

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – *CAMPUS* DE CASCAVEL

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CONTROLE DE QUALIDADE DE IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO
EM HORTA URBANA**

THIAGO ZUCULOTTO NUNES

CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL

2018

THIAGO ZUCULOTTO NUNES

**CONTROLE DE QUALIDADE DE IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO
EM HORTA URBANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em **Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas

CASCADEL – PARANÁ – BRASIL

2018

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

Nunes, Thiago Zuculotto
CONTROLE DE QUALIDADE DE IRRIGAÇÃO E
FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO EM HORTA URBANA /
Thiago Zuculotto Nunes; orientador(a), Marcio
Antonio Vilas Boas, 2018.
74 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do
Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de
Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, 2018.

1. Água. 2. Uniformidade. 3. Gráfico de
controle. 4. Índice de capacidade. I. Vilas Boas,
Marcio Antonio. II. Título.

THIAGO ZUCULOTTO NUNES

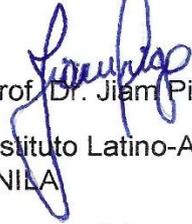
**CONTROLE DE QUALIDADE DE IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO
EM HORTA URBANA**

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

Orientador:


Prof. Dr. Marcio Antônio Vilas Boas

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET), UNIOESTE


Prof. Dr. Jiam Pires Frigo

Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT),
UNILA


Prof. Dr. Erivelto Mercante

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET), UNIOESTE

CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL

2018

BIOGRAFIA

Brasileiro, nascido no ano de 1992, no município de Assis Chateaubriand, PR. Mudou-se para o município de Cascavel em 1993, onde concluiu o ensino médio. Realizou curso de aprendizagem em mecânica automotiva pesada no Senai – Cascavel, concluindo-o no ano de 2009. Atuou como menor aprendiz na empresa M.A. Máquinas Agrícolas Ltda. (concessionária John Deere) na unidade de Cascavel, PR. Ingressou no curso superior em Engenharia Agrícola no ano de 2010 na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e graduou-se no ano de 2014. Atuou como assistente operacional na empresa I. Riedi Grãos e Insumos Ltda. no ano de 2015. Em 2016 iniciou o curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, nível mestrado, na UNIOESTE, desenvolvendo suas atividades para a conclusão do mesmo até o atual momento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida, acima de tudo;

A meu pai, Valderi Feitoza Nunes, minha mãe, Rozeli Aparecida Zuculotto, e minha irmã, Kamila Zuculotto Nunes, por todo o apoio e a compreensão;

Ao professor Dr. Márcio Antônio Vilas Boas, pela orientação, o apoio, o ensinamento, a paciência e a confiança;

Aos meus avós, por serem um grande exemplo de fé e determinação, nunca se deixando abalar pelas dificuldades;

A minha namorada, Amanda Helmann, pelo companheirismo, o acolhimento nas horas de dificuldade, a confiança e a compreensão;

A toda minha família, por serem grande fonte de inspiração e incentivo;

Aos amigos e colegas que me acompanharam nessa jornada;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE e ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – PGEAGRI, pela oportunidade de realização do curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, além do fornecimento de toda a estrutura e a instrumentação necessárias para a realização deste trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

