

## COMPARAÇÃO ENTRE GRÁFICOS DE CONTROLE DE SHEWHART, CUSUM E MMEP NO PROCESSO DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

JIAM PIRES FRIGO<sup>1</sup>; MARCIO ANTONIO VILAS BOAS<sup>2</sup>; JIANICE PIRES FRIGO<sup>2</sup> E ELISANDRO PIRES FRIGO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território - ILATIT (UNILA), Av. Tancredo Neves, 3838 - Porto Belo, CEP 85867-970, Foz do Iguaçu, PR, Fone (45)99993 4783, e-mail: [jianfrigo@gmail.com](mailto:jianfrigo@gmail.com)

<sup>2</sup> Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola (Unioeste), R. Universitária, 2069 - Jardim Universitário CEP 85819-110, Cascavel-PR

<sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná, Campus Palotina R. Pioneiro, 2153 - Dallas, CEP 85950-000, Palotina-PR

### 1 RESUMO

O objetivo deste estudo foi comparar os resultados da utilização dos gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais, com os gráficos de controle média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) e soma cumulativa (CUSUM), aplicados no controle de qualidade da irrigação. Foram realizados 60 ensaios de irrigação em um sistema por aspersão convencional. As análises do processo de controle de qualidade do sistema de irrigação foram realizadas por meio dos gráficos de Shewhart (Xbarra), gráficos MMEP e CUSUM. Todos os procedimentos para os ensaios de uniformidade da irrigação foram realizados conforme recomendação NBR ISO 7749-2 (ABNT, 2000). Para a avaliação do sistema foi utilizado o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). O gráfico de controle MMEP apresentou-se bastante suscetível quando utilizado em dados auto correlacionados, com ocorrências de alarmes falsos. Para dados independentes (pelo modelo ARIMA), o gráfico CUSUM foi mais sensível ao detectar as variações ocorridas na irrigação devido à velocidade do vento, quando comparado aos gráficos MMEP e Shewhart para os mesmos dados. Na irrigação por aspersão, relacionando CUC com velocidade do vento, o gráfico de Shewhart foi mais indicado pela simplicidade, robustez e facilidade de interpretação, mesmo na presença de dados que violam a suposição de independência. Os gráficos de controle de Shewhart, MMEP e CUSUM provaram serem ótimas ferramentas estatísticas no estudo da irrigação por aspersão convencional, demonstrando muito bem a variabilidade no processo.

**Palavras-Chave:** água, vento, Coeficiente de Christiansen, Controle de qualidade.

**FRIGO, J.P.; VILAS BOAS, M.A.; FRIGO, J.P.; FRIGO, E.P.**  
**COMPARISON BETWEEN SHEWHART CONTROL CHARTS, CUSUM AND MMEP IN PROCESS OF CONVENTIONAL IRRIGATION SPRINKLER**

### 2 ABSTRACT

This study aimed to compare the results of Shewhart control charts use for individual measures with exponentially weighted moving average (MMEP) and cumulative sum (CUSUM) control charts applied in quality control of conventional sprinkler irrigation. Sixty irrigation trials were

set up in a conventional sprinkler system. The analyses of the quality control process of the irrigation system were performed by means of Shewhart charts (Xbarra) charts, MMEP and CUSUM. All procedures for testing uniformity of irrigation were performed as recommended by ISO 7749-2 (ABNT, 2000). For the evaluation of the system, it was used Christiansen Uniformity Coefficient (CUC). The control chart MMEP showed to be quite susceptible when used in auto correlated data with instances of false alarms. For independent data (the ARIMA model), the CUSUM tabular chart was more sensitive to detect variations in irrigation due to wind speed, when compared to MMEP and Shewhart charts for the same data. In sprinkler irrigation, relating CUC with wind speed, the Shewhart chart was better due to such features as simplicity, robustness and easiness of interpretation, even in the presence of data that violate the assumption of independence. The Shewhart control charts, CUSUM and MMEP statistics proved to be great tools in the study of irrigation sprinkler, demonstrating very well the variability in the process.

**Keywords:** water, wind, Christiansen coefficient, control charts, Quality control.

### 3 INTRODUÇÃO

A preocupação com a qualidade de produtos e serviços oferecidos sempre esteve presente na história da humanidade, desde os tempos do mercantilismo e da produção artesanal, pois para que os produtos fossem trocados ou comercializados, deveriam possuir características desejáveis pelos consumidores. Passado alguns anos, o surgimento de novos modelos gerenciais, a melhoria e monitoramento da qualidade durante um processo, tornou-se uma necessidade para muitos (MONTGOMERY, 2009), aprimorando o controle da inspeção por meio de técnicas estatísticas.

No contexto de monitorar a qualidade na irrigação, o controle estatístico refere-se a um conjunto de ferramentas utilizadas com o objetivo de possibilitar o acompanhamento e intervenção em um processo. Esta técnica ajuda a desenvolver gráficos, que podem ser utilizados para avaliar o desempenho da irrigação. Entre as ferramentas que compõem o controle estatístico de qualidade, estão os gráficos de controle que segundo Montgomery (2009), são ferramentas eficientes e de simples interpretação no monitoramento da média e da variabilidade da característica da qualidade em observação, em irrigação pode ser a lâmina de água aplicada.

Os gráficos de controle mais conhecidos e 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).

O gráfico de controle de Shewhart para medidas individuais (Xbarra) é um dos mais utilizados devido à simplicidade e facilidade de construção e interpretação. Segundo Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010) este gráfico mostrou-se viável e adequado, identificando as variações no processo, bem como a influência da velocidade do vento na eficiência da irrigação. Esta constatação também é reforçada por Zhou et al. (2008), Reis et al. (2011) e Albiero et al. (2012), os quais também comprovaram a eficiência da técnica e recomendaram sua utilização para as mais diversas áreas.

