

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

CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE NA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

JIAM PIRES FRIGO

CASCAVEL – Paraná – Brasil

JUNHO - 2014

JIAM PIRES FRIGO

CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE NA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração **Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antônio Vilas Boas

CASCADEL – Paraná – Brasil

JUNHO - 2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

F949c Frigo, Jiam Pires
Controle estatístico da qualidade na irrigação por aspersão./ Jiam Pires Frigo — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2014.
43 f. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antônio Vilas Boas
Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola,
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Irrigação diurna e noturna 2. Irrigação por aspersão – Controle de qualidade. 3. Coeficiente de Uniformidade de Christiansen. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21. ed. 631.7

ANA MARIA MARTINS ALVES VASCONCELOS ^{1 2 3}

¹ Revisor de português da monografia em 16-06-2014

² Revisor de inglês da monografia em 16-06-2014

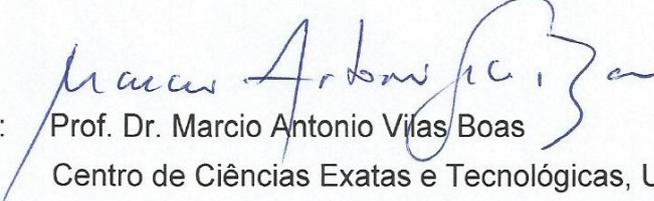
³ Revisor de normas da monografia em 16-06-2014

Jiam Pires Frigo

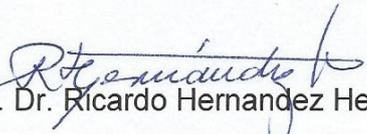
"Controle estatístico da qualidade na irrigação por aspersão"

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação "Stricto Sensu" em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

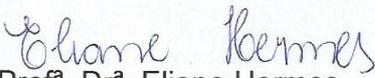
Orientador:


Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas

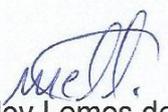
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE


Prof. Dr. Ricardo Hernandez Hernandez

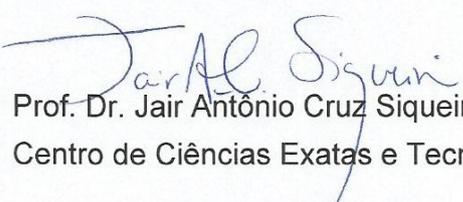
Departamento Acadêmico de Agrárias, UTFPR


Prof.ª. Dr.ª. Eliane Hermes

Departamento de Engenharias e Exatas, UFPR


Prof. Dr. Eloy Lemos de Mello

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE


Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Cascavel, 02 de junho 2014.

BIOGRAFIA

Brasileiro, nascido no ano de 1982, em Santiago-RS. Graduado (2009) em Engenharia Agrícola pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI), *Campus* de Santiago-RS. Mestre (2012) em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Doutorando em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Cascavel-PR.

*“Algo só é impossível até que alguém
duvide e acabe provando o contrário”.*

Albert Einstein

Ao meu saudoso pai, Carlos Assis Frigo,
pelos valores a mim ensinados e ao seu
sorriso que, mesmo doente, prevaleceu;
à minha mãe, Terezinha, pelo apoio
incondicional, compreensão e incentivo
para conclusão deste trabalho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio incondicional, aos meus irmãos, Elisandro, Juliana e Jianice Pires Frigo, à minha sogra, Marinês, pelas orações e a todos os familiares, pelo apoio e incentivo aos meus estudos;

À Nandra (minha noiva), pela paciência, dedicação, apoio, incentivo e, principalmente, pela compreensão nos momentos de inquietude e irritação, por sempre acreditar que era possível, quando eu mesmo duvidava;

Ao professor Dr. Márcio Antônio Vilas Boas, “O Pai” na pós-graduação, pelo apoio, orientação, confiança e pelas longas conversas e histórias contadas, ora como “lições de vida” ora para incentivar ou descontraír o ambiente;

Aos integrantes da banca de aprovação, Dr. Marcio Antônio Vilas Boas, Dr. Ricardo Hernández Hernández, Dr^a. Eliane Hermes, Dr. Eloy Lemos de Mello e Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira pelas excelentes contribuições;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), *campus* de Cascavel, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PEGEAGRI), pela possibilidade de realização deste curso;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelos conhecimentos transmitidos, especialmente aos professores Dr. Silvio César Sampaio, Dr. Benedito Martins Gomes, Dr^a. Simone Damasceno Gomes, Dr. Eloy Lemos de Mello e Dr. Marcio Antônio Vilas Boas, pelos conselhos, incentivo e amizade; em especial, ao professor Dr. Eloy Lemos de Mello, pelo tempo dedicado e excelentes contribuições na minha formação profissional e pessoal;

Aos professores e funcionários da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE - Cascavel, pela excelente receptividade e dedicação ao longo desses anos de convívio;

A todos os colegas e amigos, que deixo de citar nomes para não cometer injustiças, pois foram muitos e todos tiveram papéis importantes nessa etapa de minha vida;

Aos moradores (família) da república KchoopA, Murilo (Gaveta), Luciano (Soneca), Rodolfo e Michael (Beltrão), pela grande amizade construída;

Aos professores Dr. Alfredo Petruski e Dr. Ricardo Rocha de Oliveira, coordenadores dos cursos de Engenharia Agrícola e Engenharia Civil, pela amizade e confiança ao longo dos dois anos que atuei como professor colaborador desses cursos;

À Dra. Jackeline Tatiane Gotardo, pela amizade e incentivo para fazer o concurso público da UNILA, o qual fui aprovado, e não menos importante, pelas ‘gargalhadas’ quebrando qualquer clima de tensão e preocupação nas salas do RHESA;

Finalmente, a todos que possibilitaram a concretização deste trabalho, para conclusão do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em nível de doutorado.

CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE NA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

RESUMO: O sistema de irrigação por aspersão é muito utilizado, devido à possibilidade de elevada uniformidade de distribuição e por adaptar-se às diversas culturas e solos. Porém, a uniformidade de aplicação de água nas irrigações é afetada por fatores meteorológicos que diminuem a eficiência do sistema. A preocupação com a qualidade de produtos e serviços oferecidos sempre esteve presente na história da humanidade, pois para que os produtos fossem aceitos, deveriam possuir características desejáveis pelos consumidores. Atualmente, com o surgimento de novos modelos gerenciais, a melhoria e o monitoramento da qualidade durante o processo de produção tornaram-se uma necessidade para muitas organizações. Assim, aprimorou-se o controle da inspeção por meio de técnicas estatísticas, reduziram-se perdas e foi possível competir no mercado. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a irrigação em um sistema por aspersão convencional, utilizando o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), o índice de Capacidade do Processo (C_p) para correlacionar as técnicas com a eficiência do sistema, verificar a influência do vento na irrigação pelo gráfico de controle de Shewhart e confrontar os resultados da utilização dos gráficos de controle de Shewhart, com os gráficos de controle MMEP e CUSUM tabular, aplicados no controle de qualidade da irrigação por aspersão convencional. Neste estudo, foram realizados 60 ensaios em um sistema de irrigação por aspersão convencional. O sistema era constituído de quatro aspersores, modelo Xcel-wobbler, altura de 1,0 m em relação ao solo e espaçamento de 6,0 x 6,0 m. Os coletores foram espaçados em 1,0 m entre si com altura de 0,5 m do solo. A pressão de serviço foi monitorada e adequada às especificações dos aspersores, e o vento monitorado *in loco*, por um anemômetro digital com 2,0 m de altura. Para a avaliação do sistema, foram utilizados o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), o índice de Capacidade do Processo (C_p), gráficos de Shewhart (\bar{X} barra) e os gráficos de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) e de soma cumulativa (CUSUM). O sistema de irrigação por aspersão convencional teve melhor desempenho e esteve sob controle, quando a velocidade média do vento esteve menor que $1,0 \text{ m s}^{-1}$. O uso dos gráficos individuais de controle de Shewhart possibilitou afirmar visualmente que o vento tem influência direta sobre o CUC. A irrigação noturna apresentou menor variabilidade nos dados, quando comparados aos dados do período diurno e isso resultou em maior eficiência na irrigação. O índice C_{pi} teve grande similaridade com o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC); mostrou-se bastante sensível à variação da eficiência de aspersão (E_a) e capaz de indicar a qualidade da irrigação por aspersão. Em comparação aos gráficos de controle, o gráfico MMEP mostrou-se suscetível quando utilizado em dados autocorrelacionados, pelas ocorrências de alarmes falsos. Para dados de resíduos, sem autocorrelação (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. Na irrigação por aspersão, relacionando CUC com velocidade do vento, o gráfico de Shewhart foi mais indicado pela simplicidade, confiabilidade e facilidade de interpretação, mesmo na presença de dados autocorrelacionados entre si.

PALAVRAS-CHAVE: irrigação diurna e noturna, vento, eficiência, Capacidade do Processo, Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.

STATISTICAL CONTROL OF QUALITY IN THE SPRINKLER IRRIGATION

SUMMARY: The sprinkler irrigation system is widely used because of the possibility of high uniform distribution and to adapt itself to different crops and soils. On the other hand, the water uniform application in irrigation is affected by meteorological factors that decrease the system efficiency. There has always been some concern about the quality of products and services in human history, since all products should have desirable characteristics to be accepted by consumers. Currently, development, improvement and monitoring of new management models quality during the production process have become essential for many organizations. Thus, inspection control has enhanced by statistical techniques, losses have been decreased and it was possible to stimulate some trading competition. In this context, this study aimed at evaluating the irrigation system in a conventional sprinkler using the Christiansen Uniformity Coefficient (CUC) and the index Process Capability (C_p) to correlate techniques with the system efficiency as well as verify the wind influence on irrigation by Shewhart control chart and compare the results of Shewhart control charts use with the EWMA and tabular CUSUM control charts, applied in quality control of the conventional sprinkler irrigation. In this study, 60 essays were carried out on a four irrigation sprinklers system, Xcel-Wobbler model, 1.0 m height above soil and 6.0 x 6.0 m spaced. The collectors were 1.0 m spaced apart with 0.5 m height from soil. The service pressure was monitored and appropriate to the sprinklers specifications, while wind was monitored *in situ* by a 2.0 m high digital anemometer. In order to evaluate the system, Christiansen Uniformity Coefficient (CUC), the index Process Capability (C_p), Shewhart charts (\bar{X} barra) and the charts of exponentially weighted moving average (EWMA) and cumulative sum (CUSUM) were used. The irrigation sprinkler system showed the best performance and was under control when the average wind speed was less than 1.0 m s^{-1} . The use of individual Shewhart control charts visually allowed affirming that wind has a direct influence on CUC. Night irrigation showed less variability on the studied data, when compared to daytime ones and this has resulted in greater efficiency in irrigation. The C_{p_i} index showed great similarity with the Christiansen Uniformity Coefficient (CUC). It proved to be very sensitive to efficiency sprinkler (E_a) variation and able to indicate the quality of sprinkler irrigation. The EWMA chart, when compared to the control charts, was susceptible when used in autocorrelated data, according to the occurrence of false alarms. But, to the residue data without autocorrelation (the ARIMA model), the CUSUM tabular chart was more sensitive to detect variations in irrigation due to wind speed, when compared to EWMA and Shewhart charts for the same data. In sprinkler irrigation, when there is a relation between CUC and wind speed, the Shewhart chart was more indicated by simplicity, reliability and ease of interpretation, even in the presence of autocorrelated data.

KEYWORDS: daytime and nighttime irrigation, wind, efficiency, Capability Process, Christiansen Uniformity Coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Artigo 1

Figura 1 Área do ensaio e disposição dos aspersores.....	4
Figura 2a e 2b: Ensaio com maior e menor lâmina média aplicada nos 60 ensaios de aspersão, respectivamente.....	9
Figura 3 Gráfico de controle individual de Shewhart para CUC e vento nos períodos noturno e diurno.....	10
Figura 4 Regressão linear entre: (a) CUC x E_a ; (b) C_{p_i} x E_a ;.....	13

Artigo 2

Figura 1 Gráfico Shewhart para CUC organizados da menor para maior velocidade de vento.....	27
Figura 2 Gráfico MMEP para CUC.....	28
Figura 3 Gráfico CUSUM para CUC.....	29
Figura 4 Gráfico de auto correlação dos dados.....	29
Figura 5 Gráfico de auto correlação para resíduos de 2ª ordem.....	30
Figura 6 Gráfico de Shewhart com ARIMA 2ª ordem para CUC.....	31
Figura 7 Gráfico MMEP com ARIMA 2ª ordem para CUC.....	32
Figura 8 Gráfico CUSUM com ARIMA 2ª ordem para CUC.....	32

LISTA DE TABELAS

Artigo 1

Tabela 1 Classificação do Coeficiente de Uniformidade (CUC)	5
Tabela 2 Análise descritiva das variáveis CUC, Ea e vento.	8
Tabela 3 Índice de capacidade do processo (C_p) em relação à variabilidade do CUC, nas irrigações do período diurno e noturno.	10
Tabela 4 Índice de capacidade do processo pelo limite inferior (C_{pi}), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), e Eficiência de aspersão (Ea), para diferentes velocidades de vento.	12

Artigo 2

Tabela 1 Classificação do Coeficiente de Uniformidade (CUC).....	21
Tabela 2 Análise descritiva das variáveis CUC, Ea e vento.....	26
Tabela 3 Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e Eficiência de aspersão (Ea), para diferentes velocidades de vento.....	26
Tabela 4 Estimadores do modelo ARIMA.....	30
Tabela 5 Estatística descritiva dos resíduos do modelo ARIMA de 2ª ordem.....	31

LISTA DE EQUAÇÕES

Artigo 1

CUC eq.1.....	5
Ea eq. 2.....	5
PEv + Arraste eq. 3.....	5
Iamedida eq. 4.....	6
Iacoletada eq. 5.....	6
LCI eq. 6.....	6
LCS eq. 7.....	6
CP eq. 8.....	7
CPi eq. 9.....	7

Artigo 2

CUC eq. 1.....	22
LCI eq. 2.....	22
LCS eq. 3.....	22
Zi eq. 4.....	22
σ_{zi}^2 eq. 5.....	23
LCS eq. 6.....	23
LCI eq. 7.....	23
Ci eq. 8.....	23
Ci + eq. 9.....	24
Ci - eq. 10.....	24

CAPACIDADE DO PROCESSO EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

RESUMO: O objetivo deste estudo foi avaliar a irrigação em um sistema por aspersão convencional, utilizando o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), o índice de Capacidade do Processo (C_p), correlacionar as técnicas com a eficiência do sistema e verificar a influência do vento na irrigação pelo gráfico de controle de Shewhart. O estudo foi realizado em um sistema de irrigação por aspersão convencional, constituído de quatro aspersores, modelo Xcel-wobbler, altura de 1,0 m em relação ao solo e espaçamento de 6,0 x 6,0 m. Os coletores eram espaçados em 1,0 m entre si com altura de 0,5 m do solo. A pressão de serviço foi monitorada e adequada às especificações dos aspersores e o vento monitorado *in loco*, por um anemômetro digital com 2,0 m de altura. Para a avaliação do sistema, foram utilizados o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), o gráfico de Controle individual de Shewhart e o Índice de Capacidade do Processo (C_p), proposto por Montgomery (2009). O sistema de irrigação por aspersão convencional teve melhor desempenho e esteve sob controle quando a velocidade média do vento foi menor que $1,0 \text{ m s}^{-1}$. O uso dos gráficos individuais de controle de Shewhart possibilitou afirmar visualmente que o vento tem influência direta sobre o CUC. A irrigação noturna apresentou menor variabilidade nos dados, quando comparados ao período diurno e isso resultou em maior eficiência na irrigação. O índice C_{pi} apresentou comportamento parecido com o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC); mostrou-se sensível à variação da eficiência de aspersão (E_a) e capaz de indicar a qualidade da irrigação por aspersão.