CONTROLE DE QUALIDADE DE IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO EM HORTA URBANA

O sistema de irrigação por gotejamento destaca-se entre os demais métodos de irrigação por sua alta eficiência e uniformidade. Uma das vantagens do sistema de gotejamento é que a pressurização do sistema pode ser feita por gravidade, economizando energia e equipamentos. Referindo-se a hortas urbanas, deve-se esperar por sistemas de irrigação de pequeno porte e pouca tecnologia envolvida; porém, por mais simples que seja, o sistema deve apresentar uma boa uniformidade de aplicação. Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a uniformidade do sistema sob diferentes cargas hidráulicas utilizando ferramentas de controle de qualidade. O experimento foi realizado em horta urbana do município de Cascavel, PR. O tubo gotejador utilizado foi da marca Siplast, modelo P1. A uniformidade do sistema foi avaliada pelo método de Keller e Karmeli (1975), utilizando-se irrigação e fertirrigação sob as cargas hidráulicas de 1,20, 1,40, 1,60 e 1,80 mca. Foram calculados e classificados o CUD, CUC, CUE e CV para a verificação da uniformidade. As ferramentas de controle de qualidade utilizadas foram os gráficos de controle de Shewhart Individual, MMEP e CUSUM, além do índice de capacidade de processo. Ainda, foram realizadas análises de regressão, para saber o efeito da mudança de carga hidráulica sobre a vazão e a uniformidade do sistema. Em todas as análises de regressão, o modelo de melhor ajuste foi o exponencial, sendo que quanto maior a carga hidráulica, maior a vazão e a uniformidade do sistema. Em todos os casos estudados, os diferentes coeficientes de uniformidade foram classificados como excelentes e o coeficiente de variação como baixo. A excelente uniformidade de aplicação ainda foi confirmada pelos gráficos de controle e pelos índices de capacidade de processo, que em todos os casos classificou a uniformidade do sistema como adequada. O gráfico de controle de Shewhart individual mostrou-se menos sensível a possíveis alterações, enquanto os gráficos de MMEP e CUSUM se mostraram mais rigorosos, sendo este último o que apresentou mais sensibilidade a variações.

Palavras-chave: Água; Uniformidade; Gráfico de Controle; Índice de Capacidade.

QUALITY CONTROL OF IRRIGATION AND FERTIRRIGATION BY DRIPPING IN URBAN GARDENS

The drip irrigation system stands out among other irrigation methods because of its high efficiency and uniformity. One of the advantages of the drip system is that pressurizing the system can be performed by gravity, avoiding costs with energy and equipment. In urban gardens, one should expect small irrigation systems and little technology involved; still, however simple it may be, the system must have a good uniformity of application. Thus, the objective of this work was to verify the uniformity of the system under different hydraulic loads using quality control tools. The experiment was carried out in an urban garden of the municipality of Cascavel, PR. The dripping tube used was of the brand Siplast, model P1. The uniformity of the system was evaluated by the method of Keller & Karmeli (1975), using irrigation and fertigation under hydraulic loads of 1.20, 1.40, 1.60, and 1.80 mca. The CUD, CUC, CUE, and CV were calculated and classified to verify uniformity. The quality control tools used were the Shewhart Individual, MMEP, and CUSUM control charts, as well as the process capability index. Regression analyzes were also performed, to know the effect of the change of hydraulic load on the flow and the uniformity of the system. In all regression analyzes, the fittest model was the exponential, and the higher the hydraulic load, the higher the system flow and uniformity. In all the cases studied, the different coefficients of uniformity were classified as excellent, and the coefficient of variation as low. The excellent uniformity of application was further confirmed by the control charts and process capability indices, which in all cases classified the uniformity of the system as adequate. The individual Shewhart control chart was less sensitive to possible changes, while the MMEP and CUSUM charts were more accurate, the latter being more sensitive to variation.

Key-words: Water; Uniformity; Control Chart; Capacity Index.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Hortas urbanas	4
3.2. Irrigação	5
3.3. Irrigação por gotejamento.....	5
3.4. Fertirrigação	6
3.5. Uniformidade de aplicação	7
3.6. Controle estatístico de qualidade.....	8
3.7. Gráficos de controle.....	9
3.8. Capacidade do processo	9
4. MATERIAL E MÉTODOS	11
4.1. Localização e características da área	11
4.2. Características do sistema de irrigação	11
4.4. Fertirrigação	14
4.5. Análise de Regressão.....	17
4.6. Avaliação do sistema.....	18
4.6.1. Coleta das vazões	18
4.6.2. Uniformidade de irrigação.....	19
4.7. Análise de dados	21
4.7.1. Análise descritiva e inferencial.....	21
4.7.2. Controle estatístico de qualidade.....	21
4.7.3. Índice de capacidade do processo.....	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1. Irrigação	26
5.1.1. Estatística descritiva	26
5.1.2. Relação vazão x pressão.....	27
5.1.3. Uniformidade de aplicação	28
5.1.4. Mapas temáticos de contorno.....	28
5.1.5. Relação uniformidade x pressão.....	30

