditions, mainly the wind speed, so that there is no interference in the uniformity of water application by the sprinkler irrigation system. Grids did not influence Christiansen's Uniformity Coefficient, Distribution Uniformity Coefficient and Static Uniformity Coefficient. The 0.50 m collector spacing provided the best values for uniformity coefficients. The wind speed affected directly the uniformity coefficients. The study of static quality control made it possible to observe data variability throughout the tests and, generally, a large part of the data was within the quality limits. According to the process capacity, all uniformity coefficients are within the process instruction point.

Keywords: irrigation, optimization; overlapping; precision.

SUMÁRIO

ARTIGO – Desempenho de aspersor móvel para pequenas áreas e hortas

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 MATERIAL E MÉTODOS	2
2.1 Local do Experimento.....	2
2.2 Sistema de irrigação avaliado.....	2
2.3 Instalações e coletas.....	2
2.4 Determinação da uniformidade da irrigação	5
2.5 Carta de Controle	6
2.6 Capacidade do Processo	8
2.7 Análise de dados e delineamento experimental.....	9
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
3.1 Análise descritiva	10
3.2 Análise de variância	11
3.3 Velocidade do vento.....	13
3.4 Controle estático de qualidade	15
3.5 Capacidade do processo.....	20
4. CONCLUSÃO	23
5. REFERÊNCIAS	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Critérios para classificação do CUC, CUD e CUE.....	6
Tabela 2 Análise descritiva para os coeficientes de uniformidade em função dos <i>grids</i> e espaçamento entre coletores.	10
Tabela 3 Análise de variância, coeficiente de variação média e desvio padrão para os coeficientes de uniformidade em função dos <i>grids</i> e espaçamento entre coletores.	11
Tabela 4 Capacidade de Processo para os coeficientes de uniformidade em função dos <i>grids</i> espaçamento entre os coletores.....	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Carro aspersor móvel	2
Figura 2 Coletor tipo becker.....	3
Figura 3 Croqui <i>Grid</i> amostral 1 de coletores e carro aspersor móvel.....	3
Figura 4 Croqui <i>Grid</i> amostral1 de coletores e carro em campo	4
Figura 5 Croqui <i>Grid</i> amostral 2 de coletores e carro aspersor móvel.....	4
Figura 6 Croqui <i>Grid</i> amostral 2 de coletores em campo.	5
Figura 7 Coeficiente de uniformidade em função dos espaçamentos entre os coletores.....	12
Figura 8 Velocidade do vento para os <i>grids</i> cruz (A) e malha (B).....	14
Figura 9 Controle estático da qualidade para os coeficientes de uniformidade CUC (A) CUD (B) e CUE (C), considerando os <i>grids</i> em malha com espaçamento entre coletores 0,25m	16
Figura 10 Controle estático da qualidade para os coeficientes de uniformidade CUC (A) CUD (B) e CUE (C), considerando os <i>grids</i> em malha com espaçamento entre coletores 0,50 m	18
Figura 11 Controle estático da qualidade para os coeficientes de uniformidade CUC(A), CUD(B) e CUE(C), considerando os <i>grids</i> em cruz com espaçamento entre coletores 0,25m	19
Figura 12 Controle estático da qualidade para os coeficientes de uniformidade CUC(A) CUD (B) e CUE(C), considerando os <i>grids</i> em cruz com espaçamento entre coletores 0,25m.....	21

1 INTRODUÇÃO

A área de agricultura irrigada está se expandindo e gera um aumento na demanda de água na agricultura, em regiões com pouco acesso à água, à agricultura irrigada bem como apresenta resultados positivos no aumento da produção de alimentos. Na irrigação, existem diversos métodos para aplicação de água no solo. A irrigação por aspersão é a mais utilizada nesse cenário (LIMA; FERREIRA; CHRISTOFIDIS, 1999). A aplicação de água por aspersão simula, artificialmente, a chuva, pois lança sobre o solo gotículas de água que serão disponibilizadas para a planta (ALENCAR et al., 2017). O manejo de irrigação por aspersão vem sendo amplamente utilizado na agricultura, pois é imprescindível para a economia de água, energia elétrica e para o bom funcionamento dos equipamentos (MIRANDA; ROSAL, 2018).

Os parâmetros utilizados na determinação da uniformidade e manejo de irrigação apresentam importantes fundamentos na otimização do uso da água, como participação direta na eficiência de produtividade (CARRIÓN et al., 2001). A uniformidade de aplicação de água é um importante parâmetro de manejo, pois pode ser adaptado em diversas culturas (MANTOVANI et al., 2012). A uniformidade é uma das principais formas de estabelecer se o sistema de irrigação é eficiente ou não (BRENNAN, 2008).

A irrigação por aspersão possui alguns fatores que podem interferir na eficiência de aplicação da lâmina de água como clima e vento (PLAYÁN et al., 2005; OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009), porém, estes fatores podem diminuir os impactos em períodos noturnos, pois nesse período há uma movimentação menor desses impactos nos locais e assim maior qualidade da irrigação (FRIGO et al., 2014). Segundo Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010), ao verificarem a interferência desses fatores a partir de gráficos de controle observaram que os mesmos se mostraram viáveis e adequados, identificando as variações no processo e a eficiência da irrigação.

Nesse contexto, novos equipamentos de irrigação têm sido desenvolvidos para a utilização racional da água a fim de se evitar o desperdício. Tendo em vista a importância que água tem na agricultura e que a uniformidade é essencial para o manejo de irrigação no Brasil, este estudo busca possibilitar que pequenos produtores tenham acesso à utilização de equipamentos de irrigação com baixo custo e com a mesma eficiência de aplicação que os demais sistemas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do Experimento

Os ensaios de uniformidade de distribuição da irrigação foram conduzidos na área de gramado da Universidade Estadual do Oeste do Paraná campus Cascavel, o qual está localizado no bairro universitário, nas seguintes coordenadas: latitude Sul 24°59'16,3" e longitude Oeste 53°26' 55.4", com altitude aproximada de 780 m, ao lado do refeitório do campus. O clima da região é mesotérmico temperado, subtropical, super úmido; a precipitação acumulada anual é de 1822 mm e umidade relativa do ar anual de 75% (IAPAR, 2020).

2.2 Sistema de irrigação avaliado

O método envolve analisar a uniformidade de distribuição de água do aspersor móvel (porte pequeno e estacionário) não fixo de aspersor móvel de uma polegada (Figura 1). Posteriormente, foi introduzido um aspersor com pressão de serviço de 20 mca da marca Agropolo NY-25 com bocais laranja x cinza, com vazão de 0,860 m³/s gera um alcance de 26 metros.



Figura 1- Carro aspersor móvel

2.2 Instalações e coletas

O aspersor móvel foi estacionado no local do experimento e acoplado por uma mangueira de 50 metros (adaptado), e no início foi colocado um manômetro. A mangueira ligada a uma torneira de meia polegada para a avaliação dos ensaios. Posteriormente, realizaram-se duas coletas diferentes - na primeira etapa do *grid* amostral 1 em malha, foram realizados 25 ensaios de 0,25m e mais 25 para 0,50m para distribuição do aspersor. No ensaio 2, denominado de *grid* amostral 2 em cruz, foram realizados 25 ensaios de 0,25m e mais 25 para 0,50m com coletores tipo Becker com capacidade de 1000 ml (Figura 2). Assim, os ensaios duraram cerca de uma hora e ambos os ensaios, para a manutenção das mesmas características de função segundo MONTGOMERY (2001).



Figura 2 - Coletor tipo becker

Os cinquenta e quatro coletores foram instalados no *grid* amostral 1 com espaçamentos específicos entre a mangueira e o aspersor móvel estacionário (Figura 3 e 4). Vinte e sete coletores ficaram na posição 1 (esquerda) do aspersor e 27 na posição 2 (direita) totalizando 54 coletores espaçados 0,25 e 0,50 m entre cada, visando coletar toda pluviosidade dentro do dimensionamento de ação do aspersor móvel. Após os Vinte e cinco ensaios: nove ensaios durante o período da manhã (Ensaio 1, 2, 3, 4, 5, 14, 15, 16 e 17), seis, no período da tarde (Ensaio 6, 7, 18, 19, 20 e 21) e dez no período noturno (Ensaio 8, 9, 10, 11, 12, 13, 22, 23, 24 e 25) para visualizar a diferença entre o dia e noite e evitar a evaporação da água e o efeito do vento durante anoite que é menor.