Na irrigação por aspersão, o vento é uma das variáveis climáticas de grande influencia na eficiência de aplicação (PLAYÁN et al., 2005; OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009), porém esta variável pode ocorrer com menor intensidade em períodos noturnos, apresentando menores perturbações nos indicativos de qualidade da irrigação (FRIGO et al., 2013).

Pequenas variações em um processo podem não ser percebidas pelo gráfico de controle de Shewhart, nesses casos, é aconselhável a utilização dos gráficos EWMA ou MMEP (média móvel exponencialmente ponderada) e o gráfico CUSUM (soma cumulativa). Estes gráficos são mais sensíveis para detectar pequenos desvios em relação à média de um processo. Portanto, tais métodos apresentam maior rapidez e credibilidade na identificação de pequenos desajustes no processo (MONTGOMERY, 2009).

Em todo e qualquer processo que se deseja qualidade, torna-se essencial a existência de mecanismos simples, para indicar rapidamente a ocorrência de eventos que resultam em um descontrole no processo. No caso da irrigação por aspersão torna-se indispensável monitorar variáveis climáticas, principalmente o vento, os gráficos de controle apresentam esse perfil.

Assim, o objetivo deste estudo foi analisar os resultados da utilização dos gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais, gráficos MMEP (média móvel exponencialmente ponderada) e CUSUM tabular (soma cumulativa), aplicados no controle de qualidade, possibilitando identificar o gráfico mais indicado para utilização na irrigação por aspersão convencional.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados 60 ensaios de irrigação em um sistema por aspersão convencional, em condições ambientais nos períodos diurno (considerado entre 6h e 20h) e noturno (após as 20h), o vento foi monitorado por um anemômetro digital fixado a 2 m de altura no local do experimento. O sistema constituiu-se de duas linhas laterais de PVC para irrigação 1", espaçadas de 6 m entre si; e conjunto de quatro aspersores da marca SENNINGER, modelo Xcel-Wobbler HA 3/4", altura do tubo de subida 1,0 m, e espaçamento de 6 x 6 m, os coletores eram espaçados em 1 m entre si. A pressão de serviço foi monitorada e adequada às especificações dos aspersores. Foi realizada estatística descritiva para a medida de tendência central (média ( $\bar{X}$ )) e medidas de dispersão (desvio padrão amostral (s), coeficiente de variação (CV), mínimo e máximo), com o auxílio da ferramenta estatística de controle de qualidade desenvolvida dentro do software Minitab (Licensing 16.1.1-Language English).

As análises do processo de controle de qualidade da irrigação por aspersão convencional foram realizadas por meio dos gráficos de controle para medidas individuais, conhecidos como gráficos de Shewhart ( $\bar{X}$  barra), gráficos de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) também conhecido como EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) e gráficos de soma cumulativa (CUSUM). Considerando que o número de amostras é grande  $n > 25$ , pelo Teorema do Limite Central assume-se normalidade dos dados, requisito necessário para aplicação das técnicas de gráficos de controle.

Todos os procedimentos para os ensaios de uniformidade da irrigação foram realizados conforme recomendação NBR ISO 7749-2 (ABNT, 2000). Para a avaliação do sistema foi utilizado o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). Keller e Bliesner (2009) propôs a seguinte classificação para CUC, ao estipular o valor mínimo aceitável para irrigação por aspersão, conforme Tabela 1.

**Tabela 1.** Classificação do Coeficiente de Uniformidade (CUC)

Classes	Uniformidade (%)
Excelente	> 90
Bom	85 - 90
Mínimo	> 78
Inaceitável	< 78

Fonte: Sprinkle and Trickle Irrigation. Keller e Bliesner (p. 43, 2009).

O método de Christiansen (CUC) é uma das maneiras mais utilizadas para se medir o coeficiente de uniformidade, a qual expressa a variabilidade da lâmina de irrigação, aplicada na superfície do solo em relação à lâmina média aplicada em cada aspersor (BERNARDO, SOARES; MANTOVANI, 2008; MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2012), conforme a equação 1.

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}}\right) 100 \quad \text{eq. 1}$$

Em que:

CUC : Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, (%);

$x_i$  : Precipitação no coletor de ordem  $i$ , (mm);

$\bar{x}$  : Média aritmética das precipitações, (mm);

$n$  : Número de coletores na área experimental.

Para avaliar se as irrigações testadas ficaram em conformidade com as especificações, bem como seu comportamento ao longo do tempo, foram utilizados os seguintes gráficos:

O gráfico de Controle de Shewhart individual consiste em uma linha central que representa a média da característica de qualidade desejada, uma linha superior do limite de controle superior (LCS) e outra linha inferior do limite de controle inferior (LCI), pontos que representam o andamento do processo, são apresentados entre essas linhas quando o mesmo está sob controle.

Os limites inferior e superior dos gráficos de Controle de Shewhart para medidas individuais foram calculados a partir das equações 2 e 3, respectivamente.

$$LCI = \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad \text{eq. 2}$$

$$LCS = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad \text{eq. 3}$$

Em que:

LCI : Limite de controle inferior;

LCS : Limite de controle superior;

$\bar{x}$  : Média dos dados;

$\overline{MR}$  : Média da amplitude móvel dos dados;

$d_2$  : Constante quando usada uma amplitude móvel de  $n= 2$  observações ( $d_2 = 1,128$ ) (MONTGOMERY, 2009).