PALAVRAS-CHAVE: irrigação diurna e noturna, vento, eficiência, Controle de qualidade.

1 INTRODUÇÃO

Agricultores que possuem acesso a projetos e técnicas de irrigação apresentam resultados positivos quanto à segurança alimentar em nível familiar, o qual pode perfeitamente ser estendido nacionalmente com o devido auxílio dos governos (ONI et al. 2011).

O sistema de irrigação por aspersão é bastante utilizado devido à possibilidade de elevada uniformidade de distribuição e por adaptar-se às diversas culturas e aos solos (MANTOVANI et al, 2012). Porém, a uniformidade de aplicação de água nas irrigações é afetada por fatores climáticos e operacionais (PRADO & COLOMBO, 2010).

Os fatores meteorológicos dificultam o processo de avaliação da uniformidade na irrigação (PLAYÁN et.al. 2006). Além disso, a competição pela água entre os usuários, as questões ambientais e os custos de energia são as principais razões para melhorar o desempenho de irrigação por aspersão (YACOUBI et al. 2010).

Atualmente, a busca pela qualidade em processos, produtos e serviços tem sido a estratégia cada vez mais adotada por empresas, pois possibilita a competitividade no mercado. Os consumidores consideram a qualidade como um aspecto prioritário na aquisição de produtos e serviços tornando, na maioria das vezes, o fator de escolha no momento da aquisição. Segundo Montgomery (2009), a qualidade, buscada por muitos, está relacionada a uma ou mais características que um produto ou serviço deve apresentar.

É possível considerar a irrigação como um processo ou sistema constituído de equipamentos e serviços em que todos buscam maior qualidade ao utilizarem a técnica. Sendo assim, a melhoria na qualidade e a manutenção da irrigação tornam-se indispensáveis, tanto para empresas fornecedoras dos equipamentos como para os produtores que utilizam o sistema, pois a falta de qualidade na irrigação pode trazer consequências como insatisfação, desperdícios de água, dinheiro e até danos ao meio ambiente.

Para uma análise ampla visando melhorar a qualidade da irrigação, faz-se necessário avaliá-la, em que o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) é a maneira mais utilizada para avaliar o sistema de irrigação. O Controle Estatístico de Qualidade e o Índice de Capacidade do Processo são ferramentas estatísticas que inicialmente eram voltadas para processos industriais, as quais visavam melhorar a qualidade ao detectarem a variabilidade dos processos. Tais técnicas podem ser estudadas para auxiliarem os procedimentos da irrigação, como sugerem Justi et al. (2010) e Hermes et al. (2014).

O gráfico de controle de Shewhart é uma das ferramentas mais utilizadas para o

Controle Estatístico de Qualidade, o qual monitora um processo e verifica se o mesmo está sob controle ou não. A simplicidade da regra na tomada de decisão, a qual está condicionada à análise do último ponto plotado no gráfico, facilita a identificação de um ponto que está ou não influenciando no processo. Isto faz com que esta ferramenta torne-se bastante viável.

Neste contexto, os objetivos deste estudo foram avaliar a irrigação em um sistema por aspersão convencional, determinar o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o índice de Capacidade do Processo (CP) bem como correlacionar tais técnicas com a eficiência do sistema e verificar a influência do vento na irrigação pelo gráfico de controle de Shewhart.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado durante o período diurno (6h até 20h) e noturno (a partir das 20h), em um sistema de irrigação por aspersão convencional, constituído de linhas laterais de 1", tubos de subida de ¾", quatro aspersores modelo Xcel-wobbler com sistema anti-deriva, escolhido por ser uma novidade no mercado, com altura de 1,0 m em relação ao solo e espaçamento de 6,0 x 6,0 m. Os coletores foram espaçados em 1,0 m entre si e altura de 0,5 m do solo.

Nos ensaios, foi utilizada a disposição dos sistemas de irrigação por aspersão, comumente encontrados nas pequenas propriedades rurais. Esses fazem uso de emissores linearmente instalados em linhas laterais, dispostos em forma quadrada (Figura 1).

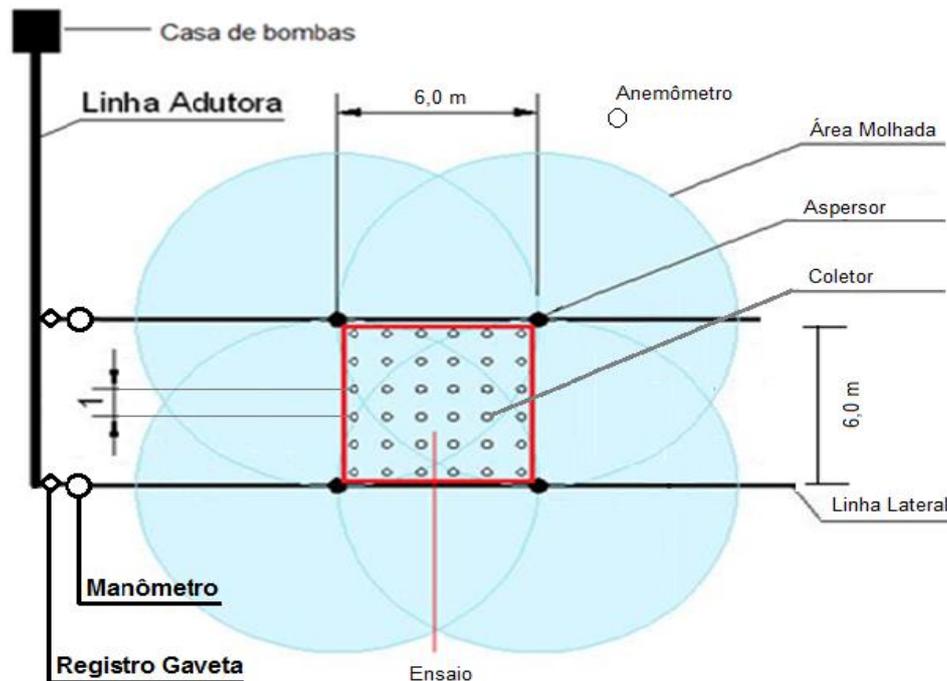


Figura 1 Área do ensaio e disposição dos aspersores

A pressão de serviço no experimento foi monitorada por anemômetros tipo bourdon, modelo vertical com glicerina, marca comercial HIDROBOMBAS e adequada às especificações dos aspersores, mantida constante em 1,72 bar ou 25 psi. O vento foi monitorado *in loco*, com o auxílio de um anemômetro digital, modelo AD-250, marca INSTRUTHERM, escala em ms^{-1} , na altura de 2,0 m. Todos os ensaios de irrigação seguiram a norma para aspersão NBR ISO 7749-2 (ABNT, 2000). Para a avaliação do sistema, foi utilizado o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC).

Keller e Bliesner (2009) propuseram a seguinte classificação para CUC, ao estipularem 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, J. and BLIESNER, R.D. (2009, p. 43).

O método de Christiansen (CUC) é uma das maneiras mais utilizadas para se medir o coeficiente de uniformidade, o qual expressa a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo em relação à lâmina média aplicada em cada aspersor (Bernardo et al., 2008), 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.

A eficiência de irrigação leva em consideração as perdas por evaporação e arraste pelo vento, cujo cálculo é determinado pelas Equações 2, 3, 4 e 5, a seguir:

$$E_a = E_1 E_2 \quad \text{eq. 2}$$

Em que:

E_a : Eficiência de aplicação (%);

E_1 : Eficiência de aplicação \cong CUC (%);

E_2 : Eficiência durante aplicação = $1 - P_{Ev+Arraste}$ (%).

$$P_{Ev+Arraste} = 100 \left(\frac{I_{a_{medida}} - I_{a_{coletada}}}{I_{a_{medida}}} \right) \quad \text{eq. 3}$$

Em que:

$(P_{Ev+Arraste})$: Perdas por evaporação e arraste pelo vento (%);

$I_{a_{medida}}$: Intensidade de aplicação do aspersor (mm h^{-1});

$I_{a_{coletada}}$: Intensidade recebida pelos copos coletores (mm h^{-1}).

$$Ia_{medida} = t \left(\frac{Qa}{A} \right) \quad \text{eq. 4}$$

Em que:

Ia_{medida} : Intensidade de aplicação medida (mm s^{-1});

t: Tempo de duração do ensaio (s);

Qa: Vazão do aspersor (L s^{-1});

A: Área delimitada do ensaio (m^2).

$$Ia_{coletada} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i|}{n} \quad \text{eq. 5}$$

Em que:

$Ia_{coletada}$: Intensidade média coletada (mm);

$\sum_{i=1}^n |X_i|$: Somatório da medida em cada coletor (mm);

n: Número de coletores na área de ensaio.

O gráfico de Controle de Shewhart individual foi utilizado para avaliar se as irrigações testadas estavam em conformidade com as especificações do projeto bem como seu comportamento ao longo do tempo. Este gráfico consiste em uma linha central que representa a média da característica de qualidade desejada, uma linha superior do limite de superior de controle (LSC) e outra linha inferior do limite inferior de controle (LIC). Pontos que representam o andamento do processo são plotados 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 6 e 7, respectivamente.

$$LIC = \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad \text{eq. 6}$$

$$LSC = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad \text{eq. 7}$$

Em que:

LIC : Limite de controle inferior;

LSC : 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).

Para a avaliação da Capacidade do Processo, utilizou-se a metodologia proposta por Montgomery (2009), em que se calcula o Índice de Capacidade (C_p), considerando o processo estável e que a variável de interesse apresente distribuição próxima da normal.

O índice de capacidade do processo é expresso pela equação 8:

$$C_p = \frac{LSC-LIC}{6\sigma} \quad \text{eq. 8}$$

Em que:

C_p : Índice de capacidade do processo;

LIC : Limite de controle inferior;

LSC : Limite de controle superior;

σ : Desvio padrão populacional da variável em estudo, como é geralmente desconhecido, é comumente substituído por uma estimativa, tipicamente utilizado o desvio padrão amostral s .

C_{pi} : (Capacidade do Processo pelo Limite inferior) é dada pela equação 9.

$$C_{pi} = \frac{\bar{x}-LIC}{3\sigma} \quad \text{eq. 9}$$

Em que:

C_{pi} : Índice de capacidade do processo pelo limite inferior;

\bar{x} : Média dos dados;

LIC : Limite inferior de controle;

σ : Desvio padrão populacional da variável em estudo, como é geralmente desconhecido; é comumente substituído por uma estimativa, tipicamente utilizado o desvio padrão amostral s .

Segundo Montgomery (2009), para processos já existentes e Especificações Unilaterais, a classificação do processo se faz da seguinte forma: $C_{pi} \geq 1,25$, o processo é capaz ou adequado segundo as especificações; $1 \leq C_{pi} < 1,25$, o processo é aceitável; $C_{pi} < 1$, o processo é incapaz ou inadequado.

Para as análises das irrigações, a informação do fabricante foi fixada como valor médio para o cálculo de C_p e pressão utilizada de 172 KPa (Lâmina média = 7,7 mm h⁻¹). Para o limite inferior, foi adotado o valor da lâmina de 3,6 mm h⁻¹, coletada no ensaio cujo CUC foi de 78,7%, por ser o resultado mais aproximado do mínimo aceitável em irrigação por aspersão (78%) (KELLER & BLIESNER, 2009).

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Uma análise descritiva foi realizada para todos os 60 ensaios do sistema de irrigação por aspersão convencional com o intuito de caracterização geral do processo de irrigação.

Na Tabela 2 apresentam-se os cálculos de média, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, valores de máximo e mínimo para Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Lâmina aplicada (Lâmina), Eficiência dos Aspersores (Ea) e velocidade do vento (Vento).

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

Análise da irrigação por aspersão	CUC (%)	Lâmina (mm)	Ea (%)	Vento (m s⁻¹)
Mínimo aceitável 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

Ea - Eficiência dos Aspersores

Vento – Velocidade média do vento

Lâmina – Lâmina aplicada na área irrigada

Pelos valores de desvio padrão e variância (Tabela 2), pode-se observar que houve certa dispersão dos dados em algumas variáveis. O coeficiente de variação (CV), que varia de um mínimo de 4,4% a um máximo de 75,9%, indica que os dados apresentam variação de baixa a muito alta. De acordo com Pimentel Gomes (2000), os coeficientes de variação, comumente obtidos nos experimentos de campo, podem ser considerados baixos, se inferiores a 10%; médios, quando de 10 a 20%; considerados elevados, quando variam de 20 a 30% e muito altos, se superiores a 30%.