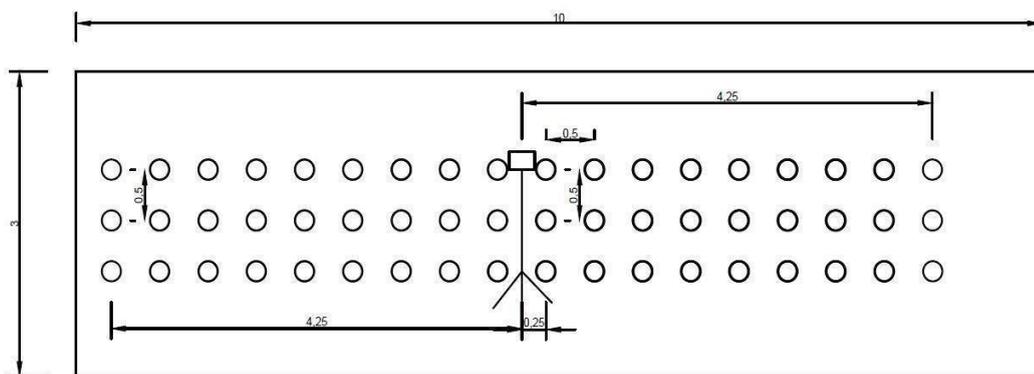


Figura 3 - Croqui do Grid amostral 1 de coletores e carro aspersor



Figura 4- Croqui Grid amostral 1 de coletores e o aspersor móvel em campo

No *grid* amostral 2, foram utilizados 36 coletores e o aspersor móvel (Figuras 5 e 6): nove coletores ficaram na posição 1 (esquerda); nove ficaram na posição 2 (à direita), nove na posição 3 (frente) e mais nove na posição 4 (trás) com espaçamento de 0,25 e 0,50m entre cada, sendo realizados 25 ensaios: 10 ensaios durante o período da manhã (Ensaio 3, 4, 5, 6, 15, 16, 17, 18, 24 e 25), 9 no período da tarde (Ensaio 7, 8, 9, 10, 19, 20, 21, 22 e 23) e seis deles no período da noite (Ensaio 1, 2, 11, 12, 13 e 14) (Figuras 5 e 6).

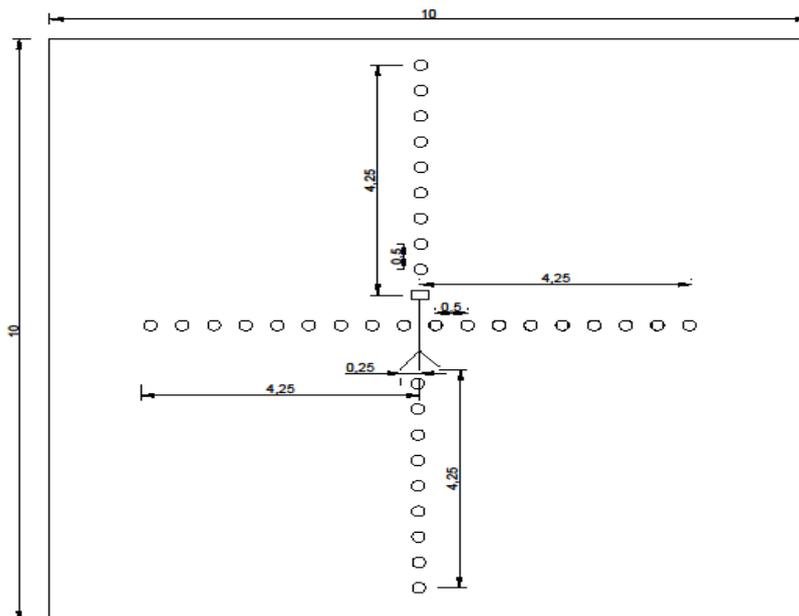


Figura 5 - Croqui Grid 2 de coletores e carro aspersor



Figura 6 - Croqui Grid 2 de coletores e carro aspersor em campo

2.3 Determinação da uniformidade da irrigação

A avaliação de distribuição da água e do processo de controle de qualidade da irrigação ocorreu para que fossem realizados testes de (Coeficiente de Uniformidade de Christiansen) CUC, o (Coeficiente de Uniformidade de Distribuição) CUD e o (Coeficiente de Uniformidade Estatístico) CUE, junto aos espaçamentos de 0,25 e 0,50 m, necessários para avaliar o processo de distribuição no estudo.

O coeficiente de uniformidade de distribuição da água é um dos principais parâmetros utilizados na irrigação, e caracteriza a qualidade da irrigação, o planejamento e a operação desses sistemas (OLIVEIRA & VILLAS BÔAS, 2008). São denominados, CUC (coeficiente de uniformidade de Christiansen),

CUD (coeficiente de uniformidade de distribuição) e o CUE (coeficiente de uniformidade estatístico).

O coeficiente de uniformidade de Christiansen foi criado por Christiansen (1942) e é classificado com o principal parâmetro que descreve a uniformidade de irrigação. Equação 1:

$$CUC = 100 \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{med}|}{n - x_{med}} \right\} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em %;

x_i - Valores individuais do volume de água contidos nos coletores, em mm;

x_{med} - Média geral dos valores dos volumes de água coletados, em mm;

n - Número de coletores na área de ensaio.

Na irrigação, quanto maior o coeficiente de uniformidade, melhor será o atendimento quanto às especificações. Com isso, os limites bilaterais, propostos por Mantovani, Bernardo e Palaretti (2007), classificaram uniformidade média com $75\% < CUC < 95\%$.

O coeficiente de distribuição (CUD) está relacionado à lâmina média aplicada na quarta parte total, que recebe menos água com a lâmina média aplicada na área total (CRIDDLE *et al.*, 1956), conforme quantificada pela Equação 2:

$$CUD = 100 \left(\frac{x_{25}}{x_{med}} \right) \quad \begin{array}{l} E \\ q. \\ 02 \end{array}$$

Em que:

CUD - Coeficiente de uniformidade de distribuição, em %;

x_{25} - Média do menor quartil dos volumes de água contidos nos coletores, em mm;

x_{med} - Média geral dos valores dos volumes de água coletados, em mm.

Wilcox & Swailes (1947) indicaram um coeficiente de uniformidade utilizando o desvio-padrão como medida de dispersão, aceitando valores acima de 75% (CUE), o qual está apresentado na Equação 3:

$$CUE = 100 * \left(1 - \frac{sd}{Q_{med}} \right) \quad \text{Eq. 03}$$

Em que: CUE: Coeficiente de Uniformidade Estatístico (%);

Sd - desvio-padrão dos valores de precipitação, em (Lh-1);

Qmed = média das vazões coletadas do aspersor na subárea (Lh⁻¹).

Com essas equações, torna-se possível avaliar o percentual calculado e classificar a eficiência do sistema de irrigação, mostrados na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 Critérios para classificação do CUC, CUD e CUE

CLASSIFICAÇÃO	CU C (%)	CUD (%)	CUE (%)
Excelente	> 90	> 84	90 – 100
Bom	80 – 90	68 - 84	80 – 90
Razoável	70 – 80	52 - 68	70 - 80
Ruim	60 – 70	36 - 52	60 – 70
Inaceitável	< 60	< 36	< 60

Fonte: MANTOVANI (2001)

2.3 Carta de Controle

As análises do processo de controle de qualidade da irrigação foram realizadas a partir de gráficos de controle para medidas individuais, que são os gráficos de Shewhart. Christiansen (1942) foi o primeiro pesquisador a propor um coeficiente para caracterizar a uniformidade de distribuição de água para aspersores rotativos, a fim de determinar o efeito da pressão de serviço, do espaçamento, da rotação e da velocidade do vento sobre a distribuição de água.

Os gráficos de controle determinam a estatística em uma faixa designada limites de controle, delimitada pela linha superior que são os limites superiores de controle e uma linha inferior denominada de limite inferior de controle, além de uma linha média. O objetivo dos gráficos de controle é verificar se o procedimento está sob controle, onde ele é livre ou isento de causas especiais.

Os gráficos de controle iniciaram-se nos Estados Unidos por Shewhart e, previnem alguns problemas relacionados à qualidade (MONTGOMERY, 2004). Os gráficos são utilizados para detectar a falta de controle em determinado processo e seu uso sistemático é bastante relevante, pois pode identificar e reduzir a variabilidade dos produtos em questão (VILAS BOAS, 2005).

Frigo *et al.* (2016) relatam que os gráficos de controle mais utilizados são os gráficos Xbarra (carta individual de controle de Shewhart), o gráfico EWMA ou MMEP (média móvel exponencialmente ponderada) e o gráfico CUSUM

tabular (soma cumulativa). Os gráficos do tipo Shewhart são utilizados para medidas individuais, de fácil manuseio e compreensão. Já para seu uso na construção dos gráficos de controle estatísticos de qualidade de Shewhart, é necessário calcular os Limites Inferior e Superior, obtidos pelas Equações 4 e 5:

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{MR}}{d_2} \quad \text{Eq. 04}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{MR}}{d_2} \quad \text{Eq. 05}$$

Em que

LSC- Limite de controle inferior;

LIC- Limite de controle superior;

$\bar{\bar{X}}$ - Média das médias;

\bar{MR} Média das amplitudes móvel dos dados;

d_2 – Esta é uma constante usada para amplitude móvel para $n=2$ ($d_2 = 1,128$), indicada por Montgomery (2009).