O gráfico de controle MMEP é muito utilizado para detectar pequenas variações no comportamento dos dados, fornecendo uma estimativa da nova média do processo, a qual poderá mudar a característica da qualidade desejada. Este gráfico acumula informações sucessivas, ponderando as amostras e atribuindo maior peso para as informações mais recentes.

O gráfico de controle MMEP pode ser construído pela plotagem de  $Z_i$  versus o número da amostra  $i$  (ou tempo). O gráfico da média móvel exponencialmente ponderada pode ser definido pela equação 4.

$$Z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)Z_{i-1} \quad \text{eq. 4}$$

Em que:

$$0 < \lambda \leq 1 ;$$

$$Z_i = \mu_0 = \bar{x} \text{ (valor alvo ou valor médio em controle de } x_i)$$

A variância da variável  $z$  é dada pela equação 5.

$$\sigma_{zi}^2 = \sigma^2 \left( \frac{\lambda}{2-\lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^{2i}] \quad \text{eq. 5}$$

Em que:

$\sigma$ - é o desvio padrão dos dados em relação à média;

$\lambda$ - peso dado a cada amostra;

$i$ - ordem da amostra utilizada.

Os limites para o gráfico de controle MMEP são dados pelas equações 6 e 7.

$$\text{LCS} = \bar{x} + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad \text{eq. 6}$$

$$\text{Linha Central} = \mu_0 = \bar{x}$$

$$\text{LCI} = \bar{x} - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad \text{eq. 7}$$

Em que:

$\bar{x}$ - média dos dados;

$\lambda$ - peso dado a cada amostra, é uma constante que varia de 0 a 1;

$L$ - número de desvios padrão da média de controle que se quer detectar;

$i$ - ordem da amostra utilizada.

Para os gráficos de controle MMEP (EWMA) deste estudo, foi utilizado como constante de peso da amostra  $\lambda = 0,25$  e para largura dos limites o fator  $L = 2$ , valores que segundo Montgomery (2009) funcionam muito bem na prática.

Os gráficos de controle CUSUM guardam informações acumuladas de toda a sequência de pontos, e por isso torna-se mais sensível para detectar pequenos desvios da média de um processo, capaz de reconhecer rapidamente pequenas alterações. É um gráfico de controle avançado, desenvolvido para situações específicas, mas que ao mesmo tempo minimiza a ocorrência de alarmes falsos (SAMOHYL, 2012).

A ideia do gráfico de soma cumulativa é particularmente simples: considerando-se um gráfico de soma acumulada para a média de um processo, quando este permanece sob controle,

com os dados em torno do valor alvo, a soma acumulada comporta-se de maneira aleatória com média zero, no entanto, se a média do processo aumentar ou diminuir, terá uma tendência positiva ou negativa respectivamente, desenvolvendo uma soma cumulativa.

No gráfico de controle CUSUM, os desvios em relação à média são acumulados ao longo do tempo, gerando uma soma cumulativa obtida conforme a equação 8.

$$C_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \mu_0) \quad \text{eq. 8}$$

Em que

$x_j$ - média da j-ésima amostra de tamanho  $n \geq 1$ ;

$C_i$ - soma cumulativa até a i-ésima amostra.

Existem duas maneiras de representar os gráficos CUSUM, o chamado gráfico CUSUM tabular e o procedimento máscara V, porém o estudo pela máscara V é um esquema bilateral, não sendo muito útil para problemas de monitoramento em processos unilaterais (MONTGOMERY, 2009). Em casos de estudos de uniformidade de irrigação, quanto maior for o CUC, melhor será a irrigação, assim a análise torna-se mais coerente por um processo unilateral pelo limite inferior.

O gráfico CUSUM tabular acumula desvios que estão abaixo ou acima do valor alvo, com estatísticas  $C_i^-$  e  $C_i^+$  respectivamente. Estas são chamadas CUSUM superior  $C_i^+$  e CUSUM inferior  $C_i^-$ , as quais são expressas pelas equações 9 e 10.

$$C_i^+ = \text{máx}[0; x_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+ ] \quad \text{eq. 9}$$

$$C_i^- = \text{máx}[0; (\mu_0 + K) - x_i + C_{i-1}^- ] \quad \text{eq. 10}$$

Em que

$\mu_0$ - média da amostra;

$x_i$ - observação no tempo;

$C_i$ - soma cumulativa até a i-ésima amostra, pode ser negativa  $C_i^-$  ou positiva  $C_i^+$ ;

$K$ - valor de compensação ou folga.

O valor de compensação  $K$  é formalizado no CUSUM tabular para tolerar pequenas modificações, este valor é diminuído dos desvios positivos e acrescentado aos desvios negativos. Para monitoramento de médias, tanto na prática quanto na literatura, é comum a utilização de  $K = 0,5$ , isto significa que, está deixando de se preocupar com variações de meio desvio padrão no processo; este valor  $K$  permite o planejamento do gráfico para detectar alterações específicas (MONTGOMERY, 2009).

Para os gráficos de controle CUSUM tabular deste estudo, foram utilizados como constantes  $h = 4$  e para largura dos limites o fator  $K = 0,5$ , valores que segundo Montgomery (2009) possuem boa praticidade.

A suposição que geralmente é citada para o uso dos gráficos de controle são que os dados devem ser independentes. A investigação da auto correlação dos dados torna-se importante, pois caso os dados sejam auto correlacionados, os gráficos de controle podem apresentar resultados enganosos sob forma de alarmes falsos (MONTGOMERY, 2009). Entretanto, existem técnicas que minimizam os efeitos da auto correlação nos dados.