Justi et al. (2010), em estudo de controle de qualidade em irrigação por aspersão em Cascavel, PR, observaram que houve tendência do CUC diminuir com o aumento da velocidade do vento.

Neste estudo, ao serem analisadas todas as irrigações, verificou-se que o máximo valor de CUC (93,7%) ocorreu quando a velocidade do vento esteve abaixo de 1,0 m s⁻¹, enquanto o valor mínimo (74,6%) foi observado com ventos próximos de 4,3 m s⁻¹.

As constatações evidenciam que o vento é uma variável climática de grande influência na irrigação por aspersão, conforme verificado por Playán et al. (2005) e Oliveira, et al. (2009).

Resultados semelhantes aos reportados no atual estudo foram descritos por

Yacoubi et al. (2010), os quais obtiveram os maiores valores de CUC (81%) quando a velocidade esteve próxima a $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e, os menores, (65%) com velocidade acima de $4,0 \text{ m s}^{-1}$.

O efeito da velocidade do vento nas irrigações para este experimento pode ser visualizado nas Figuras 2a e 2b, as quais apresentam o comportamento da lâmina de água aplicada em função da velocidade e da direção do vento.

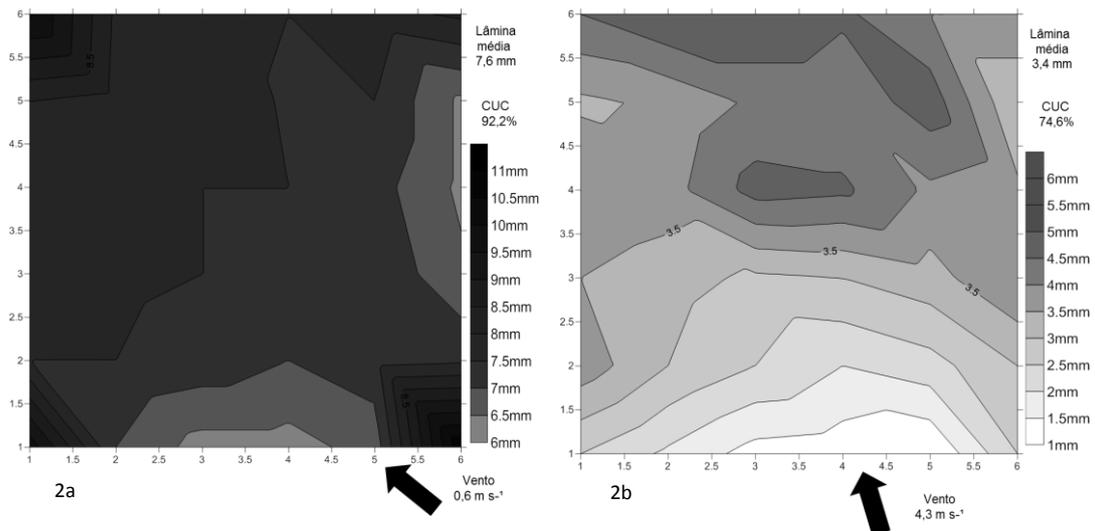


Figura 2a e 2b - Ensaio com maior e menor lâmina média aplicada nos 60 ensaios de aspersão respectivamente

Dentre os eventos de irrigação, quando a velocidade do vento atingiu valores menores que $1,0 \text{ m s}^{-1}$ a lâmina média de irrigação foi de 8,6 mm (Figura 2a). Com ventos acima de 4 m s^{-1} , a lâmina de irrigação diminuiu aproximadamente em 45%, com média de 3,4 mm (Figura 2b).

Quando a velocidade do vento se elevou de $0,6 \text{ m s}^{-1}$ para $4,3 \text{ m s}^{-1}$, verificou-se redução dos valores do CUC de 93,7% para 74,6%, ou seja, decréscimo de 19,1%, resultando em um valor abaixo do limite mínimo indicado por Keller e Bliesner (2009) para irrigação por aspersão (CUC > 78,0%).

As constatações proporcionam a possibilidade de caracterizar o comportamento do vento durante o trabalho realizado, o qual apresentou grande variabilidade, como se pode observar no Coeficiente de variação (75,9%), mas mantendo como velocidade média $1,5 \text{ m s}^{-1}$.

A velocidade do vento influenciou em todos os eventos de irrigação e exerceu influência diferenciada durante o período estudado, de forma notável nos períodos considerados noturnos e diurnos, como pode ser visualizado na Figura 3.

Nas primeiras 30 irrigações plotadas na Figura 3, as quais ocorreram em um período após as 20 horas, considerado noturno, em geral, houve ventos de menor intensidade e menor variação na velocidade, os quais proporcionaram melhores resultados para o CUC. Todavia, no período diurno, período entre 6h e 20h, a velocidade do vento aumentou bem como sua variabilidade ao longo do tempo. Assim, ocorreram valores de CUC (74,6%) abaixo do limite inferior de controle para CUC (78,0%) indicado por Keller e Bliesner (2009).

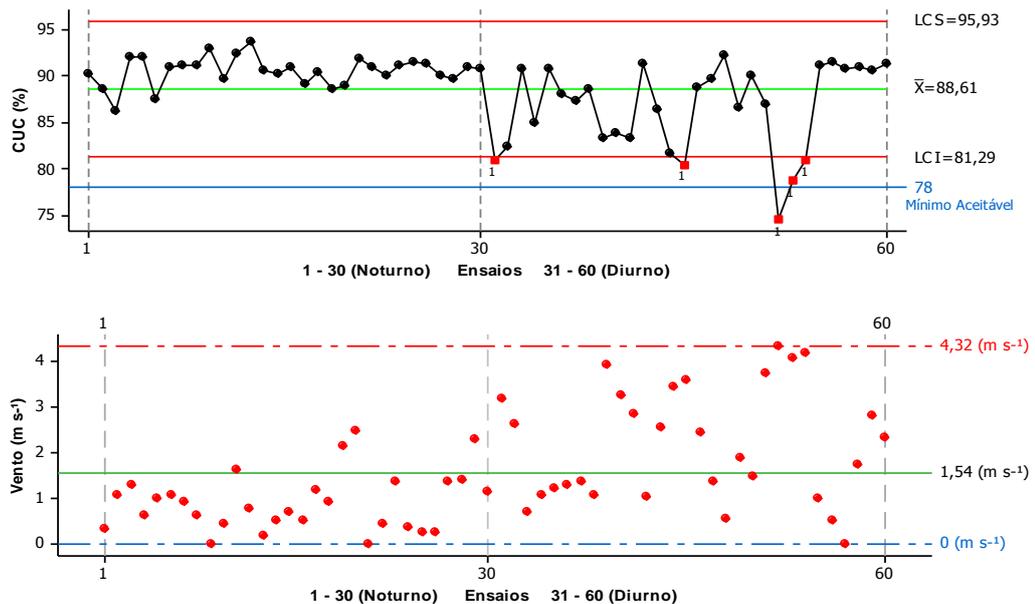


Figura 3 Gráfico de controle individual de Shewhart para CUC e gráfico de dispersão para vento nos períodos noturno e diurno

A diferenciação das velocidades de ventos durante os períodos diurno e noturno provavelmente se deve ao aquecimento do ar ao longo do dia pela incidência da radiação solar, fazendo com que as massas de ar (vento) movimentem-se com maior facilidade pelas diferenças de temperaturas entre o solo e a atmosfera. Todavia, no período noturno, o solo começa um processo de resfriamento e a intensidade dos ventos começa a diminuir (TUNDISI, 2011).

Na Tabela 3, estão apresentados os valores do índice de capacidade do processo (C_p), ao longo de 30 irrigações diurnas e 30 irrigações noturnas.

Tabela 3 - Índice de capacidade do processo (C_p) em relação à variabilidade do CUC, nas irrigações dos períodos diurno e noturno.

	CUC (%)	C_p
DIURNO	74,60 - 92,20	0,62
NOTURNO	86,30 - 93,70	2,68

Os índices de capacidade do processo indicam a relação entre a variabilidade do coeficiente de uniformidade e C_p . Para valores elevados de CUC, observou-se que diminui o desvio padrão da lâmina de irrigação.

Pela classificação de Montgomery (2009), a capacidade do processo (C_p) mostrou-se incapaz ou inaceitável perante as irrigações diurnas ($C_p = 0,62$). Nas irrigações noturnas, o processo apresentou-se valor bem superior em relação ao indicado como crítico na literatura, logo foi classificado como capaz ou adequado ($C_p = 2,68$).

Na Tabela 3, observa-se que quanto menor foi a variabilidade da uniformidade da irrigação (CUC), maior foi o índice da capacidade do processo (C_p). Resultados semelhantes foram descritos por Justi et al. (2010) quando avaliaram o controle de qualidade em irrigação por aspersão em Cascavel, PR. Para melhor visualização dos resultados, os ensaios foram organizados em faixas de horários como se observa na Tabela 4.

Tabela 4 Índice de capacidade do processo pelo limite inferior (C_{pi}), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), vento e Eficiência de aspersão (E_a), para diferentes períodos do dia.

Períodos	CUC (%)	Vento ($m\ s^{-1}$)	E_a (%)	C_{pi}
06h às 12h	88,4	1,7	67,3	1,23
12h às 16h	82,9	3,1	49,6	1,11
16h às 20h	90,2	1,3	77,3	2,24
20h às 06h	90,6	0,9	81,2	3,60

Na Tabela 4, observa-se que o maior índice de capacidade do processo ($C_{pi}=3,60$) foi obtido nas irrigações do período noturno, o qual foi mais do que suficiente para caracterizar a irrigação noturna como processo capaz e adequado como classifica Montgomery (2009). Nas irrigações diurnas, o processo demonstrou-se capaz e adequado ($C_{pi} = 2,24$) apenas no horário após as 16 horas, o qual apresentou valor maior que o mínimo ($C_{pi} > 1,25$) proposto na literatura para processos usados (MONTGOMERY, 2009).

O vento pode apresentar comportamento diferenciado em horários e localidades diversos. Assim, foi calculado o índice de capacidade do processo pelo limite inferior (C_{pi}), considerando o vento em diferentes faixas de velocidade, apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Índice de capacidade do processo pelo limite inferior (C_{Pi}), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e Eficiência de aspersão (Ea) para diferentes velocidades de vento.

Vento ($m s^{-1}$)	CUC (%)	Ea (%)	Cpi
0,0 a 1,0	91,40	78,90	1,40
1,1 a 2,0	89,00	74,80	1,24
2,1 a 3,0	88,00	68,20	1,09
> 3,0	81,30	43,00	0,34
Desvio Padrão	4,33	16,10	0,47
Médias	87,43	66,23	1,02
CV(%)	4,95	24,31	46,21

Na Tabela 5, pode ser observado que o maior índice de capacidade do processo ($C_{Pi}=1,34$) foi obtido nas irrigações em que a velocidade do vento esteve abaixo de $1,0 m s^{-1}$, caracterizando satisfatoriamente a irrigação como um processo capaz e adequado ($C_{Pi} > 1,25$).

Quando a velocidade média do vento manteve-se nas faixas entre 1,1 e 2,0 $m s^{-1}$ bem como entre 2,1 e 3,0 $m.s^{-1}$, o processo apresentou $C_{Pi} = 1,24$ e $C_{Pi} = 1,09$ respectivamente, classificado como aceitável ($1 \leq C_{Pi} < 1,25$), segundo Montgomery (2009). Ainda é possível visualizar na Tabela 5 que o processo se mostrou incapaz ou inadequado ($C_{Pi} < 1$) apenas quando a velocidade média do vento esteve acima de $3,0 m s^{-1}$.

Os valores de CUC (Tabela 5) apresentaram menor variação (CV = 4,95%) quando comparados com resultados de Ea (CV = 24,31%), confirmando que o vento é uma variável climática de grande influência nos parâmetros da qualidade da irrigação por aspersão (Oliveira, Colombo, Faria, 2009), uma vez que neste estudo a pressão de serviço foi mantida constante.

Neste experimento, quando se faz uma ampla análise do CUC, é possível afirmar que a irrigação manteve bons níveis, mesmo com ventos próximos a $3,0 m s^{-1}$ apresentando Coeficientes de Uniformidade em média próximos a 80%. Quando analisamos a eficiência do sistema (Ea), é possível afirmar que o sistema mantém níveis próximos a 75% de eficiência e com tendências de aumentar quando a velocidade do vento estiver menor que $2,0 m s^{-1}$. Esta mesma coerência é mantida quando observamos os valores de C_{Pi} , pois ventos abaixo de $2,0 m s^{-1}$ proporcionam valores aceitáveis para C_{Pi} ($1 \leq C_{Pi} < 1,25$).

Assim, os valores de C_{Pi} parecem possuir relação com a eficiência de aspersão (Ea), o que demanda uma investigação mais aprofundada dos resultados, por meio da verificação da relação entre as variáveis, por regressão.