Capacidade de processo

O método proposto por Montgomery (2009) foi utilizado na realização da capacidade do processo, que calcula o índice C_p e leva em consideração se o processo é estável e se a variável de interesse se apresenta próxima do normal.

A capacidade de processo é uma técnica que tem sido utilizada para avaliar a uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação, dentre eles, a aspersão. Além disso, destaca-se a importância desta para verificar a variabilidade do processo e, assim, classificar os coeficientes de uniformidade (ANDRANDE et al., 2017).

A C_p é um índice que avalia os parâmetro que indiretamente mede o quanto um processo consegue atender às especificações, com isso, quanto maior o valor, melhor o processo que atenderá às exigências (MONTGOMERY, 2009).

Tamagi et al. (2016) relatam que o processo está estável quando as variações que estão ocorrendo nele, não são provocadas por fatores específicos, mas sim por fatores que ocorrem aleatoriamente. Para medir se o processo é capaz de atender todas às especificações desejadas, são utilizados: a Capacidade do processo (C_p) e o Desempenho do processo (C_{pk}). No cálculo de C_p , com ambas as limitações, tanto a inferior quanto a superior, utilizando a equação 06:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{LSC - LIC} \quad \text{Eq. 06}$$

Em que:

LIE – Limite inferior de especificações;

LSE - Limite superior de especificações;

LIC - Limite inferior de confiança;

LSC - Limite superior de confiança;

O C_{pk} permite ver e avaliar se o processo é capaz de atingir o valor nominal da especificação, pois visa, no processo, aos valores médios. Com isso, o índice C_{pk} pode ser interpretado como a medida da capacidade real do processo estudado. O C_{pk} pode ser definido como $C_{pk} = \text{Min} \{C_{pu}, C_{pl}\}$, onde os estimadores de C_{pu} e C_{pl} são definidos pelas Equações 07 e 08:

$$C_{pu} = \frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma} \quad \text{Eq 7}$$

$$C_{pl} = \frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma} \quad \text{Eq 8}$$

Análise de dados e delineamento experimental

O delineamento experimental foi um fatorial 2x2: fator 1 – *grid* amostral 1 e 2, e o fator 2 corresponde ao espaçamento do aspersor com os copos coletores (tipo becker) (0,25 0,50 cm).

Inicialmente, na pesquisa, foi realizada uma análise descritiva dos dados. Tal análise permite organizar, resumir e descrever o comportamento dos dados experimentais coletados. Para isso, elaborou-se uma tabela contendo média, desvio padrão, variância, valor mínimo e máximo e coeficiente de variação dos respectivos dados.

Os dados foram submetidos às pressuposições de normalidade pelo teste de Shapiro – Wilk. Os resultados foram submetidos à análise de variância e quando significativos foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A análise estatística foi realizada utilizando o programa estatístico RStudio (RStudio Team, 2015) e gráficos elaborados pelo software SigmaPlot®, versão 12.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise descritiva

Nota-se que, com base na análise descritiva (Tabela 2), de modo geral, o espaçamento entre coletores de 0,50 m para ambos os *grids*, as maiores médias, menores desvios, variâncias e coeficiente de variação dos dados para o CUC, CUD e CUE foram apresentados. Entretanto, os coeficientes CUC e CUD apresentaram as maiores médias, menores desvios, variâncias e coeficiente de variação quando se utilizou o grid 1. Já o CUE, no *grid 2*, apresentou maior média, menor desvio padrão, variância e coeficiente de variação.

Tabela 2 Análise descritiva para os coeficientes de uniformidade em função dos grids amostrais e espaçamento entre os coletores para 25 repetições.

CUC							
Grid	Esp. (m)	Média	D.P.	Var.	Min.	Máx.	CV
1	0,25	77,28	7,57	57,37	64,00	89,00	9,80
	0,50	81,36	7,48	55,90	68,00	91,00	9,19
2	0,25	77,52	8,58	73,60	64,00	91,00	11,06
	0,50	81,08	7,97	63,49	68,00	93,00	9,82
CUD							
Grid	Esp. (m)	Média	D.P.	Var.	Min.	Máx.	CV
1	0,25	67,44	10,58	111,92	46,00	82,00	15,68
	0,50	73,40	11,69	136,75	50,00	87,00	15,93
2	0,25	67,72	12,21	149,21	44,00	85,00	18,03
	0,50	71,68	12,27	150,48	47,00	88,00	17,11
CUE							
Grid	Esp. (m)	Média	D.P.	Var.	Min.	Máx.	CV
1	0,25	70,16	8,26	68,30	58,00	84,00	11,78
	0,50	74,76	8,18	67,02	62,00	89,00	10,95
2	0,25	73,16	8,19	67,14	60,00	88,00	11,19
	0,50	77,16	7,72	59,64	66,00	91,00	10,00

Sendo: CUC – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen; CUD – Coeficiente de Uniformidade de Distribuição e CUE – Coeficiente de Uniformidade Estático; Esp. – Espaçamento; D.P. – Desvio Padrão; Var. – Variância; Min. – Mínimo; Máx. – Máximo; CV. – Coeficiente de Variação.

Os coeficientes de variação (CV) obtidos em ensaios de campo são classificados em baixo, médio, elevado e muito alto para valores inferiores a 10%, 10 a 20%, 20 a 30% e superiores a 30%, respectivamente (PIMENTEL - GOMES, 2000). Neste sentido, para os ensaios realizados, o CV variou de 9,8 a 18,03, indicando uma variação média. Essa variação indica que os dados coletados apresentaram pouca variação entre si, ou seja, que o ensaio foi bem elaborado. Rodrigues et al. (2019), ao analisarem três arranjos quadrangular, triangular e retangular e diferentes espaçamento entre aspersores, encontraram um coeficiente de variação para o CUC e CUD de 3,89 e 6,88%, e classificados como coeficiente de variação baixo. Campelo et al. (2014) relatam que a variação em dados coletados de uniformidade de água em

irrigação por aspersão vem sendo rotineiramente relatada na literatura. Entretanto, muitas dessas variações estão associadas à utilização de arranjos inadequados ou à operação sob baixa pressão com aspersores que não apresentam bom desempenho sob esta condição.

3.2 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) está descrita na Tabela 3, logo, foi possível observar que não houve interação significativa entre os fatores (espaçamento x grid), mas de forma isolada, houve efeito significativo para o fator espaçamento e não houve o mesmo efeito para o fator grid.

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA), coeficiente de variação (CV), média e desvio padrão para os coeficientes de uniformidade em função dos grids amostrais e espaçamento entre os coletores dos 25 ensaios.

FV	p valor		
	CUC	CUD	CUE
Grid	0,9899 ^{ns}	0,7591 ^{ns}	0,0986 ^{ns}
Espaçamento	0,0176*	0,0367*	0,0092*
Interação	0,8698 ^{ns}	0,6703 ^{ns}	0,8533 ^{ns}
CV (%)	9,97	16,71	10,97
Espaçamento	Média ± Desvio Padrão		
0,25	77.40 ± 8.01	67.58 ± 11.30	71.66 ± 8.28
0,50	81.22 ± 7.65	72.54 ± 11.89	75.95 ± 7.97

Sendo: FV – Fontes de Variação; ^{ns} - não significativo ($p > 0,05$); * - significativo ($p < 0,05$); CUC – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen; CUD – Coeficiente de Uniformidade de Distribuição e CUE – Coeficiente de Uniformidade Estático.

Observa-se, na Figura 7, que os coeficientes de uniformidade (CUC, CUD e CUE) foram superiores em 0,50 m ao espaçamento de 0,25 m. Os coletores espaçados a 0,25 m apresentaram CUC, CUD e CUE de 77,4, 57,58 e 71,66%, menores, respectivamente, enquanto os coletores espaçados a 0,50 m apresentaram 81,22, 72,54 e 75,95%. Os dados corroboram com a norma ISO 15886-3 (2012), que recomenda o espaçamento de 0,5 m na avaliação da uniformidade de aplicação de água, indicando que espaçamentos menores não melhoram a uniformidade de aplicação. Charles et al. (2020), ao analisarem cinco espaçamentos entre coletores (0,125; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0 m) e dois modelos de aspersores (aspersor A e B, com vazão de 1,4 e 3,0 m³ h⁻¹, respectivamente), encontraram os maiores valores de CUC para os espaçamentos maiores que 0,50 m, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho.