Neste estudo os valores foram plotados em um gráfico de auto correlação, constituído no software MINITAB 16, e os dados auto correlacionados foram submetidos ao modelo auto

regressivo integrado de média móvel (ARIMA), aplicando os gráficos de controle aos resíduos, eliminando assim o efeito da auto correlação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizada uma análise descritiva, com o intuito de caracterização geral do processo de irrigação. Na Tabela 2 apresenta-se a estatística descritiva para Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Lâmina aplicada (Lâmina), Eficiência de Aplicação dos Aspersores (Ea) e velocidade do vento (Vento).

**Tabela 2.** Análise descritiva das variáveis CUC, Lâmina, Ea e vento.

<b>Análise de 60 ensaios de irrigação por aspersão</b>	<b>CUC (%)</b>	<b>Lâmina (mm)</b>	<b>Ea (%)</b>	<b>Vento (m s<sup>-1</sup>)</b>
Norma para o coeficiente	78,00	-	-	-
Máximo	93,73	8,59	88,80	4,32
Mínimo	74,60	3,38	28,31	0,00
Média	88,61	7,19	71,92	1,55
Desvio Padrão	3,95	1,33	15,32	1,18
Variância	15,60	1,76	234,55	1,38
Coeficiente de Variação (%)	4,46	18,45	21,29	75,95
CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen	Vento – Velocidade média do vento			
Ea – Eficiência de aplicação dos Aspersores	Lâmina – Lâmina aplicada na área irrigada			

Observando a variável CUC na Tabela 2, a qual caracteriza a irrigação, pode-se verificar a presença de grande dispersão nos dados, variando de um mínimo de 74,60% ao máximo de 93,73%. Nota-se ainda, que as maiores variações ocorreram na velocidade do vento, a qual possui coeficiente de variação 75,95%, partindo de um mínimo de 0 a um máximo de 4,32 m s<sup>-1</sup>, demonstrando que o vento apresenta variações de velocidade desde as primeiras horas do dia até a noite.

O vento tem grande influência na eficiência de aplicação da irrigação por aspersão (PLAYÁN et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2009). Neste estudo, também foi evidenciado tal tendência, observando na Tabela 2 a variação da velocidade do vento e também nos valores de eficiência de aplicação dos Aspersores (Ea), em que apresentou valores mínimos de 28,31%, que para irrigação seria resultados totalmente inaceitáveis pelo desperdício de água e energia, mas também se obteve máximo de 88,80%, considerado bons resultados para irrigação por aspersão.

Para melhor investigação do processo de irrigação por aspersão, foi realizado um estudo das variáveis CUC e Ea, classificando os ensaios em diferentes faixas de velocidade do vento, conforme Tabela 3. Nesta observa-se, que os maiores resultados de CUC e Ea correspondem às menores faixas de velocidade do vento, corroborando com Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010), que em estudo de controle de qualidade em irrigação por aspersão, afirmam que houve tendência do CUC diminuir com o aumento da velocidade do vento.

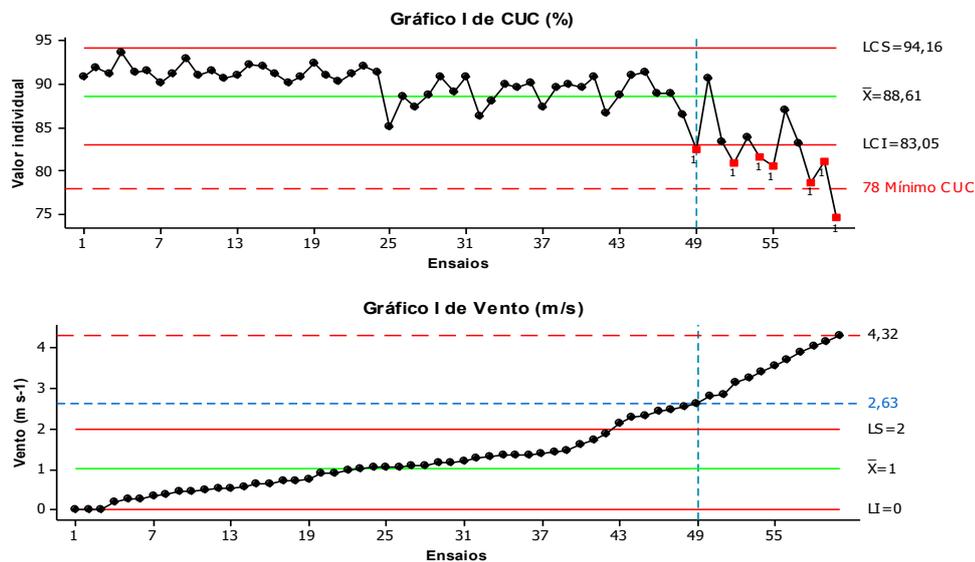
**Tabela 3.** Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), e Eficiência de aplicação dos Aspersores (Ea), para diferentes velocidades de vento.

Vento ( $\text{m s}^{-1}$ )	CUC (%)	Ea (%)
0,0 a 1,0	91,4	78,9
1,1 a 2,0	89,0	74,8
2,1 a 3,0	88,0	68,2
> 3,0	81,3	43,0

Estes resultados podem ser evidenciados pelos gráficos de controle das Figuras 1, 2 e 3, que representam a variável CUC para todos os 60 ensaios ordenados de menor para maior velocidade do vento, sendo que, o primeiro ponto em todos os gráficos corresponde ao ensaio submetido a menor incidência de vento, e sucessivamente até o último ponto, em que o ensaio obteve maior velocidade de vento e menor CUC.