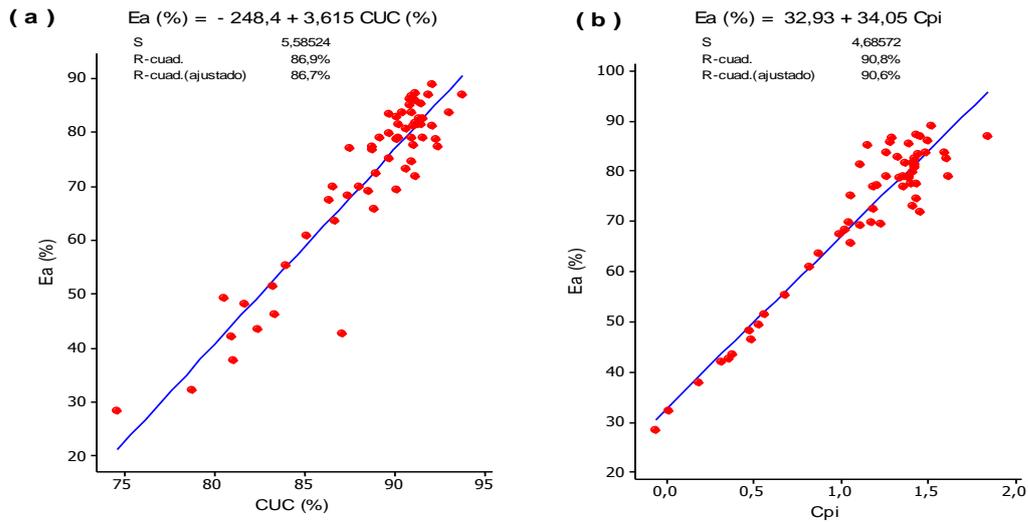


Figura 4 Regressão linear entre: (a) CUC x Ea; (b) C_{pi} x Ea;

Na Figura 4, pode-se observar a correlação positiva entre a eficiência de aspersão (Ea) e os valores de CUC e C_{pi} . Assim, o índice de correlação entre o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e a eficiência Ea foi de $R^2 = 86,9\%$ (Figura 4a). Para a Capacidade do processo (C_{pi}) e Eficiência de aspersão (Ea), (Figura 4b), obteve-se ótima correlação com índice $R^2 = 90,8\%$ que, pela classificação de Pearson, caracteriza uma forte correlação.

Com base no exposto ao estudo, assim como Justi et al. (2010), na avaliação de irrigação por aspersão, o controle estatístico de qualidade pelo uso das ferramentas como gráficos de controle individual de Shewhart e a Capacidade do Processo pelo limite inferior (C_{pi}) mostraram-se viáveis e adequados, pois identificaram 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.

4 CONCLUSÃO

O aumento do índice de capacidade do processo foi diretamente proporcional ao aumento do coeficiente de uniformidade de Christiansen. O índice C_{Pi} mostrou-se sensível a variação da eficiência de aspersão (E_a) e capaz de indicar a qualidade da irrigação por aspersão.

O sistema de aspersão convencional apresentou boa uniformidade nas irrigações diurnas, entretanto, no período noturno, tal sistema pode ser considerado como excelente na classificação de Keller (2009). O vento influenciou na diferença de uniformidade, tendo em vista que sua velocidade diminuiu no período noturno.

O sistema de irrigação por aspersão convencional teve melhor desempenho e esteve sob controle, quando a velocidade média do vento esteve menor que 1 m s^{-1} . O uso dos gráficos individuais de controle de Shewhart possibilitou afirmar visualmente que o vento tem influência direta sobre o CUC. A irrigação noturna apresentou menor variabilidade nos dados, quando comparados ao período diurno e isso resultou em maior eficiência na irrigação.

O comportamento demonstrado pelo vento neste estudo permite definir a partir das 16 horas como o horário mais indicado para utilização do sistema de irrigação por aspersão convencional. Assim, sugere-se mais estudo sobre o assunto, como novos ensaios a fim de aumentar o banco de dados para novas análises e utilização de outras ferramentas de controle de qualidade na irrigação.

5 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, CE, v.43, n.1, p.86-95, Jan/Mar., 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Equipamentos de irrigação agrícola - Aspersores rotativos. Parte 2: Uniformidade de distribuição e métodos de ensaio**. NBR ISSO 7749-2, Rio de Janeiro, JAN. 2000, 6p.

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

HERMES, E.; VILAS BOAS, M. A.; GRIS, D.J. ,FRIGO, E.P.; BERGER, J.S.; LINS, M.A.; FRIGO, J.P. Irrigation with wastewater from cassava processing with different concentrations of suspended solids. **Journal of Food, Agriculture & Environment** Vol.12 (1), p.487-490, January, 2014.

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**. Chapman-Hall, Publishers, 1990, Utah State University, Copyright to 2009. 314p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação, princípios e métodos**. 3 ed. 2 reimp. Viçosa: Editora UFV, 2012. 355p.

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.

ONI, S. A.; MALIWICHI, L. L.; OBADIRE, O. S. Assessing the contribution of smallholder irrigation to household food security, in comparison to dry land farming in Vhembe district of Limpopo province, South Africa. **African Journal of Agricultural Research** Vol. 6(10), pp. 2188-2197, 18 May, 2011.

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, PB, v.13, p. 818 - 824, 2009.

PIMENTEL GOMES; **Curso de estatística experimental**. 14 ed. Piracicaba: Editora Degaspari, 2000. 477p.

PLAYÁN, E.; ZAPATA, N.; FACI, J. M.; TOLOSA, D.; LACUEVA, J. L.; PELEGRÍN, J.; SALVADOR, R.; SÁNCHEZ, I.; LAFITA, A. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. **Agricultural Water Management**. v.84, p. 89 – 100, 2006.

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**. v. 76, p. 139 – 159, 2005.

PRADO, G. do; COLOMBO, A. Distribuição da água aplicada por equipamentos autopropelido de irrigação- Parte I: Modelagem com Simulasoft. **Irriga**, Botucatu, PB, v.15, p. 51 - 62, 2010.

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. 069 – 078, jan./mar. 2011.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 328p.

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**, v. 107, July 2010, p. 25-35.

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.

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

RESUMO: O objetivo deste estudo foi confrontar os resultados da utilização dos gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais, com os gráficos de controle MMEP (média móvel exponencialmente ponderada) e CUSUM tabular (soma cumulativa), aplicados no controle de qualidade da irrigação por aspersão convencional. Foram realizados 60 ensaios de irrigação em um sistema por aspersão convencional e todos os procedimentos para os ensaios de uniformidade da irrigação foram realizados conforme recomendação NBR ISO 7749-2. O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) foi utilizado para a avaliação do sistema. Os dados foram tabulados em planilha eletrônica, realizada estatística descritiva para a medida de tendência central e medidas de dispersão. As análises do processo de controle de qualidade do sistema de irrigação foram realizadas a partir de gráficos de Shewhart (\bar{X} barra), gráficos de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) e de soma cumulativa (CUSUM). O gráfico de controle MMEP apresentou-se bastante suscetível quando utilizado em dados autocorrelacionados, com ocorrências de alarmes falsos. Para dados independentes (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. Na irrigação por aspersão, ao se relacionar CUC com a 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 e demonstraram muito bem a variabilidade no processo.

PALAVRAS-CHAVE: Controle de qualidade, vento, Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.

1 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. Passados alguns anos, com o surgimento da produção em grande escala, a busca pela qualidade ganhou maior importância e surgiram inspeções no final do processo produtivo.

Atualmente, com o surgimento de novos modelos gerenciais, a melhoria e o monitoramento da qualidade durante o processo de produção tornaram-se uma necessidade para muitas organizações (Montgomery, 2009), a fim de aprimorar o controle da inspeção por meio de técnicas estatísticas.

No contexto de monitorar a qualidade, o controle estatístico refere-se a um conjunto de ferramentas utilizadas com o objetivo de possibilitar o acompanhamento e a intervenção no sistema em produção ou em funcionamento. Esta técnica ajuda a desenvolver gráficos para avaliar o desempenho da irrigação e análise dos dados. 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.

Os gráficos de controle mais conhecidos e utilizados são: Xbarra (gráfico individual de controle de Shewhart), 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. 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 superior de controle (LSC) e outra linha inferior do limite inferior de controle (LIC). Os pontos que representam o andamento do processo são apresentados entre essas linhas quando o mesmo está sob controle.

Na irrigação por aspersão, o vento é uma das variáveis meteorológicas de grande influência na eficiência de aplicação (PLAYÁN, et al.,2005; OLIVEIRA, et al.,2009). Segundo Justi et al. (2010), este gráfico mostrou-se viável e adequado, a fim de identificar as variações no processo bem como a influência da velocidade do vento na eficiência da irrigação. Essa 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.

O gráfico de controle de Shewhart, para medidas individuais, monitora a variação da média e a amplitude móvel de amostras, com base no último ponto amostrado. Esse gráfico é bastante eficaz, porém perde tal característica à medida que os processos apresentam menor variabilidade em torno da média, como é o caso da velocidade do vento que pode ocorrer com menor intensidade em períodos noturnos. Também são apresentadas menores perturbações nos indicativos de qualidade da irrigação (FRIGO, et al., 2013).

Pequenas variações no 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), os quais foram desenvolvidos para detectar menores variações, pois armazenam informação acumulada de toda a sequência de pontos, portanto, são mais sensíveis para detectar pequenos desvios em relação à média de um processo. Logo, tais métodos apresentam maior rapidez e credibilidade na identificação de pequenos desajustes no processo (MONTGOMERY, 2009).

O gráfico de controle MMEP é muito utilizado para detectar pequenas variações no comportamento dos dados. Fornece uma estimativa da nova média do processo, a qual poderá mudar a característica da qualidade desejada, no caso da irrigação, a uniformidade de aplicação de água pelo sistema. Este gráfico acumula informações sucessivas, pondera as amostras e atribui maior peso para as informações mais recentes.

Os gráficos de controle CUSUM guardam informações acumuladas de toda a sequência de pontos, 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: considera-se um gráfico de soma acumulada para a média de um processo, quando esse 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.

A suposição que geralmente é citada para o uso dos gráficos de controle é a de que os dados devem ser independentes. A investigação da autocorrelação dos dados torna-se bastante importante, pois, caso os dados sejam autocorrelacionados, os gráficos de controle podem apresentar resultados enganosos sob forma de alarmes falsos

(MONTGOMERY, 2009). Contudo, não há autor que afirme que não se podem utilizar os gráficos de controle em dados que não atendam tal suposição, apenas alertam para a possibilidade de alarmes falsos. Entretanto, existem técnicas que minimizam os efeitos da autocorrelação nos dados. Uma delas é o modelo autorregressivo integrado de média móvel (ARIMA). Esta metodologia consiste em ajustar modelos autorregressivos integrados de médias móveis, ARIMA (p, d, q), a um conjunto de dados.

Para a construção do modelo, seguimos um algoritmo no qual a escolha da estrutura do modelo é baseada nos próprios dados. Assim, identifica-se um modelo com base na análise de autocorrelação e estimam-se os parâmetros do modelo identificado. Logo, verifica-se o modelo ajustado como adequado aos dados através de uma análise de resíduos. Após a geração dos resíduos pelo modelo ajustado, esses se comportarão como variáveis aleatórias e independentes que possibilitam a utilização nos gráficos de controle.

Em todo e qualquer processo que se deseja qualidade, é essencial a existência de mecanismos simples, para indicar rapidamente a ocorrência de eventos que resultam em um descontrole no processo e os gráficos de controle apresentam esse perfil. Assim, o objetivo deste estudo foi confrontar os resultados da utilização dos gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais, com os gráficos de controle MMEP (média móvel exponencialmente ponderada) e CUSUM tabular (soma cumulativa), aplicados no controle de qualidade da irrigação por aspersão convencional.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados 60 ensaios em um sistema de irrigação por aspersão convencional, constituído de linhas laterais de 1", tubos de subida de ¾", quatro aspersores modelo Xcel-wobbler com sistema anti-deriva, escolhido por ser uma novidade no mercado, altura de 1,0 m em relação ao solo e espaçamento de 6,0 x 6,0 m. Os coletores foram espaçados em 1,0 m entre si com altura de 0,5 m do solo.

A pressão de serviço no experimento foi monitorada por anemômetros tipo bourdon, modelo vertical com glicerina, marca comercial HIDROBOMBAS e adequada às especificações dos aspersores, mantida constante em 1,72 bar ou 25 psi. O vento foi monitorado *in loco*, com o auxílio de um anemômetro digital, modelo AD-250, marca INSTRUTHERM, escala em $m\ s^{-1}$, na altura de 2,0 m. Todos os ensaios de irrigação seguiram a norma para aspersão NBR ISO 7749-2 (ABNT, 2000).

Para visualização do comportamento dos dados amostrais obtidos em 60 ensaios de irrigação em um sistema por aspersão convencional, os mesmos foram tabulados em planilha eletrônica. 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 gráficos de controle para medidas individuais, conhecidos como gráficos de Shewhart (\bar{X} barra), gráficos de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP), também conhecidos como EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) e os gráficos de soma cumulativa (CUSUM). Considera-se que o número de amostras é grande, $n > 25$, e pelo Teorema do Limite Central, a média das médias tende a normalidade dos dados, requisito necessário para aplicação das técnicas de gráficos de controle.

O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) foi utilizado para a avaliação do sistema. Keller e Bliesner (2009) propuseram a seguinte classificação para CUC, ao estipularem 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, J. and BLIESNER, R.D. (p. 43, 2009).

O método de Christiansen (CUC) é uma das maneiras mais utilizadas para se medir o coeficiente de uniformidade, o qual expressa a variabilidade da lâmina de irrigação, aplicada na superfície do solo em relação à lâmina média aplicada em cada aspersor (Bernardo, et al., 2008; Mantovani, et al., 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.

Os gráficos a seguir foram utilizados para avaliar se as irrigações testadas ficaram em conformidade com as especificações bem como seu comportamento ao longo do tempo. Os limites inferior e superior dos gráficos de Controle de Shewhart para medidas individuais foram calculados a partir das Equações 2 e 3, respectivamente.

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

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

Em que:

LIC : Limite inferior de controle;

LSC : Limite superior de controle;

\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 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:

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

$Z_i = \mu_0 = \bar{x}$ (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:

σ - é o desvio padrão dos dados em relação à média;

λ - peso dado a cada amostra;

i - ordem da amostra utilizada.

Os limites de controle 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;

λ - 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, foram utilizados como constante de peso da amostra $\lambda = 0,25$ e o fator $L = 2$ para largura dos limites, valores que segundo Montgomery (2009) funcionam muito bem na prática.

No gráfico de controle CUSUM, os desvios em relação à média são acumulados ao longo do tempo e geram 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;

μ_0 - Média desejada, ou valor alvo.

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 e não é 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.

Os gráficos CUSUM tabulares trabalham acumulando desvios que estão abaixo ou acima do valor alvo, com estatísticas C_i^- e C_i^+ , respectivamente. Essas 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:

μ_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 o 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. O 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.