5.1.6.	Gráficos de controle.....	30
5.1.7.	Capacidade de processo	40
5.2.	Fertirrigação	40
5.2.1.	Estatística descritiva	41
5.2.2.	Relação vazão x pressão.....	42
5.2.3.	Uniformidade de aplicação	43
5.2.4.	Mapas temáticos de contorno.....	44
5.2.5.	Relação uniformidade x pressão.....	46
5.2.6.	Gráficos de controle.....	46
5.2.7.	Capacidade de processo	55
6.	CONCLUSÕES.....	57
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
8.	REFERÊNCIAS	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Análise Físico-químico e microbiológico da água utilizada.....	14
Tabela 2 Caracterização do biofertilizante diluído (50:1).....	17
Tabela 3 Classificação de CUD de acordo com Mantovani (2001).....	20
Tabela 4 Classificação do CUC segundo Keller & Bliesner (2009).....	20
Tabela 5 Classificação do CUE segundo Mantovani (2001).....	20
Tabela 6 Classificação do CV segundo Pimentel Gomes (2000).	21
Tabela 7 Estatística descritiva para irrigação.	26
Tabela 8 Coeficientes de uniformidade para irrigação.	28
Tabela 9 Índices de capacidade de processo para irrigação.....	40
Tabela 10 Estatística descritiva para a vazão da fertirrigação.....	41
Tabela 11 Estatística descritiva para a condutividade elétrica da fertirrigação.	41
Tabela 12 Coeficientes de uniformidade da vazão para fertirrigação.	43
Tabela 13 Índices de capacidade de processo para fertirrigação.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de instalação do sistema de irrigação por gotejamento.....	11
Figura 2 Variação de altura da caixa d'água (1,20, 1,40, 1,60 e 1,80 respectivamente).....	12
Figura 3 Alimentação da caixa d'água.	12
Figura 4 Cabeçal de controle (Registro de esfera e Filtro de discos).	13
Figura 5 Fonte de água utilizada.....	14
Figura 6 Lodo de flotor do abate de frangos.....	15
Figura 7 Inoculante.	16
Figura 8 Biofertilizante diluído 50:1.	17
Figura 9 Método de avaliação da uniformidade de acordo com Keller e Karmeli (1975).	18
Figura 10 Coleta das vazões.	19
Figura 11 Análise de regressão para irrigação (vazão x pressão).....	27
Figura 12 Mapa de contorno da vazão para irrigação a 1,20 mca.....	29
Figura 13 Mapa de contorno da vazão para irrigação a 1,40 mca.....	29
Figura 14 Mapa de contorno da vazão para irrigação a 1,60 mca.....	29
Figura 15 Mapa de contorno da vazão para irrigação a 1,80 mca.....	29
Figura 16 Análise de regressão para irrigação (uniformidade x pressão).....	30
Figura 17 Gráficos de controle do CUD da irrigação a 1,20 mca.....	31
Figura 18 Gráficos de controle do CUC da irrigação a 1,20 mca.....	31
Figura 19 Gráficos de controle do CUE da irrigação a 1,20 mca.....	32
Figura 20 Gráficos de controle do CV da irrigação a 1,20 mca.	32
Figura 21 Gráficos de controle do CUD da irrigação a 1,40 mca.....	33
Figura 22 Gráficos de controle do CUC da irrigação a 1,40 mca.....	34
Figura 23 Gráficos de controle do CUE da irrigação a 1,40 mca.....	34
Figura 24 Gráficos de controle do CV da irrigação a 1,40 mca.	35
Figura 25 Gráficos de controle do CUD da irrigação a 1,60 mca.....	36
Figura 26 Gráficos de controle do CUC da irrigação a 1,60 mca.....	36
Figura 27 Gráficos de controle do CUE da irrigação a 1,60 mca.....	37
Figura 28 Gráficos de controle do CV da irrigação a 1,60 mca.	37
Figura 29 Gráficos de controle do CUD da irrigação a 1,80 mca.....	38
Figura 30 Gráficos de controle do CUC da irrigação a 1,80 mca.....	38
Figura 31 Gráficos de controle do CUE da irrigação a 1,80 mca.....	39
Figura 32 Gráficos de controle do CV da irrigação a 1,80 mca.	39
Figura 33 Análise de regressão para fertirrigação (vazão x pressão).....	42
Figura 34 Mapa de contorno da vazão para fertirrigação a 1,20 mca.....	44
Figura 35 Mapa de contorno da vazão para fertirrigação a 1,40 mca.....	44
Figura 36 Mapa de contorno da vazão para fertirrigação a 1,60 mca.....	44