Observa-se no gráfico de controle de Shewhart para a variável CUC (Figura 1), que o processo de irrigação por aspersão está fora de controle estatístico, pois a partir da amostra 49 ocorre grande variabilidade no Coeficiente de Uniformidade de Christiansen ( $\text{CUC} = 82,44\%$ ), mostrando pontos abaixo do limite inferior de controle calculado a partir dos dados, tal fato ocorreu quando a velocidade média do vento esteve igual ou maior que  $2,63 \text{ m s}^{-1}$ .

Neste estudo pode-se observar que, o processo apresentava bons resultados, mantendo-se sob controle quando a velocidade média dos ventos esteve menor que  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ , embora ocorra neste trecho do gráfico, uma sequência de pontos acima da média, que poderia classificar como fora de controle. Dechmi et al. (2003), alerta que agricultores devem ter muito cuidado no momento da irrigação, pois ventos acima de  $2,1 \text{ m s}^{-1}$ , resultaram em aplicações de água irregular, levando a perdas consideráveis no rendimento da irrigação.

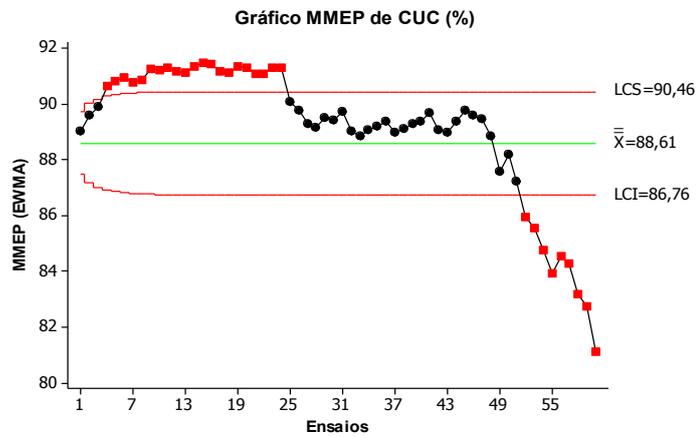
**Figura 1.** Gráfico Shewhart para CUC organizados da menor para maior velocidade de vento

Nos ensaios 52, 54, 55, 58 e 59 observados na Figura 1, verificam-se pontos extrapolando o limite inferior de controle calculado, a causa desta variação, é devido a interferência da variável climática que mais influencia na irrigação por aspersão, a velocidade do vento, que nestes ensaios se mantem acima de  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ . Ainda assim, os valores ficaram acima de 78%, limite mínimo indicado por Keller e Bliesner (2009), para irrigação por aspersão.

No último valor exposto pelo gráfico individual de Shewhart, foi observado o valor mais elevado para velocidade do vento ( $4,3 \text{ m s}^{-1}$ ), comprovando a influência desta variável climática na distribuição da lâmina de água na irrigação por aspersão convencional, e apresentando CUC de 74,6%, abaixo do mínimo aceitável para irrigação por aspersão (CUC=78%). Resultados similares aos reportados neste estudo, foram descritos por Yacoubi et al. (2010), os quais obtiveram maiores valores de CUC (81%) com velocidade próxima a  $1,7 \text{ m s}^{-1}$  e, os menores, (65%) com velocidade acima de  $4,0 \text{ m s}^{-1}$ .

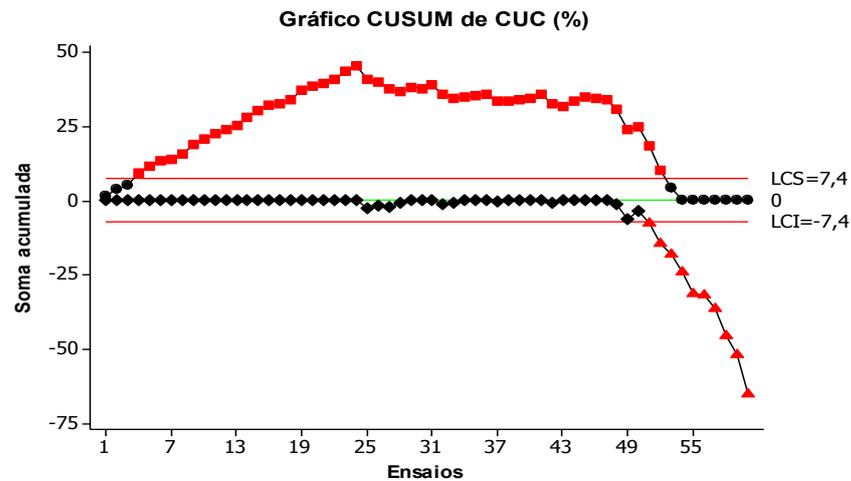
Analisando o gráfico MMEP da variável CUC (Figura 2), fica evidente que o processo da irrigação por aspersão está fora de controle estatístico, pois apresenta muitos pontos fora dos limites tanto inferiores quanto superior.

**Figura 2.** MMEP para CUC



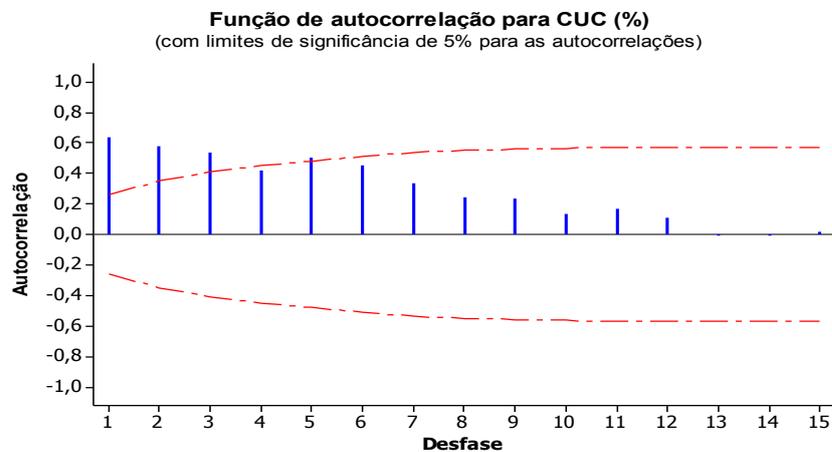
A partir do ensaio 52 os pontos fora do limite inferior de controle estatístico, são ocasionados pela grande variabilidade do vento, mesma causa apontada pelo gráfico de Shewhart, apresentando menores volumes de água nestes pontos.