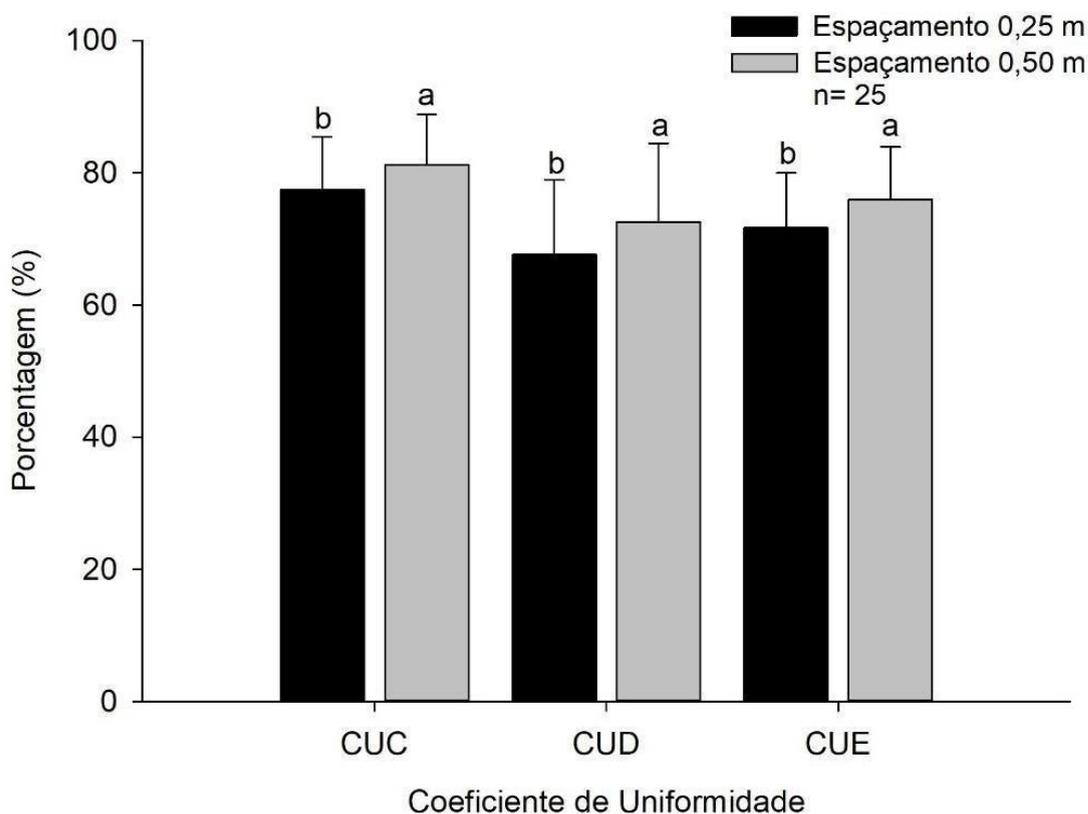


Figura 7. Coeficientes de uniformidade em função dos espaçamentos entre os coletores. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de comparações múltiplas Tukey ($p < 0,05$). As barras indicam o desvio padrão da média de 25 repetições.

Observa-se na Figura 7 que apresenta os coeficientes de uniformidade (CUC, CUD e CUE) que para o espaçamento 0,25 m, os valores foram 77,40, 67,58 e 71,66% para CUC, CUD e CUE, respectivamente, enquanto para o espaçamento entre coletores de 0,50 m apresentou valores de 81,22, 72,54 e 75,95% para CUC, CUD e CUE, respectivamente.

Os coeficientes de uniformidade são classificados como excelente, bom, razoável, ruim e inaceitável (MANTOVANI, 2001; ASABE, 2008). Assim, o espaçamento entre coletores de 0,25 m *grid 1* exibiu CUC, CUD e CUE razoável, enquanto os coletores espaçados a 0,50 m obtiveram “bom” como classificação para CUC e CUD e classificação razoável para CUE. Para o *grid 2*, os espaçamentos entre coletores de 0,25 m obtiveram como classificação razoável para CUC e CUE e bom para CUD, já para o espaçamento 0,50, as respostas foram: bom para CUC e CUD e razoável para CUE. Resultados com valores de uniformidade razoável, devido às coletas no período da tarde com velocidade do vento entre 3,80 a 5,03 m s⁻¹.

A agricultura Irrigação apresenta benefícios para as culturas agrícolas e para a agricultura irrigada. Assim, é fundamental que o projeto de irrigação seja dimensionado com critério e respeito aos princípios hidráulicos. Um projeto mal dimensionado resulta em uma baixa eficiência na aplicação da água, a qual implicará aumento nos custos de bombeamento e, principalmente, redução da produtividade (NASCIMENTO; FEITOSA; SOARES, 2017).

O irrigante pode utilizar alguns coeficientes de uniformidade para avaliar a uniformidade de aplicação de água pelos sistemas de irrigação, os quais demonstram a variabilidade de distribuição da água aplicada pelo sistema. Em sistemas de irrigação por aspersão, podem-se utilizar: o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e o Coeficiente de Uniformidade Estático (CUE) para avaliar a aplicação de água, pois conseguem identificar a variação na lâmina aplicada (FRIZZONE et al., 2011; BERNARDO et al., 2019).

Desta forma, é possível identificar pelos coeficientes se o projeto e o funcionamento do sistema estão corretos, levando-se em consideração o tipo de aspersores, o espaçamento e a pressão operacional do sistema (TAMAGI et al., 2018). Além disso, com o estudo dos coeficientes, pode-se alcançar uma elevada eficiência de aplicação para garantir a redução do consumo de água e energia (RODRIGUES et al., 2019).

3.3 Efeito da velocidade do vento

Na Figura 8A, é possível observar que nos ensaios que utilizaram o grid amostral 2 para o espaçamento entre coletores de 0,25 metro, no período da manhã (ensaios 3 ao 6, 15 ao 18, 24 e 25), o CUC variou de 73 a 89%, a velocidade do vento variou de 0 a 3,18 m s⁻¹, no período da tarde (ensaios 7 ao 10 e 19 ao 23) com CUC de 64 a 70%, e 3,80 a 5,03 m s⁻¹ e à noite (ensaios 1, 2 e 11 ao 14), para 75 a 91% 0 a 2,77 m s⁻¹. Já no espaçamento entre coletores de 0,50 m houve variação na velocidade do vento, sendo que no período da manhã, os resultados foram de 0 a 2,16 m s⁻¹ para CUC 78 a 91% à tarde de 2,36 a 4,21 m s⁻¹ para CUC 68 a 77% e à noite de 0 a 1,95 m s⁻¹ com resultados de 79 a 93% para CUC.

Para o *grid* amostral 1 (Figura 8b) com o espaçamento entre coletores de 0,25 metro, a velocidade do vento no período da manhã (ensaios 1 ao 5 e 14 ao 17) variou de 1,33 a 3,80 m s⁻¹, CUC 70 a 82%, à tarde, (ensaios 6, 7 e 18 ao 21) variou

de 2,98 a 5,03 m s^{-1} CUC 64 a 74% e à noite (ensaios 8 ao 13 e 22 ao 25) de 0 a 1,95 m s^{-1} para CUC de 79 a 89. Enquanto, para o espaçamento entre coletores de 0,50 para o período da manhã, a variação foi de 0,51 a 2,77 m s^{-1} , CUC 78 a 86% à tarde de 2,36 a 4,21 m s^{-1} CUC de 68 a 77% e à noite de 0 a 1,13 m s^{-1} , onde valores de CUC foram de 83 a 91%. Foram obtidos resultados semelhantes por JUSTI et al. (2010) em que CUC tendeu a diminuir com o aumento da velocidade do vento, e a maior parte de ensaios foi conduzida com velocidade do vento entre 1,5 a 3 m s^{-1} .

AZEVEDO et al. (2000) conduziram um estudo em que verificaram a interferência de fatores climáticos em um sistema de irrigação por aspersão, ou seja, a velocidade do vento interferiu no processo analisado em que o CUC caiu de 83 para 42% quando a velocidade do vento aumentou de 1 para 7 m s^{-1} .