Figura 37 Mapa de contorno da vazão para fertirrigação a 1,80 mca.....	44
Figura 38 Mapa de contorno da condutividade para fertirrigação a 1,20 mca.	45
Figura 39 Mapa de contorno da condutividade para fertirrigação a 1,40 mca.	45
Figura 40 Mapa de contorno da condutividade para fertirrigação a 1,60 mca.	45
Figura 41 Mapa de contorno da condutividade para fertirrigação a 1,80 mca.	45
Figura 42 Análise de regressão para fertirrigação (uniformidade x pressão).....	46
Figura 43 Gráficos de controle do CUD da Fertirrigação a 1,20 mca.	47
Figura 44 Gráficos de controle do CUC da Fertirrigação a 1,20 mca.	47
Figura 45 Gráficos de controle do CUE da Fertirrigação a 1,20 mca.	48
Figura 46 Gráficos de controle do CV da Fertirrigação a 1,20 mca.	48
Figura 47 Gráficos de controle do CUD da Fertirrigação a 1,40 mca.	49
Figura 48 Gráficos de controle do CUC da Fertirrigação a 1,40 mca.	50
Figura 49 Gráficos de controle do CUE da Fertirrigação a 1,40 mca.	50
Figura 50 Gráficos de controle do CV da Fertirrigação a 1,40 mca.	51
Figura 51 Gráficos de controle do CUD da Fertirrigação a 1,60 mca.	51
Figura 52 Gráficos de controle do CUC da Fertirrigação a 1,60 mca.	52
Figura 53 Gráficos de controle do CUE da Fertirrigação a 1,60 mca.	52
Figura 54 Gráficos de controle do CV da Fertirrigação a 1,60 mca.	53
Figura 55 Gráficos de controle do CUD da Fertirrigação a 1,80 mca.	53
Figura 56 Gráficos de controle do CUC da Fertirrigação a 1,80 mca.	54
Figura 57 Gráficos de controle do CUE da Fertirrigação a 1,80 mca.	54
Figura 58 Gráficos de controle do CV da Fertirrigação a 1,80 mca.	55

LISTA DE EQUAÇÕES

Vazão do emissor - Eq. 1.....	13
CUD - Eq. 2.....	19
CUC - Eq. 3.....	20
CUE - Eq. 4.....	20
CV - Eq. 5.....	21
LIC - Eq. 6.....	22
LSC - Eq. 7.....	22
Zi - Eq. 8.....	22
σ_{Zi}^2 - Eq. 9.....	22
LCS - Eq. 10.....	23
LCl - Eq. 11.....	23
Ci - Eq. 12.....	23
Ci+ - Eq.13.....	23
Ci- - Eq.14.....	23
Cp - Eq. 15.....	24
Cpi - Eq. 16.....	25

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional em nosso planeta aumenta cada vez mais a ação do homem sobre o meio ambiente, sendo para a exploração de recursos minerais, para a produção animal ou vegetal para sua alimentação, na utilização de recursos naturais para a produção de energia e, principalmente, no consumo e na interferência nos recursos hídricos disponíveis. Atualmente são vários os casos em que é possível se observar a escassez de água ou mesmo a grande influência humana sobre a qualidade desta.

Algumas das consequências deste aumento da população são a demanda cada vez maior por alimentos, a ocupação de áreas para a habitação e a produção agrícola, necessária para a alimentação humana e de outros animais, além do grande consumo e poluição dos recursos naturais, principalmente da água. Porém, a disponibilidade de novas áreas para a produção de alimentos diminui em um ritmo acelerado, lembrando-se que são necessárias áreas preservadas para a manutenção da saúde de nosso planeta. Existem ainda alguns países onde a ocupação de novas áreas para a produção é inexistente, fazendo com que se busquem alternativas que resultem em aumento de produtividade, suprimindo a demanda por alimentos.