O gráfico de soma cumulativa (CUSUM) na Figura 3, exibe a grande maioria das observações fora dos limites de controle, o que já era esperado, devido à grande variabilidade dos dados e também pela característica de acumular desvios que o CUSUM possui, detectando facilmente pequenas variações.

**Figura 3.** CUSUM para CUC

A literatura atual sobre gráficos de controle menciona a suposição de que os dados precisam ser independentes, já Montgomery (2009), afirma que a investigação da auto correlação dos dados torna-se bastante importante, pois caso ocorra dos dados serem auto correlacionados, os gráficos de controle podem apresentar resultados enganosos sob forma de alarmes falsos.

A verificação da independência dos dados foi verificada pelo gráfico da função de auto correlação (FIGURA 4).

**Figura 4.** Gráfico de auto correlação dos dados

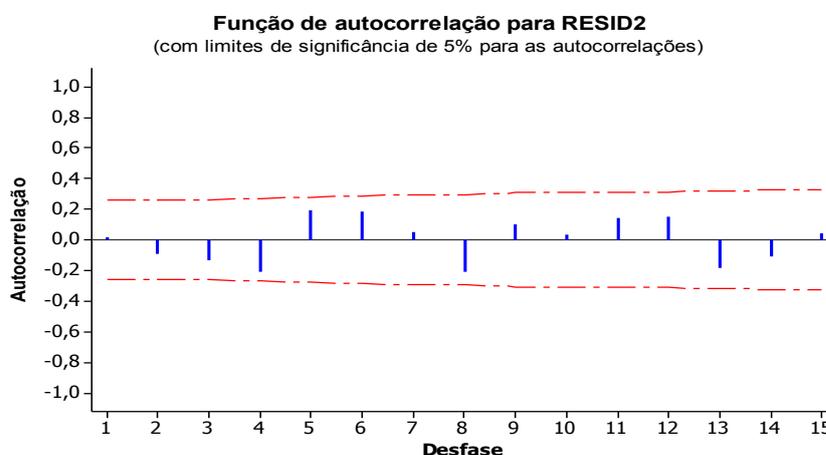
As linhas tracejadas são os limites de dois desvios padrão para o parâmetro de auto correlação, as três linhas azuis que excedem os limites dos desvios caracterizam dados auto correlacionados, possivelmente de ordem 3, sendo que o grau de correlação foi verificado pela significância do modelo ARIMA conforme Tabela 4.

**Tabela 4.** Estimadores do modelo ARIMA

Tipo	Coef	SE Coef	T	P
AR 1	-0,5968	0,1446	-4,13	0,000*
AR 2	-0,3649	0,1562	-2,34	0,023*
AR 3	0,0479	0,1481	0,32	0,747
Constante	-0,4626	0,3144	-1,47	0,147

\* significativo p-valor  $\leq 0,05$

Observa-se na Tabela 4, que o modelo AR 3 não foi significativo ( $p = 0,747$ ), apenas os modelos AR 1 e AR 2 apresentaram significância ( $p < 0,05$ ), assim pode-se considerar adequado o modelo ARIMA de 2ª ordem, o qual foram gerados resíduos para elaboração dos gráficos de controle.

**Figura 5.** Gráfico de auto correlação para resíduos de 2ª ordem

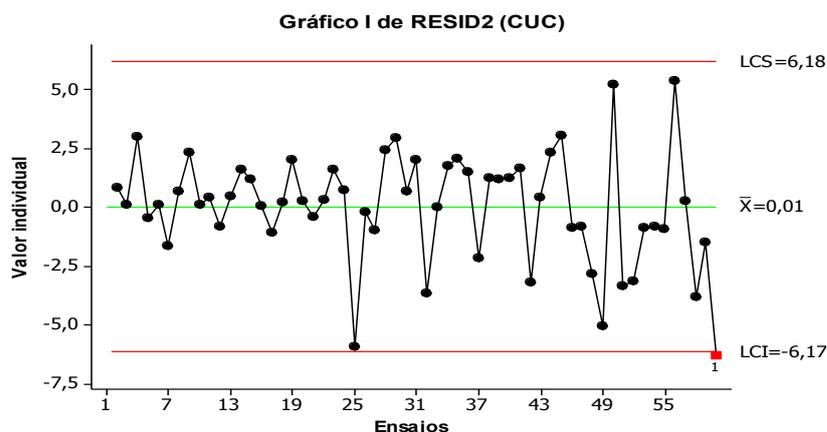
Os resíduos gerados pelo modelo ARIMA de 2ª ordem, foram bem ajustados e não apresentam auto correlação, como pode ser visualizado na Figura 5, pois nenhuma das linhas azuis verticais excedem as linhas tracejadas horizontais, que são os limites de dois desvios padrão para o parâmetro de auto correlação.

A partir da remoção do efeito da auto correlação nos dados, apresenta-se uma nova estatística descritiva (Tabela 5), pois a média dos dados não correlacionados foi utilizada para a confecção dos novos gráficos de controle.