Neste estudo, os valores foram plotados em um gráfico de autocorrelação, constituído no software MINITAB 16, os quais quando apresentam autocorrelação devem ser submetidos ao modelo autorregressivo integrado de média móvel (ARIMA), para que se apliquem os gráficos de controle aos resíduos, a fim de eliminar o efeito da autocorrelação e garantir a independência entre si dos dados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, apresentam-se os cálculos de média, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, valores de máximo e mínimo para Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Lâmina aplicada (Lâmina), Eficiência dos Aspersores (Ea) e velocidade do vento (Vento).

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

Análises de 60 ensaios de irrigação por aspersão	CUC (%)	Lâmina (mm)	Ea (%)	Vento (m s⁻¹)
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
 Ea - Eficiência dos Aspersores
 Vento – Velocidade média do vento
 Lâmina – Lâmina aplicada na área irrigada

A observação da variável CUC na Tabela 2, a qual caracteriza a irrigação, permite que se verifique a presença de uma dispersão nos dados, que varia 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%, que parte de um mínimo de 0 a um máximo de 4,32 m s⁻¹.

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, pois, observou-se na Tabela 2 a variação da velocidade do vento e também nos valores de eficiência de aspersão (Ea), em que foram apresentados os valores mínimos de 28,31%. No entanto, para a irrigação, são resultados totalmente inaceitáveis, pelo desperdício de água e energia, mas também foram obtidos máximos de 88,80%, considerados como bons resultados para irrigação por aspersão conforme a classificação de Keller & Bliesner (2009).

Para melhor investigação do processo de irrigação por aspersão, foi realizado um estudo das variáveis CUC e Ea, a fim de que fossem classificados os ensaios em diferentes faixas de velocidade do vento, conforme Tabela 3.

Tabela 3 Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e Eficiência de aspersão (Ea) para diferentes velocidades de vento.

Vento (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

Na Tabela 3, observa-se que os maiores resultados de CUC e E_a correspondem às menores faixas de velocidade do vento, os quais corroboram com Justí et al. (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.

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

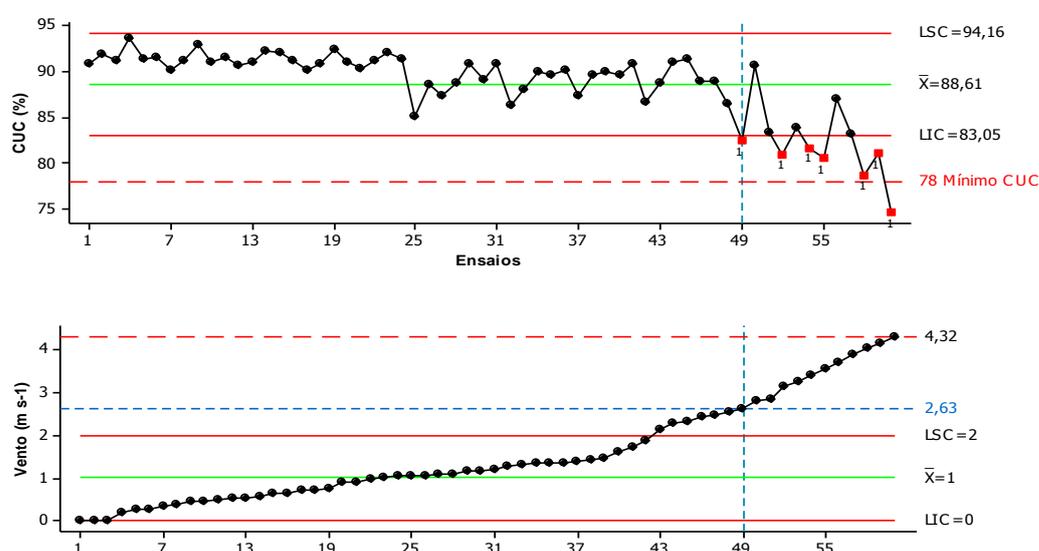


Figura 1 - Gráfico Shewhart para CUC organizados da menor para maior velocidade de vento

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 (CUC = 82,44%). Logo, podem ser observados 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 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) alertam que os 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.

Nos ensaios 52, 54, 55, 58 e 59, observados na Figura 1, verificam-se pontos que extrapolam o limite inferior de controle calculado. A causa desta variação é devido à

interferência da variável climática que mais influencia a irrigação por aspersão e a velocidade do vento que, nesses ensaios, se mantém acima de $2,0 \text{ m s}^{-1}$. Ainda assim, os valores ficaram acima de 78%, limite mínimo indicado por Keller & 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 ($4,3 \text{ m s}^{-1}$). Portanto, comprova-se a influência dessa variável climática na irrigação por aspersão convencional e apresenta-se o CUC de 74,6%, abaixo do mínimo aceitável para irrigação por aspersão (CUC = 78%). Resultados semelhantes aos reportados no atual estudo foram descritos por Yacoubi et al. (2010), os quais obtiveram os maiores valores de CUC (81%) quando a velocidade esteve próxima a $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e os menores (65%) com velocidade acima de $4,0 \text{ m s}^{-1}$.

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

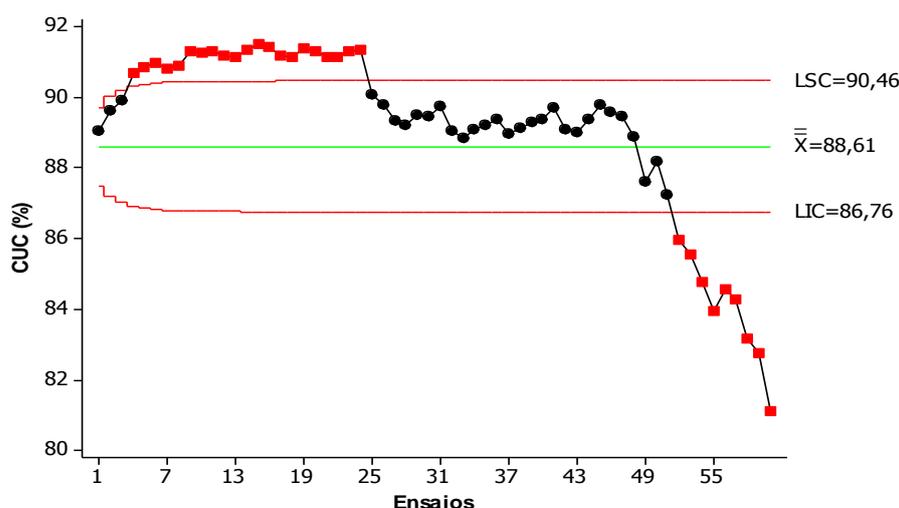


Figura 2 - Gráfico MMEP para CUC

A sequência de pontos acima do limite superior de controle indica um processo fora de controle. São valores muito distantes da média, ocasionados pela baixa velocidade de vento nesses ensaios (menor que 1 m s^{-1}). Para a irrigação, esses valores são ótimos, pois são eventos de elevada uniformidade de aplicação de água, justificando assim a análise da irrigação como um processo unilateral pelo limite inferior.

A partir do ensaio 52, os pontos fora do limite inferior de controle estatístico são ocasionados pela grande variabilidade do vento, os quais a partir deste ponto se mantêm acima de $2,0 \text{ m s}^{-1}$, ou seja, devido à mesma causa apontada pelo gráfico de Shewhart.

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.

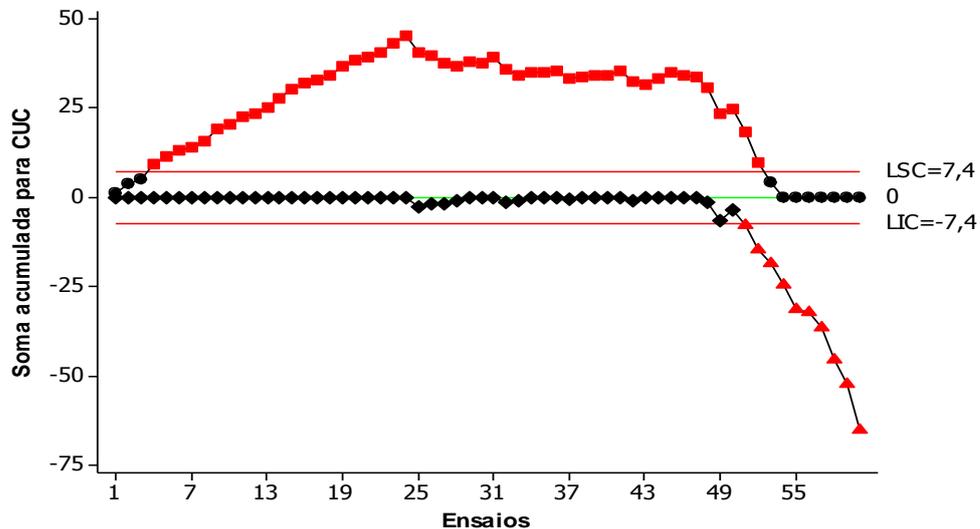


Figura 3 - Gráfico CUSUM para CUC

Existe a suposição de que os dados precisam ser independentes para a confecção dos gráficos de controle. Montgomery (2009) afirma que a investigação da autocorrelação dos dados torna-se bastante importante, pois caso os dados sejam autocorrelacionados, os gráficos de controle podem apresentar resultados enganosos sob forma de alarmes falsos. A verificação da independência dos dados foi realizada pelo gráfico da função de autocorrelação (FIGURA 4).

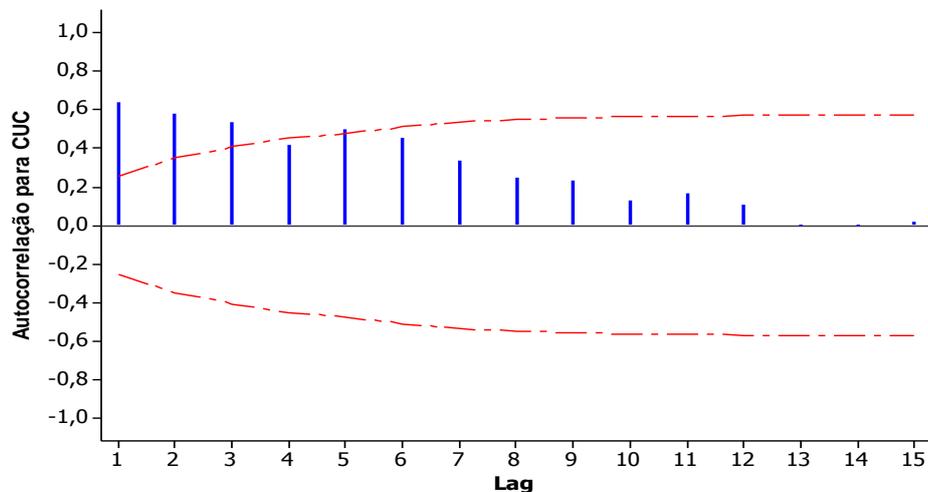


Figura 4 - Gráfico de autocorrelação dos dados

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

Tabela 4 - Estimadores do modelo ARIMA

Tipos	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 $P \leq 0,05$

Observa-se na Tabela 4 que o modelo AR 3 não foi significativo ($P = 0,747$) e apenas os modelos AR 1 e AR 2 apresentaram significância ($P < 0,05$). Porém, como deve ser utilizado o modelo autorregressivo de maior grau significativo, pode-se considerar adequado o modelo ARIMA de 2ª ordem, o qual gerou resíduos para a elaboração dos gráficos de controle.

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

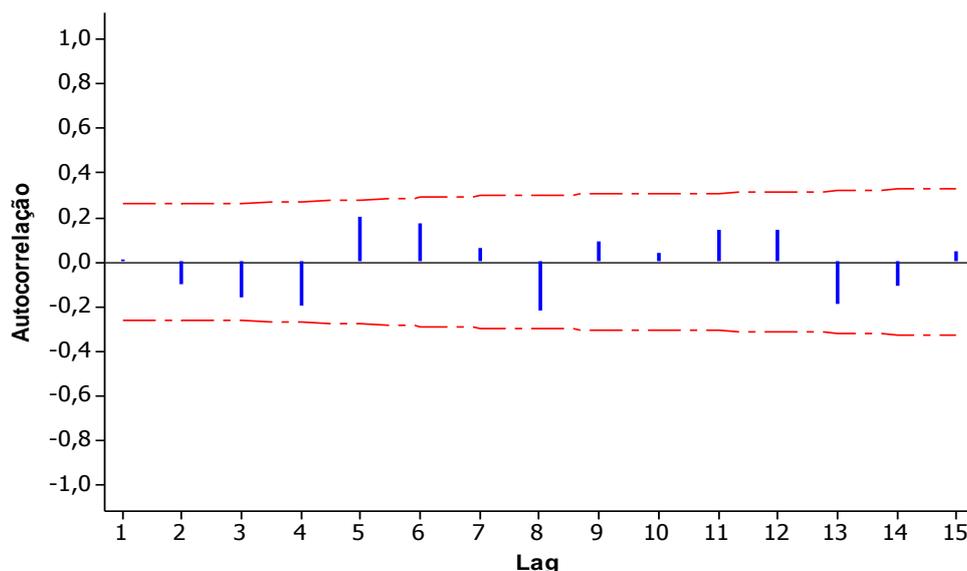


Figura 5 - Gráfico de autocorrelação para resíduos de 2ª ordem

A partir da remoção do efeito da autocorrelação 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 autocorrelação 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 a confecção dos gráficos de controle de Shewhart, MMEP e CUSUM tabular, os quais são apresentados nas Figuras 6, 7 e 8.