Seguindo este raciocínio, pode-se chegar à utilização de hortas em meio aos centros urbanos, aproveitando os pequenos espaços e normalmente destinadas à produção de hortaliças, condimentos e alguns legumes. As hortas urbanas, como são denominadas, normalmente são cultivadas em meio familiar e possuem uma estrutura simples, tornando seu manejo fácil e rápido. Além disso, a produção, na maioria destes locais, é feita sem a utilização de pesticidas, herbicidas e demais agroquímicos durante seu ciclo de produção.

Em sua maioria, as culturas produzidas em hortas urbanas possuem baixa resistência ao stress hídrico, ou seja, possuem baixa tolerância a falta e ao excesso de água, como é o caso das hortaliças. Em determinados locais, o excesso de chuva pode causar grandes perdas na horticultura, sendo um fator de controle mais difícil. Por outro lado, a falta de água pode ser resolvida mais facilmente com a instalação de um sistema de irrigação, suprimindo a necessidade hídrica de cada cultura conforme o necessário durante todo seu ciclo.

O sistema de irrigação pode ser utilizado como meio de transporte para fertilizantes, processo denominado como fertirrigação, otimizando a fertilização do solo e tornando o cultivo mais eficiente. Porém, a disponibilidade hídrica tem sido limitada, o que sugere o uso cada vez mais inteligente e eficiente deste recurso. Para isso, o sistema de irrigação deve ser utilizado de modo consciente, sem desperdícios, em que o próprio sistema de irrigação deve ser o mais eficiente e uniforme possível.

O sistema de irrigação por gotejamento destaca-se entre os demais métodos de irrigação por sua alta eficiência e uniformidade. É um sistema de alta versatilidade, podendo ser instalado em diversas formas e tamanhos de áreas. Este sistema possui ainda uma grande

economia de energia em seu funcionamento, o que se torna de fundamental importância na hora de sua escolha. Uma de suas desvantagens é o alto custo inicial, pois normalmente necessita de um bom equipamento de filtragem e, dependendo do tamanho do sistema a ser implantado, um sistema de bombeamento de água considerável. O sistema de irrigação por gotejamento utiliza uma baixa vazão de aplicação e normalmente são sistemas que necessitam de pouca pressurização para seu funcionamento.

Ao referir-se sobre o correto funcionamento do sistema de irrigação, deve-se considerar principalmente a uniformidade de aplicação, que deve ser entendida como a aplicação da mesma quantidade de água e/ou fertilizante por toda a área irrigada. A verificação da uniformidade de um sistema de irrigação deve ser realizada após sua instalação e periodicamente após isso, com o objetivo de manter o bom funcionamento do sistema, localizando entupimentos e/ou vazamentos que podem ocorrer.

Para verificar se a qualidade da uniformidade é mantida conforme a utilização do sistema, são utilizadas ferramentas de controle estatístico de qualidade, que possuem como finalidade analisar se existem falhas em um determinado processo, neste caso na uniformidade da irrigação, proporcionando a oportunidade de encontrar onde localiza-se a falha e corrigi-la. As ferramentas utilizadas para tais análises são gráficos, que podem levar em consideração uma ou mais variáveis e indicam se há pontos fora de determinados limites, e índices, que indicam se o processo é capaz ou incapaz de se manter sob controle ou dentro de padrões pré-estabelecidos. Tudo isso é utilizado para verificar se o processo é controlado, ou seja, se a irrigação, neste caso, possui um bom padrão de qualidade.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a uniformidade de irrigação e fertirrigação em um sistema de gotejamento, utilizado em horta urbana, aplicando técnicas de controle estatístico de qualidade.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar e classificar a uniformidade de aplicação do sistema de acordo com os diferentes coeficientes utilizados;
- Determinar os limites de controle e as capacidades dos processos de irrigação e fertirrigação sob diferentes cargas hidráulicas;
- Elaborar gráficos de controle conforme os modelos de Shewhart individual, de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) e de soma cumulativa (CUSUM);
- Analisar, por meio de regressão, os efeitos da mudança de carga hidráulica sobre o sistema, principalmente sobre a uniformidade e a intensidade de aplicação, encontrando os pontos de melhor resultado;
- Confecção de mapas temáticos de superfície, representando visualmente a uniformidade de aplicação do sistema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Hortas urbanas