**Tabela 5.** Estatística descritiva dos resíduos do modelo ARIMA de 2ª ordem

Variável	Total	Média	Desvio Padrão	Variância
RESID2	60	0,007	2,348	5,511

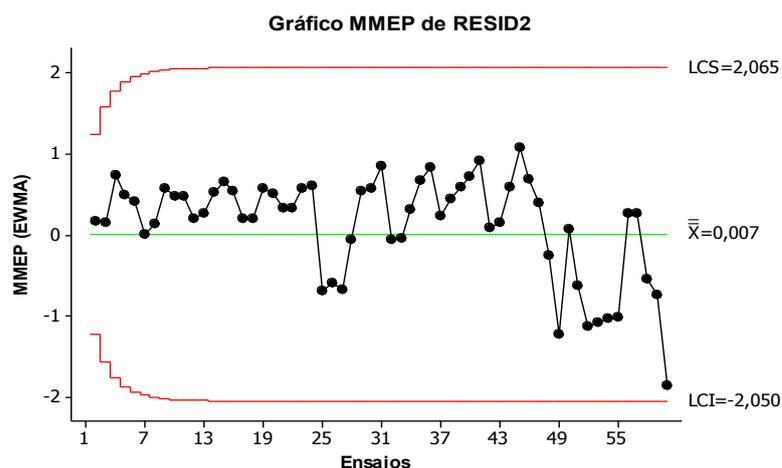
Após a eliminação do efeito de auto correlação pelo modelo ARIMA ajustado de 2ª ordem, a média e o desvio padrão apresentados na Tabela 5, foram utilizados para os cálculos dos limites e confecção dos gráficos de controle de Shewhart, MMEP e CUSUM tabular, os quais são apresentados nas Figuras 6, 7 e 8.

**Figura 6.** Gráfico de Shewhart com ARIMA 2ª ordem para CUC

No gráfico para medidas individuais de Shewhart, construído a partir dos resíduos da variável CUC, observa-se que o processo de irrigação por aspersão está fora de controle estatístico. Nota-se que, apenas o último ponto, está abaixo do limite inferior de controle, diferentemente do gráfico de controle de Shewhart, gerado a partir da variável natural CUC, em que os pontos referentes aos ensaios 49, 52, 54, 55 e 58 aparecem como fora de controle pelo limite inferior, assim pode-se afirmar, que estes pontos sofriam efeitos da auto correlação entre eles na forma de alarmes falsos, como mencionado na literatura de Montgomery (2009).

No gráfico de controle individual de Shewhart, para os resíduos de 2ª ordem do modelo ARIMA, apenas o último ponto, o qual representa o ensaio com CUC = 74,6% para ventos de  $4,32 \text{ m s}^{-1}$  de velocidade, apresenta-se como fora de controle.

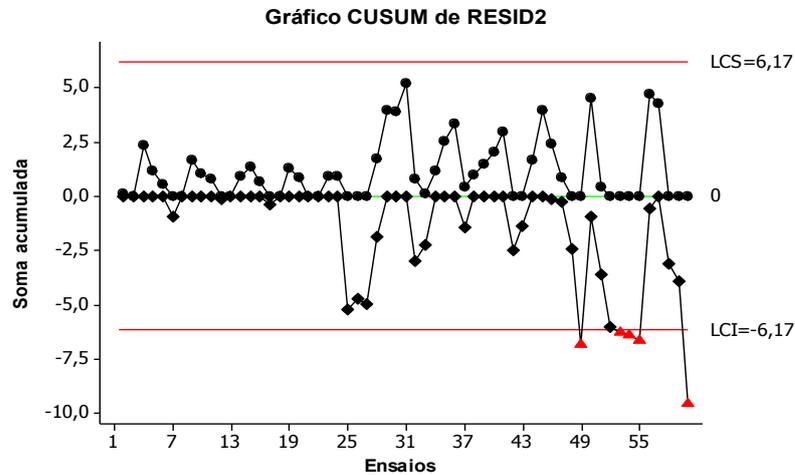
Os resíduos da variável CUC, expressos no gráfico MMEP (Figura 7), não apresentam nenhum ponto fora dos limites de controle, pode-se dizer que após a eliminação dos efeitos da auto correlação, o processo de irrigação se mantém sob controle estatístico.

**Figura 7.** Gráfico MMEP com ARIMA 2ª ordem para CUC

Ainda na Figura 7, ocorre a presença de uma sequência de 17 pontos acima da média, no intervalo da amostra 7 até a 24, e um declive acentuado na amostra 25, demonstrando que o gráfico MMEP, detectou um indicativo de possível descontrole e mudança na média do processo da irrigação por aspersão convencional.

Na Figura 8, pode-se visualizar a carta de soma acumulada (CUSUM) para os resíduos da variável CUC, gerados a partir do modelo ARIMA de 2ª ordem.

**Figura 8.** Gráfico CUSUM com ARIMA 2ª ordem para CUC



Observa-se que o gráfico CUSUM, apresentou grande sensibilidade ao detectar causas especiais na variabilidade do processo de irrigação, caracterizando o processo como fora de controle, mesmo após a eliminação dos efeitos da auto correlação dos dados pelo modelo ARIMA.

Segundo Montgomery (2009), o gráfico CUSUM tabular, indica o momento em que a mudança na variabilidade do processo ocorreu, ou seja, o indicativo momentâneo do descontrole no processo. Neste estudo, foi possível verificar tal indicativo ao observar a diferença na variabilidade ocorrida, tanto nas somas cumulativa negativa ( $C_i^-$ ) quanto positiva ( $C_i^+$ ), a qual embora não apresente pontos fora de controle neste trecho, começa ocorrer no ponto 25, justamente quando a velocidade do vento começa a alcançar faixas mais elevadas, diminuindo gradativamente a eficiência da irrigação.