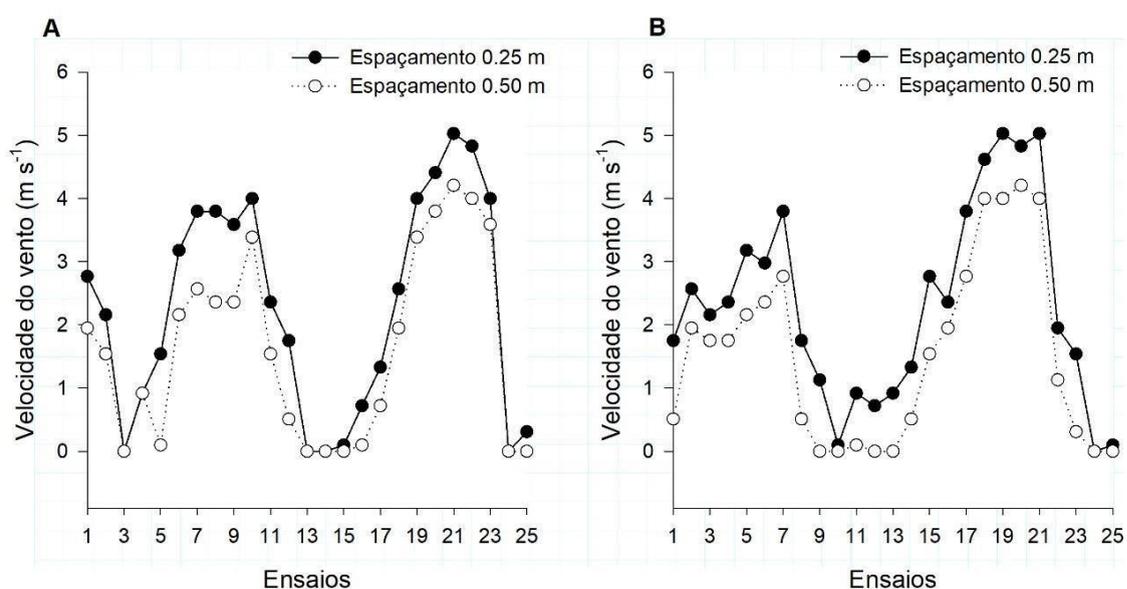


Figura 8. Velocidade do vento para os grids cruz (A) e malha (B) para 25 repetições

Os resultados mostraram que, no período da noite, a velocidade do vento é menor para ambos os *grids* e espaçamentos entre coletores. Assim, pode ser um indicativo de que a determinação da uniformidade de aplicação de água pelo sistema de irrigação por aspersão a partir dos coeficientes (CUC, CUD e CUE), no período da noite, pode haver menos influência da velocidade do vento, tendo em vista que o sistema simula a ação da chuva. Esta condição corrobora com Faria et al. (2012), pois a distribuição da água pelo sistema de irrigação por aspersão é diretamente afetada pelo vento.

As condições do vento afetam diretamente a distribuição da água, desta forma, sugere-se que a irrigação seja realizada quando a velocidade do vento for inferior a 2,5 m s^{-1} (DUKES, 2006). Além disso, as perdas de água causadas por deriva (vento)

reduzem significativamente a eficiência no uso da água (MAROUFPOOR et al., 2017).

3.4 Controle estatístico de qualidade

O estudo baseado no controle estático de qualidade (gráfico de controle) possibilita ao pesquisador reduzir a variabilidade dos dados bem como permite uma produção de produtos voltados para uma necessidade, por exemplo, especificações de projetos de irrigação (MONTGOMERY, 2017).

Observa-se na Figura 9A que o CUC no *grid* 1 com espaçamento entre coletores de 0,25 m que 72% dos valores estão dentro dos limites de controle de qualidade, 16% abaixo e 12% acima. Na Figura 10B, o CUD apresentou 80% dos valores dentro dos limites, 16% abaixo e 4% acima. Já para o CUE, 100% dos valores estão dentro dos limites de controle de qualidade (Figura 10C).

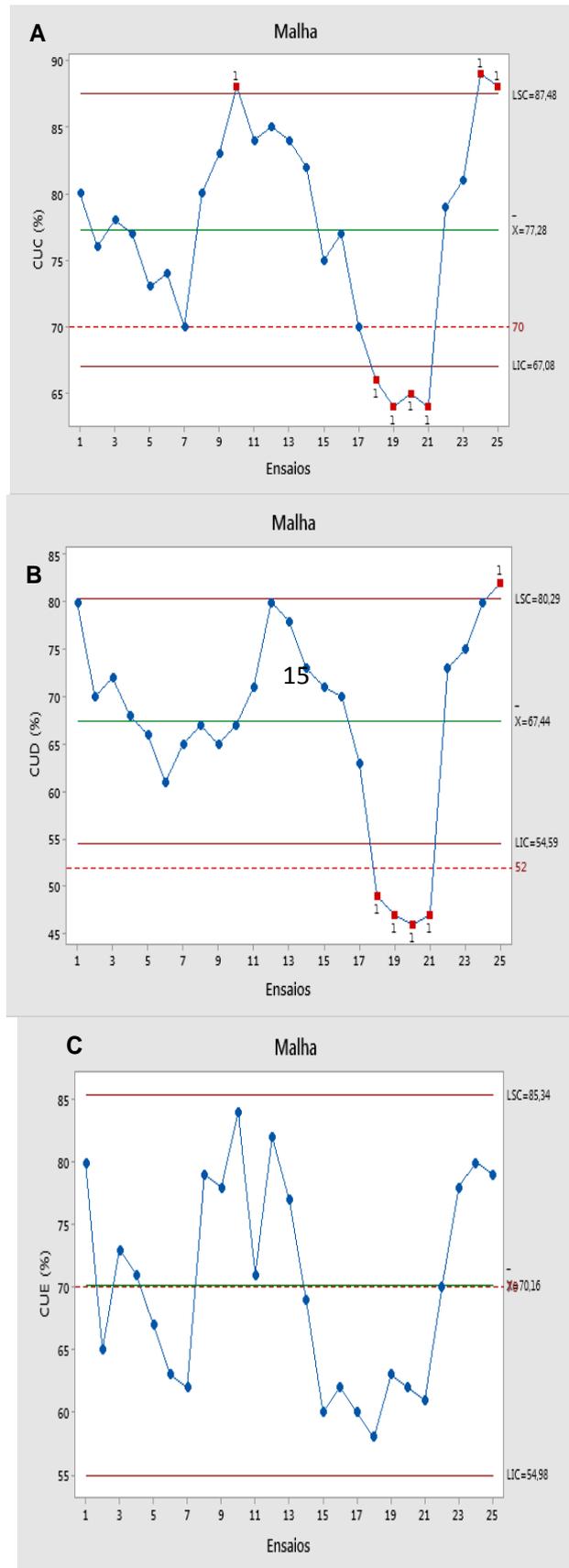
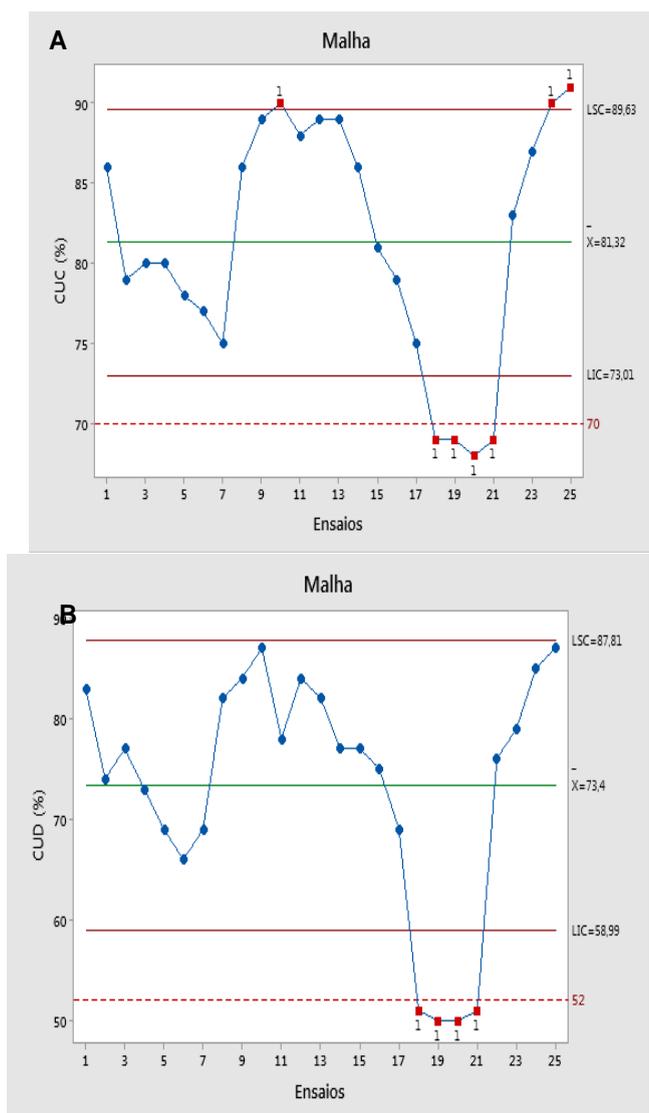


Figura 9. Controle Estático de Qualidade para os coeficientes de uniformidade CUC (A), CUD (B) e CUE (C) considerando o *grid* 1 com espaçamento entre coletores de 0,25 m e 25 repetições.

Na Figura 10A, é possível observar que o CUC, quando utilizou o *grid* 1 com espaçamento entre coletores de 0,50 m, foi igual ao espaçamento de 0,25 m. Já na Figura 11B, observa-se que 84% dos valores para o CUD estão dentro dos limites e 16% abaixo do limite. Todavia, para o CUE (Figura 10C), 96% dos valores situam-se dentro dos limites e 4% abaixo do limite de controle de qualidade.