No contexto de urbanização acelerada nas últimas décadas, a agricultura urbana surge como uma importante ferramenta na gestão com vistas à sustentabilidade, dado que tem potencial para produzir benefícios em diversas dimensões, respondendo às novas demandas de produção, consumo, serviços e aproveitamento de espaço nas cidades. Em termos ambientais, a agricultura urbana pode contribuir para a amenização de impactos ambientais e a melhor gestão dos recursos naturais (RICARTE-COVARRUBIAS et al., 2011).

A agricultura urbana tem sido uma iniciativa associada à busca da sustentabilidade nas cidades. A sua prática em espaços urbanos pode objetivar a segurança alimentar, a geração de renda, a inclusão social e as interações socioambientais, além de contribuir para o aumento dos espaços verdes urbanos. Uma das formas mais comuns de se praticar a agricultura na cidade é através do cultivo de hortas urbanas, que se constituem como novas formas de uso e apropriação de terrenos públicos ou privados, para o cultivo de hortaliças, no interior ou nas periferias das cidades (MEDEIROS et al., 2015).

A agricultura urbana envolve mais que apenas a produção e o consumo de alimentos no meio urbano; ela é um movimento que agrega diversos atores em prol do desenvolvimento e do aperfeiçoamento do cultivo de alimentos e do manejo sustentável (ASPTA, 2015).

Juntamente com as questões de consumo de água para fins agrícolas, a agricultura urbana possui um papel chave na produção e no fornecimento de alimentos para as cidades, especialmente hortaliças e vegetais. Mesmo assim, a produção agrícola é diretamente dependente do fornecimento de água nos volumes necessários, aumentando ainda mais a pressão sobre a demanda de água. Com a crise de falta de água em várias regiões de grande importância agrícola e hortícola, muitas vezes devido a mudanças climáticas, como observado recentemente no sudeste do Brasil, a disponibilidade de água é uma preocupação constante (BIZARI, 2016), o que sugere a adoção do uso cada vez mais eficiente deste recurso.

Além das restrições de oferta, a água utilizada para irrigação em ambientes urbanos é extremamente cara em comparação com o abastecimento de água rural para a horticultura (DIMA et al., 2002; WARD et al., 2014). Existe, portanto, um grande interesse no desenvolvimento de sistemas de irrigação eficientes que possam garantir os recursos hídricos urbanos e proporcionar aos agricultores urbanos um meio de irrigação economicamente eficiente que não seja tecnologicamente complexo (LEVIDOW et al., 2014; LIU, 2011; RUSSO et al., 2014).

3.2. Irrigação

Santos et al. (2015) ressaltam que, dentre as tecnologias aplicadas para obter maiores produções, a irrigação é considerada a técnica de aplicação da água necessária para manter o controle da umidade do solo, objetivando maiores rendimentos na agricultura irrigada. Além disso, a irrigação desempenha papel de grande importância na garantia da colheita, e sua prática é reconhecida por proporcionar melhores condições para a busca da sustentabilidade ambiental (ROCHA, 2015)

Em regiões com déficit hídrico, a irrigação assume papel primordial no desenvolvimento dos arranjos produtivos. Embora aumente o uso da água, os investimentos no setor resultam em aumento substancial da produtividade e do valor de produção. Além disso, exigências legais e instrumentos de gestão, como a outorga de direito de uso água, fomentam o aumento da eficiência e a consequente redução do desperdício (ANA, 2013).

Para que se tenha noção da importância da irrigação, Christofidis (2006) mostra que a área de 18% sob cultivo irrigado produz cerca de 44% da produção total agrícola mundial.

A estimativa de potencial para acréscimo na área mundial dominada por sistemas de irrigação – que atualmente é de 304 milhões de hectares – é de cerca de 180 milhões de hectares, e considera a possibilidade de incorporação das áreas potenciais brasileiras para desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada, que representam um adicional de cerca de 25 milhões de hectares. O Brasil detém um potencial da ordem de 14% das capacidades mundiais de incorporação de novas áreas à agricultura irrigada (CHRISTOFIDIS, 2013).