Quando a velocidade média do vento ultrapassa os  $2,1 \text{ m s}^{-1}$ , Dechmi et al. (2003), alerta que esta variável torna-se fator decisivo no momento de irrigar. O ápice da variabilidade no processo da irrigação neste estudo ocorreu a partir do ponto 49, quando a velocidade média do vento ultrapassou  $2,63 \text{ m s}^{-1}$ , promovendo irrigações desuniformes, corroborando com Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010), os quais afirmam que ventos na faixa entre  $2,0 \text{ m s}^{-1}$  e  $3,0 \text{ m s}^{-1}$ , resultam em coeficientes de uniformidade abaixo de 80%.

De maneira geral, o gráfico de controle CUSUM tabular, para os resíduos gerados pelo modelo auto regressivo de 2ª ordem (ARIMA), foi mais sensível ao detectar a variabilidade do processo de irrigação, quando comparado aos mesmos dados nos gráficos de Shewhart e MMEP. O gráfico CUSUM, construído com dados não auto correlacionados, deixa claro que ventos próximos a  $3 \text{ m s}^{-1}$ , promovem irrigação não uniforme e processos fora de controle estatístico.

Costa, Eppreshc e Carpinetti (2008), não descrevem a impossibilidade de aplicação dos gráficos de controle, mesmo que os dados apresentem auto correlação, apenas alertam sobre a possibilidade de resultados não confiáveis. Montgomery (2009), também partilha deste alerta, afirmando sobre a possibilidade de alarmes falsos nos resultados dos gráficos de controle.

Esse estudo também confirma as constatações dos autores já mencionados, uma vez que, em alguns gráficos de controle, foi verificado ocorrências de resultados incoerentes. Entretanto,

o gráfico de controle de Shewhart provou ser robusto ao efeito da auto correlação, proporcionando resultados confiáveis e de fácil interpretação, quando aplicado a variável natural CUC, pois apresentou os mesmos resultados obtidos pelo gráfico CUSUM tabular, o qual foi gerado pelos resíduos do modelo ARIMA de 2ª ordem da variável CUC.

## 6 CONCLUSÕES

O gráfico de controle MMEP apresentou-se bastante suscetível quando utilizado em dados auto correlacionados, com ocorrências de alarmes falsos.

Para dados independentes (resíduos de CUC pelo modelo ARIMA), o gráfico CUSUM tabular, foi mais sensível ao detectar as variações ocorridas na irrigação devido à velocidade do vento, quando comparado aos gráficos MMEP e Shewhart para os mesmos dados.

O gráfico de controle de Shewhart para medidas individuais, demonstrou ser mais robusto, apresentando resultados coerentes para avaliação da irrigação por aspersão na presença de dados auto correlacionados ao contrário do MMEP e CUSUM.

Na irrigação por aspersão, relacionando CUC com velocidade do vento, o gráfico de Shewhart foi mais indicado pela simplicidade, robustez e facilidade de interpretação, mesmo na presença de dados que violam a suposição de independência. Assim torna-se perfeitamente possível a aplicação dessas técnicas industriais de produção para monitorar o processo de irrigação em tempo real, adaptando os sistemas existentes de irrigação automatizados para controlar a irrigação de acordo com a velocidade do vento no momento da irrigação.

Os gráficos de controle de Shewhart, MMEP e CUSUM provaram serem ótimas ferramentas estatísticas no estudo da irrigação por aspersão convencional, demonstrando muito bem a variabilidade no processo, porém, como na irrigação existem muitas variáveis que podem interferir no processo sugere-se estudos com gráficos de controle multivariados.

## 7 REFERÊNCIAS

ALBIERO, D.; MACIEL, A. J. da; MILAN, M.; MONTEIRO, L. A. de; MION, R. L. Avaliação da distribuição de sementes por uma semeadora de anel interno rotativo utilizando média móvel exponencial. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 1, p. 86-95, jan/mar, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7749**: equipamentos de irrigação agrícola: aspersores rotativos. Parte 2: Uniformidade de distribuição e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2000. 6 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2008. 625 p.

COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; CAVERO, J.; FACI, J. M.; MARTÍNEZ-COB, A. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). **Irrigation science**, Bacia do Ebro, Espanha, v. 22, p. 67-77, 2003.

FRIGO, J. P.; VILAS BOAS, A. M.; FRIGO, E. P.; HERMES, E.; TESSARO, E. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina - PR. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 2, p. 318-327, abr/jun, 2013.

JUSTI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C. Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 264-270, mar/abr, 2010.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. Logan: Utah State University, 2009. 314 p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2012. 355 p.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 513 p.

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

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.

REIS, C. F. dos; VILAS BOAS, M. A.; MERCANTE, E.; HERMES, E.; REISDORFER, M. Avaliação da qualidade da água para irrigação em Salto do Lontra - PR. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 1, p. 69-78, jan/mar, 2011.

SAMOHYL, R. W. **Controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

YACOUBI, S.; ZAIANI, K.; ZAPATA, N.; ZAIRI, A.; SLATNI, A.; SALVADOR, R.; PLAYÁN, E. Day and night time sprinkler irrigated tomato: Irrigation performance and crop yield. **Biosystems Engineering**, Tunes, Tunisia, v. 107, July, p. 25-35, 2010.

ZHOU, W.; BECK, B. F.; PETTIT, A. J.; WANG, J. Application of water quality control charts to spring monitoring in karst terranes. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 53, n. 6, p. 1311-1321, 2008.