Valores que ficaram acima do limite de controle, e dentro do limite de controle Figuras 9 e 10, foram as coletas realizadas no período noturno e diurno, em que os fatores climáticos não interferiram, mas os pontos que ficaram abaixo do limite de controle tiveram as coletas realizadas na parte da tarde quando o fator vento estava intenso ($5,03 \text{ m s}^{-1}$). Resultados encontrados por Justi et al., (2010) em estudos realizados com 25 ensaios, verificaram que uma das coletas esteve acima do limite de controle e as demais dentro do limite de controle.



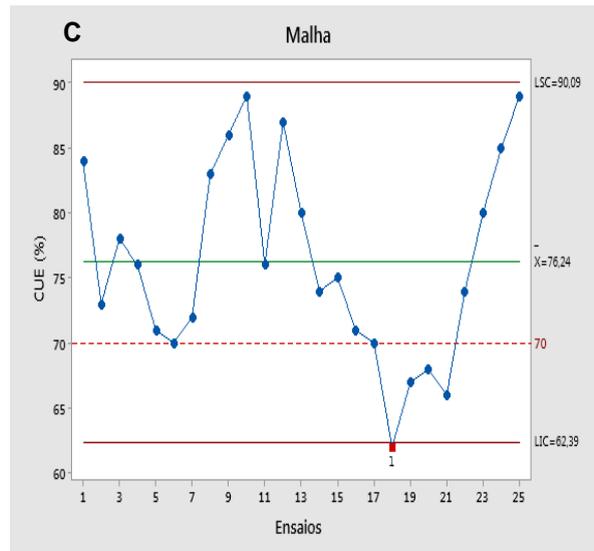


Figura 10. Controle Estático de Qualidade para os coeficientes de uniformidade CUC (A), CUD (B) e CUE (C) considerando o *grid* 1 com espaçamento entre coletores de 0,50 m 25 repetições.

O *grid* 2 com espaçamento entre coletores de 0,25 m resultou em 88% dos valores para o CUC dentro dos limites, 8% abaixo e 4% acima do limite de controle de qualidade (Figura 11A). Na Figura 11B, nota-se que 76% dos valores do CUD estão dentro dos limites e 20% abaixo e 4% acima do limite de controle de qualidade. Em relação ao CUE (Figura 11C), observa-se que 84% dos valores localizam-se dentro dos limites, 8% abaixo e acima do limite de controle de qualidade.

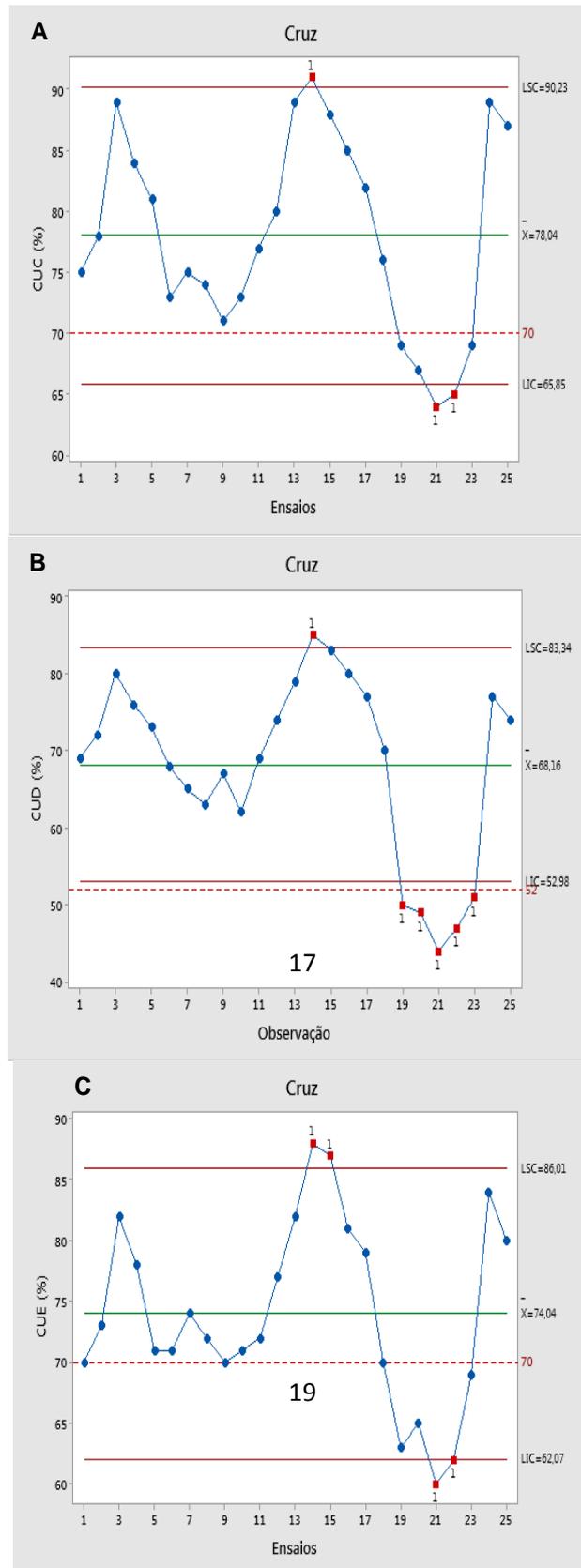
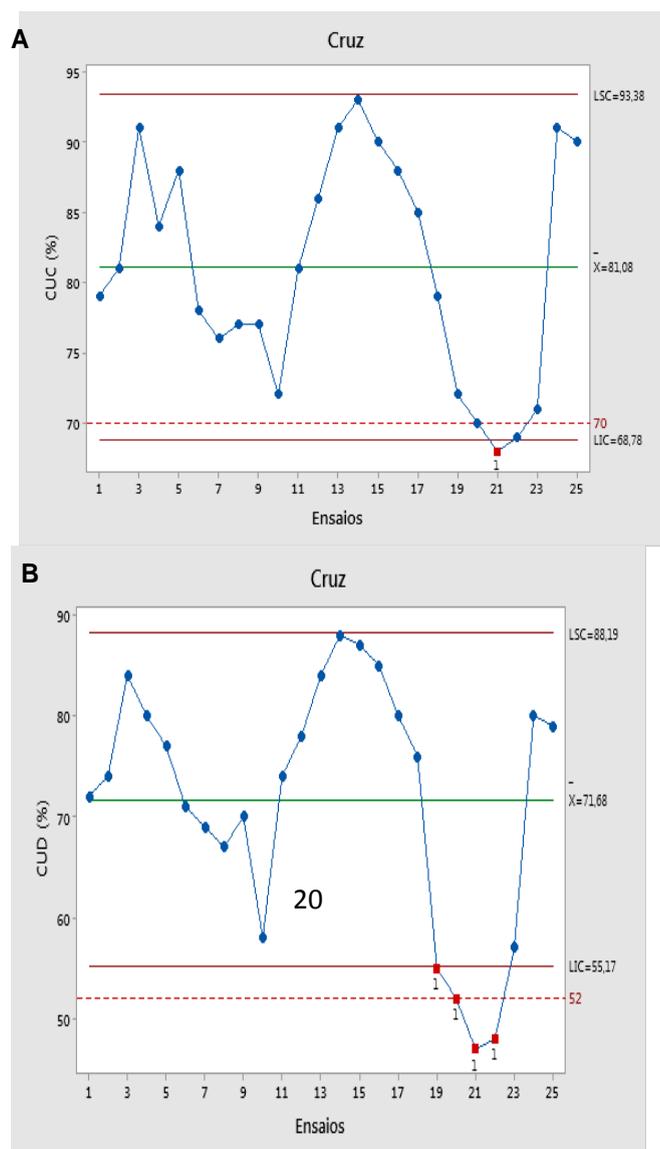


Figura 11. Controle Estático de Qualidade para os coeficientes de uniformidade CUC (A), CUD (B) e CUE (C) considerando o *grid* 2 com espaçamento entre coletores de 0,25 m e 25 repetições.

Na Figura 12, estão apresentados os controles de qualidade para CUC, CUD e CUE considerando o *grid 2* com espaçamento entre coletores de 0,50 m. Após a análise referente à dispersão dos dados, notou-se que 96% deles estavam dentro dos limites de controle e 4% estavam abaixo do limite de controle de qualidade para o CUC (Figura 12A). O CUD apresentou 84% dos valores dentro dos limites de controle e 16% deles estavam abaixo do limite de controle, enquanto o CUE obteve 92% dentro dos limites de controle e 8% deles estavam acima do limite de controle.