O desenvolvimento da irrigação depende de procedimentos tecnológicos e econômicos para otimizar o uso da água, melhorar a eficiência de aplicação, proporcionar ganhos de produtividade baseados na resposta da cultura à aplicação de água e outros insumos, sem que comprometa a disponibilidade e a qualidade do recurso (PAZ et al., 2000).

3.3. Irrigação por gotejamento

Sistemas de irrigação localizada são alternativas tecnológicas promissoras, tanto no uso da água como na aplicação de fertilizantes solúveis, assumindo importância econômica e ambiental na atividade agrícola (BORSSOI et al., 2012).

De acordo com Tolentino Junior et al. (2014), a irrigação localizada por gotejamento é uma das tecnologias que mais rapidamente vem se expandindo na moderna agricultura irrigada. Esta técnica de irrigação é caracterizada pela aplicação de pequenos volumes de água, em alta frequência e diretamente na zona radicular das culturas, mantendo o solo próximo à capacidade de campo e evitando a perda de água por evaporação e percolação profunda (FRIZZONE et al., 2012).

Para um bom dimensionamento da irrigação por gotejamento são necessárias informações a respeito da distribuição da água sob uma fonte gotejadora em diferentes vazões do emissor e para diferentes volumes de água aplicada. Também é necessário conhecer como essa distribuição da água é afetada pelas propriedades físico-hídricas do solo. Dessa forma, é possível dimensionar o sistema de irrigação de modo a molhar um volume suficiente do solo que atenda à necessidade de água das plantas, considerando que este volume de solo deve estar relacionado com a distribuição do sistema radicular da cultura (TOLENTINO et al., 2014)

Sistemas de irrigação por gotejamento apresentam alta eficiência e baixo consumo de água e energia. A irrigação localizada permite um controle da água fornecida às plantas, reduz a incidência de pragas e doenças, permite a aplicação de produtos químicos via água de irrigação e possibilita cultivo em áreas com afloramentos rochosos. Apesar de várias vantagens, este sistema tem alto custo inicial, além de necessitar de filtragem da água para evitar entupimento de emissores e frequentes manutenções (MANTOVANI et al., 2007).

Em um sistema de irrigação por gotejamento, a uniformidade de aplicação de água está relacionada a fatores hidráulicos e à qualidade dos gotejadores, além da qualidade da água e do uso da fertirrigação, que pode ocasionar o entupimento dos emissores, contribuindo também para a desuniformidade de aplicação (CUNHA et al., 2013).

3.4. **Fertirrigação**

A fertirrigação é uma das principais formas de adubação parcelada, consistindo na aplicação de fertilizantes solúveis em água no sistema de irrigação ao longo do ciclo durante o manejo da água na cultura (COELHO et al. 2014).

Dentre as vantagens da utilização da fertirrigação, podem-se destacar as menores perdas dos fertilizantes por lixiviação e volatilização, além de uma maior eficiência de aplicação de fertilizantes, sendo estes pontualmente aplicados próximos ao sistema radicular das plantas em pequenas dosagens durante todo o ciclo da planta, ajustando as suas necessidades nas diferentes fases fenológicas das culturas (SOUZA et al., 2012; SILVA et al., 2015).

Segundo Oliveira e Villas Bôas (2008), o uso da fertirrigação possibilita a obtenção de bons resultados; todavia, é notada a necessidade de trabalhos que venham possibilitar a adoção correta da técnica. Também colocam que se deve calcular o tempo de lavagem do sistema de irrigação, pois é uma forma de melhorar a uniformidade de distribuição do fertilizante no campo.

A formulação da solução a ser injetada no sistema de irrigação tem importante papel na uniformidade de distribuição do fertilizante aplicado via fertirrigação; assim, a uniformidade

de aplicação dos fertilizantes pode ser influenciada pela variação da concentração da solução, na taxa de injeção planejada e na vazão do sistema (OLIVEIRA et al., 2008).