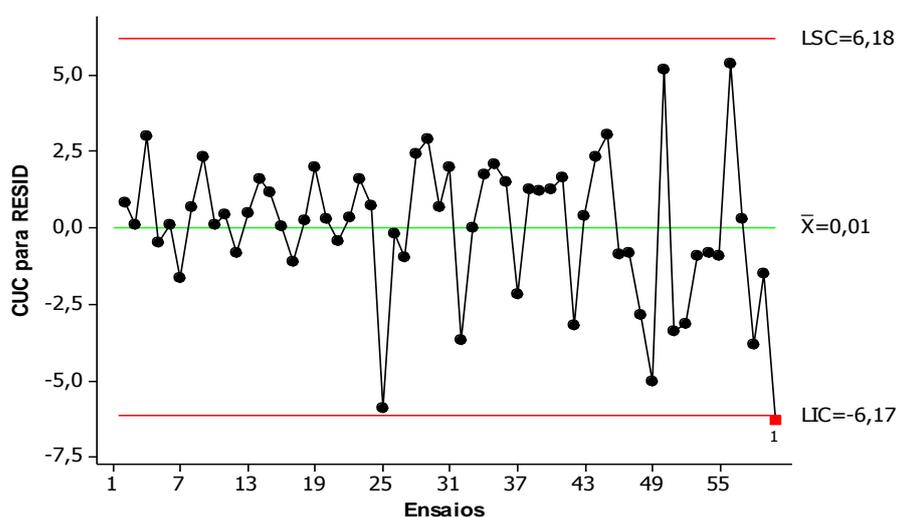


Figura 6 - Gráfico de Shewhart com ARIMA 2ª ordem para CUC

No gráfico para medidas individuais de Shewhart, construído a partir dos resíduos da variável CUC, observa-se que o processo de irrigação por aspersão apresenta apenas o último ponto 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 tais pontos sofriam efeitos da autocorrelação 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 ponto fora dos limites de controle. Logo, pode-se dizer que após a eliminação dos efeitos da

autocorrelação, o processo de irrigação se mantém sob controle estatístico.

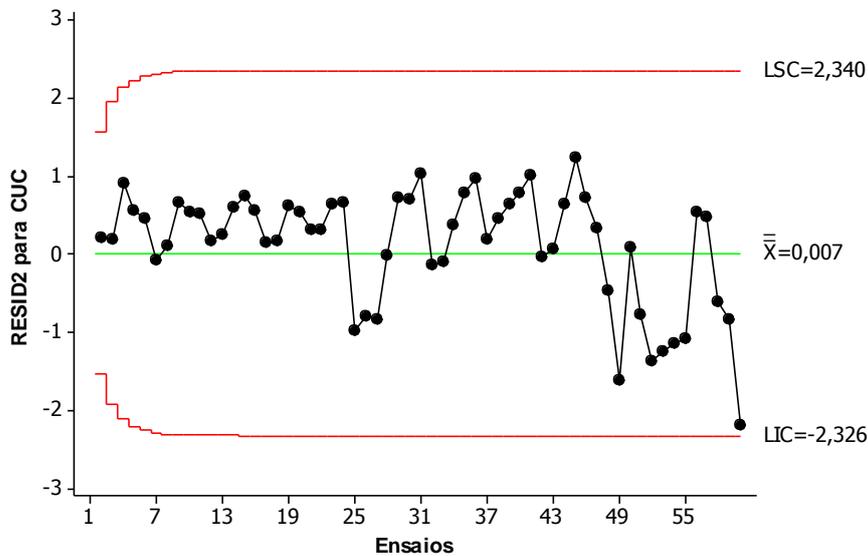


Figura 7 - Gráfico MMEP com ARIMA 2ª ordem para CUC

Ainda na Figura 7, ocorre a presença de uma sequência de 17 pontos acima da média, no intervalo da amostra 7 até a 24. Houve 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 o gráfico de soma acumulada (CUSUM) para os resíduos da variável CUC, gerados a partir do modelo ARIMA de 2ª ordem.

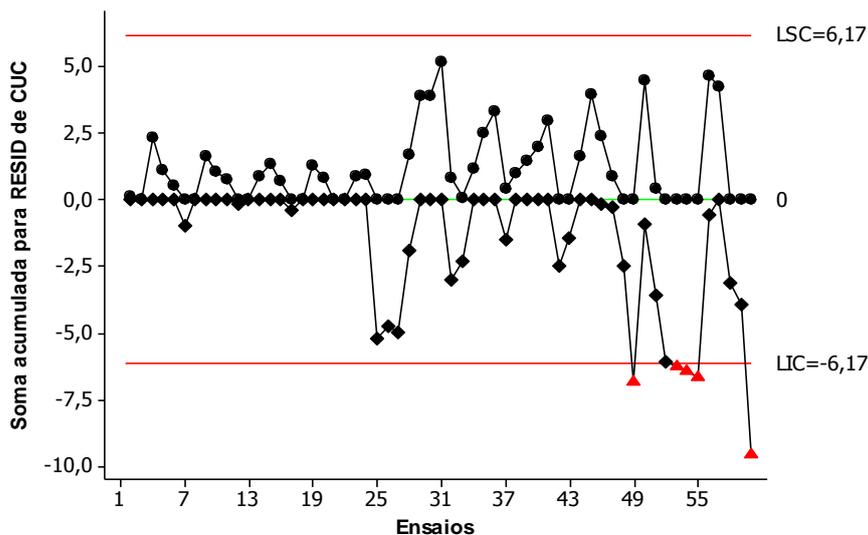


Figura 8 - Gráfico CUSUM com ARIMA 2ª ordem para CUC

Observa-se que o gráfico CUSUM apresentou grande sensibilidade ao detectar a interferência do vento na variabilidade do processo de irrigação, caracterizando o

processo como fora de controle, mesmo após a eliminação dos efeitos da autocorrelação 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 a 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) alertam 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. Tais informações corroboram com Justi et al. (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 autorregressivo 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 autocorrelacionados, deixa claro que ventos próximos a $3,0 \text{ m s}^{-1}$ 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 autocorrelação; apenas alertam sobre a possibilidade de resultados não confiáveis. Montgomery (2009) também partilha deste alerta e afirma 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, foram verificadas ocorrências de resultados incoerentes. Entretanto, o gráfico de controle de Shewhart provou ser robusto ao efeito da autocorrelação, o qual proporciona resultados confiáveis e de fácil interpretação, quando aplicada 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.

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir que: o gráfico de controle MMEP mostrou-se suscetível quando utilizado em dados autocorrelacionados. Tal gráfico considerou fora de controle valores de CUC > 78%, fato classificado como alarmes falsos.

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

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.

Na irrigação por aspersão, quando se relacionou CUC com velocidade do vento, o gráfico de Shewhart foi mais indicado pela simplicidade, eficiência e facilidade de interpretação, mesmo na presença de dados que violam a suposição de independência.

Os gráficos de controle MMEP e CUSUM são ótimas ferramentas estatísticas para detectar pequenas variabilidades no processo, mas no estudo da irrigação por aspersão convencional, como a velocidade do vento tem grande influência, houve maiores oscilações e o gráfico de Shewhart demonstrou melhor a variabilidade no processo.

Porém, como na irrigação por aspersão existem muitas variáveis que podem interferir no processo, como umidade relativa do ar, temperatura e vento, sugerem-se estudos com gráficos de controle multivariados.

5 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, CE, v.43, n.1, p.86-95, Jan/Mar., 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Equipamentos de irrigação agrícola - Aspersores rotativos. Parte 2: Uniformidade de distribuição e métodos de ensaio**. NBR ISSO 7749-2, Rio de Janeiro, JAN. 2000, 6p.

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

COSTA, A. F.B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. 2ª ed. São Paulo: editora 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**. 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**. Chapman-Hall, Publishers,1990. Utah State University, Copyright to 2009. 314p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação princípios e métodos**. 3 ed. 2 reimp. Viçosa: Editora UFV, 2012. 355p.

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.

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, PB, 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**. 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. 069 – 078, jan./mar. 2011.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico da Qualidade**. Rio de Janeiro: editora Elsevier, 2009.

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**, v. 107, July 2010, p. 25-35.

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.

ANEXOS

A-1 DIURNO – Lâminas coletadas nos 30 ensaios

Coletor	Lâmina (mm) / Ensaios																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	5,0	5,0	14,0	8,0	8,5	8,0	9,5	9,0	6,0	6,5	5,0	10,0	9,0	7,4	6,0	7,4	9,5	10,1	8,4	8,7	4,8	4,5	5,2	5,5	9,2	10,0	11,8	9,3	9,1	10,1
2	6,0	6,0	8,0	4,5	6,5	5,5	5,7	7,4	6,3	6,5	5,2	9,0	7,2	7,0	7,1	7,5	8,4	7,9	8,5	7,5	5,5	5,0	5,3	6,0	7,5	8,0	8,4	6,0	6,0	6,6
3	6,0	6,1	7,5	4,6	6,0	6,0	5,5	6,5	6,2	6,8	5,8	8,5	7,7	7,5	7,5	7,6	8,2	7,8	7,8	7,9	5,6	5,0	5,6	5,5	7,2	7,6	8,1	5,7	5,6	6,4
4	6,3	6,3	7,0	4,3	6,2	5,0	5,8	7,5	5,8	7,5	6,0	8,4	8,1	7,0	7,6	7,7	7,7	7,5	7,2	7,7	5,3	4,6	4,6	5,5	6,6	7,6	8,1	5,7	5,5	6,0
5	6,5	6,0	7,8	5,0	6,6	5,5	5,5	7,5	7,0	7,8	6,2	8,0	8,0	7,3	7,7	7,5	7,5	7,8	7,1	7,2	4,5	4,0	4,4	5,2	6,7	7,5	8,1	6,1	6,0	6,6
6	6,5	6,0	10,5	7,0	8,0	8,2	8,4	7,4	7,2	7,1	6,6	7,5	8,3	5,7	6,5	7,0	7,3	8,1	7,5	7,6	5,5	4,0	4,5	5,0	7,8	8,3	8,5	8,5	8,0	8,5
7	3,5	4,5	8,0	5,5	7,8	7,0	8,2	5,8	4,6	4,5	4,1	8,0	5,5	5,0	5,5	6,3	7,6	8,0	6,5	5,8	3,5	3,4	4,5	5,1	8,0	8,0	8,5	7,4	7,1	8,2
8	4,6	5,1	8,1	6,0	7,9	6,5	7,5	7,0	5,3	5,8	5,3	8,5	6,0	6,5	7,4	6,5	7,6	7,8	7,0	6,7	3,8	3,6	4,0	4,6	7,6	7,6	8,4	7,2	7,0	7,9
9	4,7	5,1	8,0	5,0	7,5	6,6	7,0	6,5	5,8	6,4	6,0	8,2	6,5	6,5	7,0	7,0	7,8	8,0	6,9	7,4	4,8	4,1	4,3	5,0	7,5	7,6	8,1	6,8	6,4	7,2
10	5,0	5,0	8,0	6,0	6,5	7,0	6,7	7,2	5,9	7,1	6,2	8,0	7,8	6,4	6,6	7,3	7,4	7,4	7,0	7,5	4,8	4,1	4,1	5,1	7,2	7,5	8,0	7,0	6,4	7,4
11	5,5	5,6	8,5	6,0	6,4	7,0	6,6	7,9	7,4	7,4	6,4	8,0	8,8	6,0	6,8	7,3	7,6	7,5	7,4	7,5	5,0	4,8	4,0	4,9	7,0	7,1	8,1	6,7	6,5	7,4
12	6,0	5,4	8,8	5,5	6,8	6,5	6,2	7,5	7,5	6,6	6,0	7,5	8,8	6,1	6,5	6,7	7,0	6,4	7,4	7,6	3,5	3,0	3,0	4,0	6,3	6,0	7,0	6,6	6,1	7,4
13	3,0	4,3	7,0	7,0	8,0	7,5	7,3	5,4	3,3	4,4	4,0	8,0	5,3	4,8	5,5	6,8	7,5	7,5	7,0	5,0	3,5	4,0	4,8	4,8	7,7	7,5	7,9	7,6	7,5	8,4
14	4,5	4,5	8,0	6,5	8,5	6,5	7,2	5,9	4,2	7,6	4,2	8,0	5,8	5,0	6,0	6,6	7,3	7,9	7,1	6,2	4,0	3,8	4,5	5,2	7,8	7,6	8,2	8,0	7,5	8,4
15	4,0	5,5	8,0	6,0	8,0	7,5	6,5	6,4	5,9	6,8	5,5	8,1	7,1	5,5	6,0	7,5	7,7	7,5	6,7	7,0	4,2	4,7	4,5	4,3	6,5	7,0	7,8	7,6	7,2	8,4
16	4,2	4,1	8,4	5,0	7,0	6,4	6,0	7,5	6,3	6,5	5,5	8,0	8,3	5,3	5,8	7,0	7,6	7,5	6,7	7,8	4,0	4,6	4,0	4,0	7,5	7,2	7,5	7,0	7,0	8,1
17	5,5	4,9	8,6	5,0	7,5	6,5	5,5	8,2	6,5	6,8	5,8	7,9	8,6	5,0	6,3	7,2	7,5	7,2	7,2	7,0	4,1	3,9	3,0	3,8	7,1	7,0	7,6	7,0	7,0	7,7
18	5,5	4,9	8,3	5,0	7,7	6,0	5,0	8,5	6,5	7,2	5,7	7,0	8,6	5,0	5,7	6,9	6,7	6,4	7,3	7,6	4,2	3,6	3,8	4,0	6,3	5,9	6,9	6,4	6,5	7,2
19	4,0	3,7	7,2	5,5	8,0	8,0	7,7	4,9	4,0	4,1	3,8	8,0	5,5	5,0	4,5	6,8	8,3	7,5	7,2	5,0	4,6	3,5	3,7	3,8	7,2	7,9	8,0	7,6	7,5	8,3
20	4,0	4,0	8,0	7,0	8,3	7,5	7,0	5,4	4,3	4,6	4,5	8,0	6,0	4,2	4,1	7,0	7,6	7,6	7,5	6,9	5,0	3,2	3,2	4,0	7,3	7,7	8,5	7,8	8,0	8,6
21	4,5	4,0	8,5	6,6	8,1	7,3	7,1	6,7	5,5	5,8	5,4	8,0	7,0	4,4	4,5	6,5	7,7	7,5	6,4	7,2	4,6	2,9	3,1	3,6	6,8	7,7	8,0	7,8	7,6	8,4
22	4,0	3,8	8,5	7,0	8,4	6,3	6,7	7,3	6,0	5,8	5,2	8,0	7,5	4,4	4,4	6,3	7,5	7,4	6,4	6,7	4,3	3,0	3,5	3,2	6,2	6,3	7,7	7,6	7,5	8,5
23	4,5	3,8	8,8	6,8	7,7	6,3	6,3	8,0	6,4	6,1	5,5	7,9	8,0	4,7	4,6	6,4	7,0	7,4	6,0	6,8	4,5	3,3	2,5	4,3	5,8	7,2	7,6	7,2	7,2	8,1
24	5,0	3,8	8,4	6,2	6,5	6,2	5,2	8,2	6,2	6,0	5,5	7,5	8,0	4,5	5,5	6,7	7,5	6,6	5,8	7,5	4,6	4,0	3,0	4,5	6,9	6,3	7,1	6,1	6,0	6,8
25	4,3	4,5	7,5	6,7	8,5	8,0	7,6	4,5	3,2	4,0	3,5	9,0	5,0	4,5	4,0	5,6	8,0	7,5	6,0	4,8	4,8	3,8	3,5	4,2	7,0	8,2	8,6	7,3	7,5	8,0
26	4,0	4,3	8,0	7,4	8,3	8,0	7,5	5,9	3,6	4,6	3,6	8,0	5,6	4,4	4,5	6,6	7,5	7,5	6,5	6,5	5,0	3,0	3,7	3,9	6,7	8,2	8,8	7,7	8,0	8,5
27	3,7	4,0	8,5	7,3	8,7	8,2	7,6	6,5	4,4	5,7	4,0	7,1	7,0	4,1	5,0	5,8	6,6	7,3	5,3	6,8	4,2	2,5	3,0	3,0	6,5	8,0	8,5	7,6	7,6	8,5
28	3,7	3,5	9,0	7,5	8,5	7,5	6,8	7,2	5,3	5,7	4,7	7,0	7,8	4,2	4,4	5,0	6,1	7,0	5,2	6,7	4,2	2,0	2,9	3,9	6,4	7,5	8,1	7,9	7,7	8,5
29	4,5	3,7	9,4	6,8	7,3	6,2	6,2	7,2	5,5	4,7	4,2	7,0	7,8	4,0	4,0	5,1	6,4	7,3	4,5	6,4	4,2	2,3	2,5	3,0	6,0	7,6	7,6	7,1	7,5	8,4
30	5,0	5,0	9,0	6,0	7,0	6,0	6,2	7,2	4,0	5,0	4,0	8,5	7,9	5,1	4,4	5,9	7,5	7,4	5,0	7,0	5,0	3,0	3,0	4,3	6,2	7,0	7,6	6,2	6,5	7,4
31	6,5	6,8	9,0	8,0	9,2	8,5	9,3	8,0	6,1	6,0	4,3	11,0	7,6	5,8	5,2	8,1	10,6	9,8	7,5	7,9	4,5	2,5	3,5	3,9	8,5	9,7	11,2	9,2	8,6	10,4
32	3,0	3,7	7,5	7,0	8,6	8,6	8,4	6,5	4,8	5,0	4,3	7,3	5,7	4,0	4,2	5,6	6,5	7,0	5,5	6,2	3,3	1,9	1,9	2,3	6,5	7,6	8,4	8,0	8,4	9,0
33	3,0	3,5	7,5	8,5	8,3	8,2	7,6	7,3	4,9	4,6	3,5	5,6	6,5	3,5	3,9	5,1	5,0	6,3	5,5	6,5	3,3	1,3	2,0	2,5	5,8	7,4	8,0	7,5	7,3	8,5
34	2,5	3,2	8,0	8,0	8,0	8,4	7,7	6,7	4,9	4,5	4,7	5,6	6,7	3,5	3,8	4,5	4,6	6,3	3,8	5,7	2,8	1,2	2,0	1,8	6,0	7,3	7,6	7,6	7,7	8,4
35	3,0	3,5	9,0	7,0	8,2	7,5	7,3	6,2	5,0	4,5	3,5	6,0	6,4	3,6	3,8	4,4	5,0	6,7	4,0	6,0	2,9	1,0	2,5	2,0	6,8	8,0	7,6	7,5	7,5	8,4
36	4,6	6,0	11,0	8,0	9,1	8,5	8,1	7,0	5,8	5,4	4,3	9,5	7,0	6,0	3,8	7,9	10,4	10,9	6,4	6,4	4,7	2,5	3,5	3,9	8,2	11,9	14,2	8,3	8,0	8,9