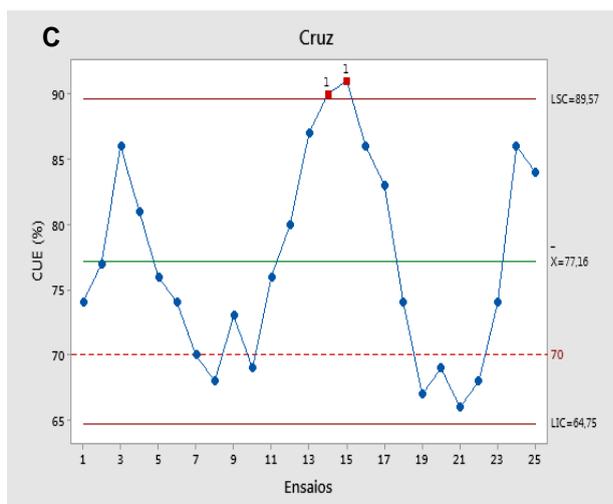


Figura 12. Controle Estático de Qualidade para os coeficientes de uniformidade CUC (A), CUD (B) e CUE (C) considerando o *grid 2* com espaçamento entre coletores de 0,50 m e 25 repetições

Conforme observado nos gráficos de controle estático de qualidade, notou-se que alguns dos ensaios apresentaram valores de CUC, CUD e CUE abaixo do limite de qualidade.

No *grid 2* (ensaio 21) e para o *grid 1* (ensaios 18 ao 21), ambos no período da tarde e com espaçamento de 0,25 m entre coletores foi observado maior valor da velocidade do vento, a qual correspondeu a $5,03 \text{ m s}^{-1}$ e menor valor para os respectivos coeficientes de uniformidade. Isso demonstra a influência do vento na determinação dos coeficientes no período da tarde.

Em um estudo realizado por Frigo (2012), foi constatado que o vento influenciou negativamente os coeficientes de uniformidade resultando em valores abaixo do limite de controle de qualidade. Além disso, Montgomery (2009) acrescenta que valores fora dos limites de controle de qualidade necessitam de estudos mais aprofundados. Por outro lado, valores acima (DE QUÊ? PRECISA DE UM PARÂMETRO DE COMPARAÇÃO) devem ser considerados como “aceitáveis”, pois quanto maior o valor do coeficiente, maior será a uniformidade de aplicação de água, ou seja, maior economia de água (FRIGO, 2012).

As variações observadas nos coeficientes de uniformidade ao longo dos ensaios estão associadas às variações climáticas, uma vez que os ensaios foram realizados em diferentes períodos do dia. Desta forma, o irrigante e/ou técnico deve monitorar as condições climáticas locais, principalmente, a velocidade do vento para que não ocorra interferência na uniformidade de aplicação de água pelo sistema de irrigação por aspersão.

Conforme Frigo et al., (2014), ao utilizarem dados de uniformidade de distribuição de água no seu sistema de irrigação por aspersão, e aplicarem os gráficos de controle de Shewart, os autores verificaram que o vento é um fator que pode influenciar diretamente sobre CUC. Assim, Frigo et al. (2016) relatam que, para medidas individuais, o gráfico de controle de Shewart demonstrou ser melhor, pois apresenta melhores resultados para avaliação da irrigação por aspersão na presença de dados autocorrelacionados.

Estudos realizados por Bishaw; Olumama (2015), Faria et al. (2016), Li et al. (2016) e Norenberg et al. (2017) evidenciam o efeito negativo da velocidade do vento maior que 2 m s^{-1} na aplicação de água via sistemas de irrigação por aspersão, em que, quanto maior a velocidade do vento, menores são os valores dos coeficientes de uniformidade.

Darko et al. (2017), com base nos resultados apresentados, sugerem que o irrigante não negligencie o efeito da velocidade do vento no momento das irrigações, sendo ainda, necessário adotar estratégias de manejo de aplicação da água, de modo que, a uniformidade dos sistemas de irrigação por aspersão não seja comprometida.

3.5 Capacidade de processo

A capacidade de processo com base nos índices C_p e C_{pk} para os coeficientes de uniformidade pode ser observada na Tabela 4. De acordo com a classificação proposta por Montgomery (2009), o índice C_p , cujo valor seja $\geq 1,33$, o processo é classificado como capaz e/ou adequado, mas, se houver variação entre $1 \leq C_p < 1,33$, o processo é classificado como é aceitável; todavia, caso $C_p < 1$, o processo é classificado como incapaz ou inadequado. Já para o índice C_{pk} , quando $C_{pk} < 1$, o desempenho real do processo é classificado como inadequado, se $1 \leq C_{pk} \leq 1,33$, o desempenho é classificado como aceitável e caso, $C_{pk} \geq 1,33$ o desempenho real do processo é classificado como capaz. Ademais, a condição $C_p < C_{pk}$ indica que o processo se encontra fora de especificação.

Tabela 4. Capacidade de Processo para os coeficientes de uniformidade em função dos grids e espaçamento entre os coletores com 25 repetições.

CUC					
Grid	Esp. (m)		C_p	C_{pk}	
1	0,25	20	1,28	1,25	
	0,50		1,32	1,01	
2	0,25		1,09	1,09	
	0,50		1,02	0,97	
CUD					
Grid	Esp. (m)			C_p	C_{pk}
1	0,25		1,40	1,13	
	0,50		1,28	0,94	
2	0,25		1,16	0,98	
	0,50		1,24	0,99	
CUE					
Grid	Esp. (m)		C_p	C_{pk}	
1	0,25		0,76	0,60	
	0,50		0,74	0,66	
2	0,25		0,94	0,76	
	0,50		1,01	0,90	

Sendo: C_p – Capacidade de processo e C_{pk} – Desempenho do processo para as 25 repetições

Os resultados obtidos apontam que todos os coeficientes de uniformidade, independentemente do *grid* e do espaçamento entre coletores, a capacidade de processo está fora do ponto de especificação ($C_{pk} < C_p$). Tais resultados corroboram com Tamagi et al. (2016) que, ao analisarem dois tipos de aspersores (compensantes e não compensantes) e duas alturas da haste de 1 e 1,5 m, obtiveram processo dentro do ponto de especificação. Isso mostra que a distribuição está centrada, mas há uma variação maior que a faixa dos limites de especificação.

Para o índice C_p , verificou-se que o CUC em ambos os *grids* e espaçamento entre coletores apresentou uma capacidade de processo classificada como aceitável. Já o índice C_{pk} para o *grid* 1 ambos espaçamentos (0,25 m e 0,50 m) e para o *grid* 2 no espaçamento 0,25m, os valores foram classificados como aceitáveis. Por outro lado, o *grid* 2 com espaçamento 0,50m foi classificado como incapaz ou inadequado.

Quando se utilizou o *grid* 1 com espaçamento entre coletores de 0,25 m, o CUD apresentou índice C_p superior a 1,33, cuja classificação é adequada ou capaz, enquanto para (VER) o índice C_{pk} , o processo foi classificado como aceitável. Para o *grid* 1 com espaçamento de 0,50 m e para o *grid* 2, para (VER) ambos os espaçamentos, o índice C_p foi classificado como aceitável enquanto o índice C_{pk} foi classificado como incapaz ou inadequado.

Para o coeficiente de uniformidade CUE, apenas o índice C_p para o *grid* 2 no espaçamento de 0,50 m, foi classificado como aceitável, enquanto para as demais condições (*grid* e espaçamento) os índices C_p e C_{pk} foram classificados como inadequados.

A capacidade de processo representa uma análise sobre a aplicação de água por meio de sistemas de irrigação, sendo assim, indica a capacidade do processo de

se manter constante, pois apresenta coeficientes de uniformidade aceitáveis (JUSTI; VILAS BOAS; SAMPAIO, 2010). Os respectivos autores encontraram um índice de capacidade do processo de 2,26 para um CUC entre 70 e 75%; quando os valores de CUC estavam entre 75 e 80%, o índice de capacidade do processo encontrado foi de 2,97 e, quando o CUC foi maior que 80%, o índice de capacidade do processo foi de 3,00.

FRIGO (2014) obteve índice de capacidade de processo de 0,623 para CUC, cuja variação foi de 74,6 a 92,2% para irrigações diurnas, e índice de capacidade de processo de 2,688 para CUC com variação entre 85,3 e 93,7% para irrigações noturnas.

4 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados encontrados, conclui-se com o presente trabalho que:

i) Pela análise de variância dos dados, não houve efeito significativo para comparação dos *grids* amostrais. Os *grids* não influenciaram os coeficientes de uniformidade, representados pelo CUC, CUD e CUE;

ii) O espaçamento entre coletores de 0,50 m proporcionou os melhores valores para os coeficientes de uniformidade;

iii) A velocidade do vento afetou diretamente os coeficientes de uniformidade, com valores de 3,80 a 5,03 m s⁻¹;

iv) O estudo do controle estático de qualidade possibilitou observar a variabilidade dos dados ao longo dos ensaios e, de modo geral, grande parte dos dados situaram-se dentro dos limites de qualidade, pois observou-se que o vento é uma variável que influencia diretamente a eficiência de aplicação, esta por sua vez, é representada pelos coeficientes de uniformidade;

v) O período da tarde se mostrou menos propício para a determinação dos coeficientes, haja vista os ensaios neste período se apresentaram abaixo do limite inferior do gráfico de controle para *grid* 1 CUC 73,01, CUD 58,99, CUE 62,39 e *grid* 2 CUC 65,85, CUD 52,98, CUE 62,07;

vi) De acordo com a capacidade de processo, todos os coeficientes de uniformidade estão fora do ponto de especificação do processo ($C_{pk} < C_p$).

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A. B. de; CUNHA, F. F. da; RAMOS, M. M.; SOARES, A. A.; PIZZILOLO, T. A. de; OLIVEIRA, R. A. de. **Análise da automação em um sistema de irrigação convencional fixo por miniaspersão**. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v. 15, n. 2, p. 109-118, 2007.
- ANDRADE, M. G.; VILAS BOAS, M. A.; SIQUEIRA, J. A. C.; DIETER, J.; SATO, M.; HERMES, E.; MERCANTE, E.; TOKURA, L. K. Statistical quality control for evaluation of uniformity of microsprinkler irrigation with photovoltaic solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 743-753, 2017.
- ASABE - **AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS**. EP 405.1: standards, design and installation of microirrigation systems, 2008.
- AZEVEDO, J. H.; BERNARDO, S.; RAMOS, M. M.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R. Influência de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.2, p.152-158, 2000.
- BERNANDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de Irrigação**. 9 ed. atual. Ampl. Viçosa, MG: UFV, 2019.
- BISHAW, D, OLUMAMA, M. Evaluating the effect of operating pressure and riser height on irrigation water application under different wind conditions in Ethiopia. **Asia Pacific Journal of Energy and Environment**, v. 3, n. 1, p. 41-48, 2015. DOI: 10.18034/apjee.v3i1.230.
- BRENNAN, D. Factors affecting the economic benefits of sprinkler uniformity and their implications for irrigation water use. **Irrigation Science, Heidelberg**, v. 26, n. 2, p. 109-119, 2008.
- CAMPELO, A. R.; FERNANDES, C. N. V.; SILVA, A. R. A.; OLIVEIRA, S. R. M.; BEZERRA, F. M. L.; CÂNDIDO, M. J. D. Avaliação de sistemas de irrigação por aspersão em malha em áreas cultivadas com capim-braquiária. **Agropecuária Técnica**, v. 1, n. 35, p.1-12, 2014. DOI: <https://doi.org/10.25066/agrotec.v35i1.9869>
- CARRIÓN, P.; TARJUELO, J. M.; MOTERO, 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.
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station. 1942. 124p. Bulletin, 670.
- CRIDDLE, W. D.; DAVIS, S.; PAIR, C. H.; SHOCKLEY, D. G. Methods for evaluating irrigation systems. Washington DC: Soil Conservation Service - USDA, 1956. 24p. **Agricultural Handbook**, 82.
- CHARLES, T. S.; PINTO, M. F.; SALVADOR, C. A.; ALVES, D. G.; RICARDO, H. C.; CAMARGO, B. T. C. Influência do espaçamento entre coletores na determinação do perfil de distribuição de aspersores. **Braz. J. of Develop.**, v. 6, n. 8, p, 2020.

DARKO, R. O.; SHOUQUI, Y.; JUNPING, L.; HAOFANG, Y.; XINGYE, Z. Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of sprinkler irrigation. **Int. J. Agric. & Biol Eng.**, v. 10, n. 2, p. 1-15, 2017.

DUKES, M. D. Effect of wind speed and pressure on linear move irrigation system uniformity. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n. 4, p. 541-548, 2006.

FARIA, L. C.; BESKOW, S.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E. 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.

FARIA, L. C.; BESKOW, S.; COLOMBO, A.; NOREMBERG, B. G.; RETTORE NETO, O.; SIMOES, M. C. Influence of the wind on water application uniformity of a mechanical lateral move irrigation equipment using rotating plate sprinklers. **Ciência Rural**, v. 46, n. 1, p. 83-88, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141558>

FRIGO, J. P. **Controle do processo da irrigação no sistema de aspersão convencional em Palotina-PR**. 2012Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Cascavel, 2012.

FRIGO, J. P. **Controle estatístico da qualidade na irrigação por aspersão**. 2014. 43f. Tese (Doutor em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR.

FRIGO, J. P.; VILAS BOAS, M. A.; FRIGO, J. P.; FRIGO, E. P. Comparação Entre Gráficos de Controle de Shewhart, Cusum e MMEP no Processo de Irrigação por Aspersão Convencional. **Irriga**, Botucatu, v. n. p. 56-70, 2016.

FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L. **Irrigação por aspersão**. v. 1. Maringá, EDUEM, 2011.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Classificação climática**. Cartas climáticas. Disponível em: <http://http://www.iapar.br/weather/previsoes.php?cidade=1387>. Acessado em 29 de janeiro de 2020.

ISO – **International Organization for Standardization**. ISO 15886-3 – Agricultural irrigation equipment – sprinklers – part 3 - Characterization of distribution and test methods, 2012.

JUSTI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C. Índice de capacidade de processo na avaliação da irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 1-5, 2010.

LI, L. H.; ZHANG, X. Y.; QIAO, X. D.; LIU, G. M. Analysis of the decrease of center pivot sprinkling system uniformity and its impact on maize yield. **Int. J. Agric. & Biol. Eng.**, v. 9, n. 4, p. 108-119, 2016.

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. O uso da irrigação no Brasil. O estado das águas no Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. **CD-ROM**, 1999.

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**. 3 ed. Viçosa, Ed. UFV, p. 355, 2012.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação, princípios e métodos**. 2 Ed. atual. e Ampl. – Viçosa: Ed. UFV, 2007, 358p.

MAROUFPOOR, E.; SANIKHANI, H.; EMAMGHOLIZADEH, S.; KIŞI, Ö. Estimation of Wind Drift and Evaporation Losses from Sprinkler Irrigation systems by Different Data-Driven Methods. **Irrigation and Drainage**, v. 67, n. 2, p. 222–232, 2017. DOI: 10.1002/ird.2182.

MIRANDA, E. P; ROSAL, G. B. Comparação entre método trecho a trecho e o método de múltiplas saídas no dimensionamento de uma linha lateral de um sistema de irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**. ISSN 2359-1412/RBGAS-2018-0077/5/11/10/919. 2018.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 500 p.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores; Revisão técnica Luiz da Costa Laurencel. – 4 ed., reimpr.- Rio de Janeiro: LTC, 2009. 513p.

NASCIMENTO, V. F.; FEITOSA, E. O.; SOARES, J. I. Uniformidade de distribuição de um sistema de irrigação por aspersão via pivô central. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 4, p. 65-69, dez. 2017.

NORENBERG, B. G.; FARIA, L. C.; RETTORE NETO, O.; BESKOW, S.; COLOMBO, A. TIMM, L. C.; MANKE, E. B. Wind speed and direction on water application uniformity of a mechanical lateral-move irrigation system. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 33, n. 4, p. 543-549, 2017.

OLIVEIRA, M. V. A. M. de; VILLAS BOAS, R. L. Uniformidade de distribuição do potássio e do nitrogênio em sistema de irrigação por gotejamento. **Eng. Agríc.** [online]. 2008, v. 28, n. 1, p. 95-103. ISSN 0100-6916. PIMENTEL-GOMES, F. Curso de Estatística Experimental. 14 ed. Piracicaba: Editora Degaspari, 2000, 477p.

PLAYÁN, E.; SALVADOR, R.; FACI, J. M.; ZAPATA, N.; MARTÍNEZ-COB, A.; SÁNCHEZ, I. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. **Agricultural Water Management**, Zaragoza, Espanha, v. 76, p. 139-159, 2005.

RODRIGUES, L. G.; NERY, A. R.; SOUSA, F. R. R.; RODRIGUES, L. N. Coeficientes de uniformidade em aspersores de baixa vazão com diferentes arranjos e altura da haste. **Revista Verde**, v. 14, n. 2, p. 170-180, 2019.

RStudio Team. **RStudio: Integrated Development Environment for R**. Boston, MA, 2015.

TAMAGI, J. T.; URIBE-OPAZO, M. A.; VILAS BOAS, M. A.; JOHANN, J. A.; GUEDES, L. P. Spatial variability of the water depth applied by fixed sprinkler irrigation systems. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 2, p. 188-196, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v.38.n.2.p.188-196>, 2018.

TAMAGI, J. T.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; VILAS BOAS, M. A. Uniformidade de distribuição de água de irrigação por aspersores compensantes e não compensantes em diferentes alturas. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 631-647, outubro-dezembro, 2016.

VILAS BOAS, E. B. B. **Estudo da qualidade da matéria-prima de uma fábrica de ração para frangos de corte utilizando cartas de controle e técnicas taguchi de custo mínimo**. 2005. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Agronegócio) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo – PR, 2005.

WILCOX, J. C.; SWAILES, G. E. Uniformity of water distribution by some under tree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, v. 27, n. 11, p. 565-583, 1947.