A-2 NOTURNO – Lâminas coletadas nos 30 ensaios

Coletor	Lâmina (mm) / Ensaios																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	13,9	11,0	9,5	11,0	11,5	11,0	9,1	10,0	10,5	11,5	9,6	10,2	11,4	10,0	10,2	10,4	9,5	11,4	11,0	10,0	10,5	11,0	10,5	10,3	11,0	11,5	11,0	11,6	11,6	11,6
2	7,5	6,8	5,6	8,0	9,0	9,4	8,5	9,0	8,7	7,5	7,5	8,3	8,5	7,5	8,0	7,7	6,6	8,8	8,0	7,5	7,2	7,4	9,0	8,5	8,2	8,0	7,0	7,2	7,1	7,5
3	7,0	6,2	5,0	8,0	8,8	8,4	7,6	8,5	8,8	6,8	6,0	8,0	8,2	7,4	7,5	7,2	6,0	8,7	7,7	6,4	7,2	6,3	8,6	8,5	7,6	7,5	6,0	6,3	6,5	6,5
4	7,0	6,2	5,0	8,0	8,8	8,1	7,3	7,5	8,8	6,5	5,8	7,5	8,1	7,4	7,0	6,7	5,6	8,6	8,0	7,5	7,2	6,4	7,0	8,0	7,3	7,1	6,2	6,5	6,5	6,5
5	7,0	7,0	5,5	8,0	9,0	8,0	7,5	7,9	8,1	7,0	6,0	7,7	8,8	8,5	7,5	8,0	5,8	8,6	7,1	7,0	8,0	7,1	7,1	8,0	8,4	8,3	6,9	7,1	7,4	7,5
6	9,5	9,0	7,8	8,0	8,5	8,0	6,5	7,5	8,6	10,0	8,6	7,5	9,5	9,5	9,4	10,2	8,8	9,0	8,0	7,3	12,0	11,0	8,0	7,5	9,5	10,5	10,0	10,5	10,5	11,2
7	7,3	8,6	7,0	7,0	7,5	8,3	7,5	7,2	8,5	8,9	7,7	8,0	8,4	8,7	8,9	8,5	8,2	7,0	6,4	6,1	9,0	11,0	7,1	8,6	8,4	8,6	8,5	8,7	9,2	9,1
8	7,6	8,0	6,4	8,0	8,5	8,5	8,0	8,0	8,5	8,5	8,4	7,6	8,3	8,5	8,2	8,0	8,6	8,0	7,6	7,5	8,4	8,6	9,0	8,4	8,6	8,5	7,9	8,5	8,6	8,6
9	7,5	7,5	5,5	8,0	9,0	8,1	7,5	7,8	8,2	8,0	6,7	7,5	8,4	8,2	8,0	8,0	6,5	9,0	7,0	7,0	8,2	8,0	8,5	7,5	8,1	8,2	7,3	7,5	7,5	8,0
10	8,0	7,0	5,4	7,9	8,6	7,5	7,2	7,7	8,0	7,9	6,1	7,6	8,0	7,4	7,5	7,4	6,6	8,6	8,4	7,6	8,0	8,0	8,3	7,6	7,5	8,0	7,0	7,1	7,0	7,0
11	8,0	6,8	6,0	8,4	8,5	7,9	8,3	7,9	8,0	7,4	6,3	7,2	7,9	7,3	7,2	7,2	6,6	8,5	8,9	7,5	8,3	8,1	8,5	7,8	7,5	7,6	7,2	7,3	7,5	7,7
12	8,0	7,3	6,0	7,3	8,2	7,5	8,2	7,5	6,8	7,6	7,2	5,5	6,7	6,1	6,1	6,7	7,1	8,0	9,0	8,5	8,0	8,9	8,6	7,0	6,5	7,0	7,2	8,0	8,2	8,1
13	6,5	8,0	8,0	7,0	7,0	7,5	7,0	7,0	8,2	8,0	8,4	7,5	7,9	7,9	8,6	8,3	8,2	6,5	6,0	5,6	8,0	8,1	6,4	8,1	8,0	8,0	8,0	9,0	8,6	9,4
14	7,5	8,0	7,3	7,8	8,4	7,5	7,1	8,2	8,5	8,0	9,3	7,2	8,2	8,2	8,6	8,3	8,4	7,7	6,0	6,9	8,4	8,5	7,0	8,1	8,1	8,1	8,3	8,8	8,8	9,1
15	7,9	7,6	6,5	7,8	8,5	7,8	6,8	7,2	8,0	8,0	8,1	7,3	8,0	8,0	8,0	7,9	8,0	8,4	6,5	5,9	7,9	8,5	8,1	7,6	7,6	7,6	8,0	8,5	8,1	8,6
16	8,0	7,2	6,5	7,6	8,5	7,0	7,0	7,3	7,5	7,9	8,0	7,4	7,9	7,6	7,6	7,4	8,0	8,0	8,0	7,4	8,0	8,5	8,5	7,1	7,5	7,6	7,2	8,0	8,0	8,0
17	8,5	6,5	6,2	7,8	8,6	7,7	7,5	7,6	7,6	7,7	7,6	7,0	7,8	6,8	7,0	7,4	7,1	8,0	8,4	7,9	8,1	8,5	8,4	8,0	7,6	7,6	7,2	7,6	7,5	7,8
18	8,0	6,0	6,4	7,2	8,2	7,9	7,6	7,7	7,0	7,0	7,1	5,5	6,6	5,5	6,0	6,1	7,0	8,1	8,5	8,6	7,5	8,2	8,8	7,0	6,1	6,6	6,5	7,2	7,2	7,5
19	6,5	7,6	8,0	7,6	7,5	8,1	8,0	7,0	8,2	7,8	7,5	7,6	8,1	8,0	8,4	8,5	7,0	7,0	6,0	5,8	8,0	7,3	6,0	8,2	8,0	8,2	8,4	8,9	8,5	8,6
20	7,6	8,4	8,0	7,8	8,2	7,6	7,1	7,5	8,6	8,2	8,5	7,6	7,9	8,0	8,5	8,5	8,6	7,5	6,0	6,0	8,0	8,5	6,4	8,4	8,0	8,2	8,5	9,3	8,4	9,1
21	8,0	7,6	7,4	7,6	8,5	7,4	7,0	7,4	8,2	7,8	8,4	7,6	8,0	8,2	7,8	8,0	8,3	8,0	6,5	6,0	7,7	8,0	7,8	8,2	7,8	7,7	8,0	8,6	8,4	8,7
22	8,0	7,4	7,0	7,8	8,5	7,3	7,7	7,8	7,8	8,0	8,5	7,8	8,2	8,2	7,8	8,0	8,0	7,5	7,1	6,0	8,0	8,0	8,0	8,0	7,8	8,0	7,6	8,0	8,0	8,3
23	8,5	7,0	6,5	7,7	8,6	7,9	8,1	8,3	7,6	8,0	8,4	7,3	8,2	7,5	7,2	7,6	8,0	7,8	8,0	7,6	8,4	8,6	8,4	8,0	8,0	8,2	7,0	7,5	7,6	8,0
24	8,5	5,5	5,8	7,0	8,0	8,2	8,0	8,2	7,1	7,4	7,3	5,7	6,9	5,5	5,6	6,0	7,5	7,8	8,2	8,0	8,0	8,4	8,5	7,1	6,3	7,0	6,0	7,0	6,9	7,2
25	6,5	8,5	7,0	9,4	9,5	9,7	9,3	9,0	9,0	7,8	7,3	7,8	8,2	8,5	8,4	8,5	7,6	8,7	6,6	6,0	8,3	7,9	6,5	9,0	8,5	8,7	8,3	9,0	8,6	8,5
26	7,7	9,0	8,0	8,0	9,5	8,6	8,2	8,4	9,0	8,1	8,4	7,5	8,4	8,6	8,4	8,6	9,0	8,5	6,5	6,4	8,3	8,5	6,7	8,0	8,3	8,7	8,5	9,0	8,7	9,1
27	7,8	8,3	7,9	7,5	8,5	7,1	7,0	7,4	8,6	8,0	8,5	7,5	8,4	8,5	7,9	8,1	9,0	8,0	7,0	6,5	8,1	8,1	8,0	8,3	8,5	8,0	8,5	8,4	8,5	
28	8,0	7,8	7,5	7,6	8,0	5,5	7,0	7,5	7,9	8,0	8,5	7,2	8,5	8,3	7,5	8,1	8,1	7,6	7,5	6,6	8,3	8,1	8,2	7,6	8,3	8,5	7,5	8,3	8,0	8,1
29	8,6	7,8	7,0	7,5	8,1	7,5	7,2	8,1	8,0	8,3	8,7	7,5	8,0	7,4	7,3	7,6	8,5	7,0	8,0	7,5	8,6	9,0	8,7	8,0	8,1	8,5	7,6	8,2	7,9	8,4
30	9,0	6,4	5,9	7,4	8,0	7,5	8,0	8,1	8,3	7,9	8,4	6,6	7,5	6,4	6,4	6,5	8,4	8,3	8,2	8,1	8,0	8,8	8,8	9,0	7,0	7,3	7,0	7,5	7,4	7,6
31	9,0	9,9	8,1	10,5	12,5	7,8	10,5	12,0	10,5	9,5	9,8	9,3	9,8	9,8	8,7	9,1	10,0	13,0	10,5	9,5	11,6	11,0	12,0	9,8	11,0	12,0	9,4	9,6	9,5	9,8
32	7,0	9,0	8,8	8,4	10,0	11,0	7,6	9,0	8,0	7,6	8,1	7,2	8,5	8,9	7,3	7,8	8,7	9,2	7,8	7,4	8,1	8,5	9,0	6,5	7,6	8,3	9,0	9,3	9,0	9,3
33	7,0	8,4	8,5	6,7	7,9	7,6	6,0	7,0	7,5	7,4	8,1	6,7	8,0	8,3	7,0	7,3	8,3	7,6	8,1	7,3	8,0	8,0	8,5	5,9	7,6	8,2	7,7	8,0	8,0	8,1
34	7,5	8,0	7,7	6,0	6,8	6,6	5,6	6,4	7,5	7,2	8,1	6,3	8,0	7,8	7,0	7,5	8,2	6,5	8,2	7,6	8,1	8,3	8,0	6,1	7,4	8,2	7,7	8,3	8,1	8,5
35	8,0	8,1	7,9	6,0	6,8	5,0	5,8	6,5	7,5	8,0	9,0	7,8	8,5	7,8	7,9	8,0	8,5	6,6	8,5	8,2	8,6	9,0	8,0	6,6	7,7	8,4	7,7	8,5	8,1	8,5
36	10,8	9,3	7,9	9,5	9,1	5,5	8,3	9,0	14,0	9,3	9,1	8,7	9,5	8,7	10,0	10,4	9,0	8,5	7,9	8,0	11,0	10,4	9,0	10,9	10,0	10,0	8,5	9,1	9,2	9,5

A-3 DIURNO - Dados calculados

Ensaio	CUC (%)	CUD (%)	CUE (%)	Vento (m/s)	Umid ar (%)	Temp (C°)	la med (mm/h)	la colet (mm/h)	Pe+arraste (%)	E1 = CUC	E2 (%)	Ea (%)	Li	Ls
1	81,0	70,8	76,2	3,2	29,1	32,1	8,9	4,6	48,2	81,0	51,8	42,0	2,547	6,681
2	82,4	76,6	79,5	2,6	31,0	30,3	8,9	4,7	47,2	82,4	52,8	43,5	3,010	6,384
3	90,9	87,8	85,1	0,7	72,6	24,4	8,9	8,5	4,7	90,9	95,3	86,6	6,277	10,684
4	85,0	76,6	82,3	1,1	76,7	11,0	8,9	6,4	28,5	85,0	71,5	60,8	4,224	8,510
5	90,9	84,1	89,0	1,2	63,9	12,3	8,9	7,7	13,2	90,9	86,8	78,9	6,023	9,427
6	88,0	82,9	86,1	1,3	52,2	18,3	8,9	7,1	20,6	88,0	79,4	69,9	4,962	9,172
7	87,3	80,5	84,3	1,4	40,0	28,4	8,9	7,0	21,8	87,3	78,2	68,3	4,782	9,129
8	88,6	80,7	85,5	1,1	76,7	11,0	8,9	6,9	22,0	88,6	78,0	69,0	4,492	9,386
9	83,3	72,1	79,5	3,9	44,7	26,0	8,9	5,5	38,3	83,3	61,7	51,4	3,103	7,875
10	83,9	75,3	81,0	3,3	39,0	28,2	8,9	5,9	34,0	83,9	66,0	55,4	3,661	8,083
11	83,3	76,4	81,1	2,9	37,4	28,3	8,9	4,9	44,4	83,3	55,6	46,3	3,204	6,685
12	91,4	84,2	86,8	1,1	55,2	24,8	8,9	7,9	10,9	91,4	89,1	81,5	6,072	9,795
13	86,5	78,0	84,1	2,6	61,6	23,2	8,9	7,2	19,4	86,5	80,6	69,8	4,777	9,579
14	81,7	75,2	78,0	3,4	33,9	30,6	8,9	5,2	41,0	81,7	59,0	48,2	3,925	6,569
15	80,5	71,4	77,4	3,6	33,8	31,0	8,9	5,4	38,8	80,5	61,2	49,3	4,141	7,059
16	88,9	79,3	85,7	2,4	27,5	30,5	8,9	6,6	26,0	88,9	74,0	65,8	4,998	8,174
17	89,7	80,5	83,7	1,4	31,4	30,2	8,9	7,4	16,4	89,7	83,6	75,0	5,286	9,587
18	92,2	87,7	87,4	0,6	44,4	26,4	8,9	7,6	14,7	92,2	85,3	78,7	5,844	9,339
19	86,6	75,9	82,9	1,9	36,5	28,2	8,9	6,5	26,6	86,6	73,4	63,6	5,044	8,023
20	90,0	82,9	87,2	1,5	54,8	22,8	8,9	6,9	23,0	90,0	77,0	69,3	4,626	9,079
21	87,0	77,9	83,8	3,7	30,8	26,8	8,9	4,4	51,0	87,0	49,0	42,7	3,080	5,648
22	74,6	56,6	68,5	4,3	22,8	31,9	8,9	3,4	62,0	74,6	38,0	28,3	2,101	4,654
23	78,7	68,0	74,0	4,1	20,8	33,7	8,9	3,6	59,1	78,7	40,9	32,2	2,357	4,926
24	81,0	67,4	75,4	4,2	22,4	32,7	8,9	4,2	53,3	81,0	46,7	37,8	2,742	5,569
25	91,1	87,2	88,9	1,0	73,2	22,8	8,9	7,0	21,3	91,1	78,7	71,8	5,261	8,756
26	91,5	86,5	85,9	0,5	60,0	30,1	8,9	7,7	13,7	91,5	86,3	79,0	5,576	9,785
27	90,8	88,6	83,5	0,0	70,9	27,3	8,9	8,3	6,3	90,8	93,7	85,1	6,193	10,479
28	90,9	84,5	88,2	1,7	54,8	28,9	8,9	7,3	18,0	90,9	82,0	74,5	5,456	9,133
29	90,6	84,3	88,3	2,8	64,1	26,7	8,9	7,2	19,3	90,6	80,7	73,1	5,486	8,875
30	91,3	85,1	88,5	2,3	79,4	22,7	8,9	8,0	9,6	91,3	90,4	82,5	6,370	9,713

A-4 NOTURNO - Dados calculados

Ensaios	CUC (%)	CUD (%)	CUE (%)	Vento (m/s)	Umid do ar (%)	Temp (C°)	la med (mm/h)	la colet (mm/h)	Pe+arraste (%)	E1 = CUC	E2 (%)	Ea (%)	Li	Ls
1	90,2	85,6	83,4	0,4	78,0	22,2	8,9	8,0	9,9	90,2	90,1	81,3	5,717	10,322
2	88,7	82,4	85,2	1,1	76,3	19,1	8,9	7,7	13,0	88,7	87,0	77,2	5,378	10,105
3	86,3	79,4	83,8	1,3	82,1	17,9	8,9	7,0	21,8	86,3	78,2	67,5	4,937	8,980
4	92,0	87,1	87,3	0,6	62,5	18,7	8,9	7,9	11,7	92,0	88,3	81,2	5,857	9,854
5	92,0	87,4	87,3	1,0	67,4	19,0	8,9	8,6	3,5	92,0	96,5	88,8	6,458	10,714
6	87,5	77,0	83,7	1,1	46,8	23,8	8,9	7,8	12,0	87,5	88,0	77,0	6,456	10,544
7	91,0	86,1	87,5	0,9	54,8	22,0	8,9	7,6	14,9	91,0	85,1	77,4	5,581	9,563
8	91,2	88,1	87,2	0,6	62,5	18,7	8,9	7,9	10,7	91,2	89,3	81,5	5,972	9,923
9	91,2	87,7	85,2	0,0	70,2	27,6	8,9	8,4	5,9	91,2	94,1	85,8	6,364	10,391
10	92,9	89,0	88,5	0,5	33,8	19,7	8,9	8,0	10,0	92,9	90,0	83,7	6,297	9,731
11	89,7	82,1	87,1	1,6	54,7	13,6	8,9	7,9	11,0	89,7	89,0	79,8	6,055	9,778
12	92,4	86,1	87,9	0,8	47,1	22,5	8,9	7,5	16,3	92,4	83,7	77,3	5,391	9,509
13	93,7	90,3	89,8	0,2	58,6	17,7	8,9	8,3	7,2	93,7	92,8	86,9	6,561	9,950
14	90,6	84,0	87,3	0,5	64,0	17,4	8,9	7,9	11,1	90,6	88,9	80,6	5,642	10,186
15	90,2	84,6	87,1	0,7	48,7	24,6	8,9	7,8	12,5	90,2	87,5	79,0	5,418	10,160
16	91,0	85,6	87,3	0,5	61,4	21,3	8,9	7,9	10,9	91,0	89,1	81,1	5,529	10,332
17	89,2	81,5	86,7	1,2	70,4	18,9	8,9	7,9	11,6	89,2	88,4	78,9	6,099	9,640
18	90,4	85,4	85,1	0,9	47,6	22,3	8,9	8,2	7,6	90,4	92,4	83,5	5,783	10,661
19	88,7	81,6	85,1	2,1	58,8	18,0	8,9	7,7	13,5	88,7	86,5	76,7	5,364	10,030
20	88,9	82,5	85,8	2,5	72,4	16,7	8,9	7,2	18,6	88,9	81,4	72,4	4,810	9,673
21	91,8	90,7	86,9	0,0	65,9	24,1	8,9	8,4	5,4	91,8	94,6	86,8	6,281	10,552
22	91,1	86,7	86,6	0,5	73,9	22,2	8,9	8,5	4,3	91,1	95,7	87,1	6,356	10,672
23	90,1	81,9	85,9	1,4	79,2	21,7	8,9	8,2	8,3	90,1	91,7	82,7	5,816	10,512
24	91,2	84,8	87,1	0,4	45,3	26,6	8,9	8,0	10,5	91,2	89,5	81,6	5,903	10,036
25	91,5	87,3	87,1	0,3	55,1	25,1	8,9	8,0	9,7	91,5	90,3	82,6	5,678	10,389
26	91,5	87,4	86,4	0,3	65,2	23,4	8,9	8,3	6,7	91,5	93,3	85,3	5,940	10,666
27	90,0	85,2	86,6	1,4	82,2	22,0	8,9	7,8	12,7	90,0	87,3	78,6	5,591	9,953
28	89,7	84,8	86,5	1,4	85,2	17,7	8,9	8,3	7,0	89,7	93,0	83,4	6,051	10,504
29	91,0	86,2	87,4	2,3	87,6	16,6	8,9	8,2	8,1	91,0	91,9	83,6	6,144	10,217
30	90,8	85,7	87,2	1,2	90,0	15,6	8,9	8,4	5,3	90,8	94,7	86,0	6,067	10,794

A-5 DIURNO

Ensaio	Lâmina média (mm)	Desv.Pad.	C.V (%)	Val.Mín	Val.Máx
1	4,6	1,09	23,81	2,5	6,5
2	4,7	0,96	20,54	3,2	6,8
3	8,5	1,26	14,87	7,0	14,0
4	6,4	1,13	17,73	4,3	8,5
5	7,7	0,85	11,03	6,0	9,2
6	7,1	0,98	13,91	5,0	8,6
7	7,0	1,10	15,75	5,0	9,5
8	6,9	1,00	14,47	4,5	9,0
9	5,5	1,12	20,47	3,2	7,5
10	5,9	1,12	19,01	4,0	7,8
11	4,9	0,93	18,89	3,5	6,6
12	7,9	1,05	13,24	5,6	11,0
13	7,2	1,14	15,86	5,0	9,0
14	5,2	1,15	21,97	3,5	7,5
15	5,6	1,26	23,04	3,8	7,7
16	6,6	0,94	14,30	4,4	8,1
17	7,4	1,21	16,30	4,6	10,6
18	7,6	0,96	12,64	6,3	10,9
19	6,5	1,12	17,09	3,8	8,5
20	6,9	0,88	12,82	4,8	8,7
21	4,4	0,71	16,24	2,8	5,6
22	3,4	1,07	31,54	1,0	5,0
23	3,6	0,95	26,00	1,9	5,6
24	4,2	1,02	24,56	1,8	6,0
25	7,0	0,78	11,13	5,8	9,2
26	7,7	1,08	14,10	5,9	11,9
27	8,3	1,37	16,47	6,9	14,2
28	7,3	0,86	11,77	5,7	9,3
29	7,2	0,84	11,74	5,5	9,1
30	8,0	0,92	11,47	6,0	10,4

A-6 NOTURNO

Ensaio	Lâmina média (mm)	Desv. Pad.	C.V. (%)	Val. Mín.	Val. Máx.
1	8,0	1,3	16,6	6,5	13,9
2	7,7	1,1	14,8	5,5	11,0
3	7,0	1,1	16,2	5,0	9,5
4	7,9	1,0	12,7	6,0	11,0
5	8,6	1,1	12,7	6,8	12,5
6	8,5	1,2	14,2	5,0	11,0
7	7,6	0,9	12,5	5,6	10,5
8	7,9	1,0	12,8	6,4	12,0
9	8,4	1,2	14,8	6,8	14,0
10	8,0	0,9	11,5	6,5	11,5
11	7,9	1,0	12,9	5,8	9,8
12	7,5	0,9	12,1	5,5	10,2
13	8,3	0,8	10,2	6,6	11,4
14	7,9	1,0	12,7	5,5	10,0
15	7,8	1,0	12,9	5,6	10,2
16	7,9	1,0	12,7	6,0	10,4
17	7,9	1,0	13,3	5,6	10,0
18	8,2	1,2	14,9	6,5	13,0
19	7,7	1,1	14,9	6,0	11,0
20	7,2	1,0	14,2	5,6	10,0
21	8,4	1,1	13,1	7,2	12,0
22	8,5	1,1	13,4	6,3	11,0
23	8,2	1,1	14,1	6,0	12,0
24	8,0	1,0	12,9	5,9	10,9
25	8,0	1,0	12,9	6,1	11,0
26	8,3	1,1	13,6	6,6	12,0
27	7,8	1,0	13,4	6,0	11,0
28	8,3	1,1	13,0	6,3	11,6
29	8,2	1,0	12,6	6,5	11,6
30	8,4	1,1	12,8	6,5	11,6