Em particular, a irrigação por gotejamento permite a aplicação de fertilizantes pela água (fertirrigação), de modo que a aplicação simultânea de água e fertilizantes pode ser satisfeita por um mesmo sistema de distribuição (JIMENEZ-BELLO et al., 2011).

Quando utilizamos a irrigação como veículo para o transporte e a distribuição de fertilizantes (fertirrigação), devem ser tomar alguns cuidados quanto ao planejamento, pois pode trazer resultados pouco satisfatórios em longo prazo, como a salinização do solo, sendo essa mais frequente em regiões mais áridas; contaminações de mananciais; corrosões nas tubulações; e também podendo causar o entupimento do sistema. Comparada a outros sistemas de fornecimento de fertilizantes às plantas, a irrigação otimiza o uso do fertilizante, pois tem boa uniformidade de aplicação (MANTOVANI et al. 2007), principalmente tratando-se de um sistema de gotejamento.

No estudo sobre a aplicação de água residuária tratada do processamento de mandioca por um sistema de irrigação por gotejamento, Hermes et al. (2015) não encontraram diferença significativa na vazão do sistema durante a aplicação de água limpa ou água residuária diluída, sendo que em apenas um dos tratamentos com a água residuária o coeficiente de uniformidade (CUD) foi classificado como bom, enquanto nos outros tratamentos a classificação foi excelente segundo Bralts (1986).

3.5. Uniformidade de aplicação

A averiguação das condições de distribuição de água do sistema de irrigação deve ser realizada periodicamente, a fim de monitorar prováveis obstruções e problemas no decorrer do tempo. A uniformidade de distribuição é fundamental na avaliação do desempenho de sistemas de irrigação, sendo que a utilização do coeficiente correto se torna fator decisivo (CUNHA et al., 2014).

O aumento do uso da água pode implicar em uma restrição de sua disponibilidade para o uso na irrigação. Além disso, a escassez de água é comum em regiões áridas e semi-áridas, que, com um aumento nos custos de produção, como, por exemplo, sementes e fertilizantes, podem inviabilizar o uso da irrigação em áreas rurais que estão em desenvolvimento. Uma das características importantes da irrigação é que deve ser realizada de maneira sustentável para garantir sua viabilidade econômica, sendo necessário o uso eficiente da água e da energia. Isso é possível através da aplicação de ferramentas de avaliação de desempenho (CÓRCOLES et al., 2012).

Frizzone et al. (2007) enfatizam que deve-se considerar que a uniformidade do teor de água do solo e a produtividade das culturas irrigadas são bastante dependentes da uniformidade com que a água é aplicada durante o processo de irrigação.

Os sistemas de irrigação por gotejamento apresentam bom desempenho hidráulico; contudo, assim como todo sistema de irrigação localizada, há necessidade que o irrigante tome alguns cuidados quanto à qualidade da água, à fertirrigação e à limpeza do sistema, com o propósito de garantir maior durabilidade do equipamento com satisfatória uniformidade de aplicação de água (NASCIMENTO et al., 2009).

A manutenção do sistema de aplicação e distribuição de água na irrigação por gotejamento torna-se fundamental para uma irrigação de qualidade e, conseqüentemente, um melhor aproveitamento dos recursos hídricos e redução dos custos (RIBEIRO et al., 2012).

Estudando um sistema de fertirrigação por gotejamento com a aplicação de ureia e águas residuária de laticínio e frigorífico, Juchen et al. (2013) encontraram coeficientes de uniformidade (CUC) entre 89 e 97%, sendo que os maiores coeficientes de variação e menores uniformidades foram encontrados para a fertirrigação com água residuária de laticínios.

3.6. Controle estatístico de qualidade

A partir da evolução da agricultura, surgiu também uma preocupação cada vez maior com a qualidade dos diversos processos realizados durante a execução de uma determinada tarefa, assim como com os produtos e equipamentos utilizados, uma vez que isso gera uma maior qualidade no produto final e pode até mesmo trazer diminuição de custos. Após o surgimento de novos modelos gerenciais, a melhoria e o monitoramento da qualidade dos processos e produtos tornou-se uma necessidade para muitos (MONTGOMERY, 2009).

O monitoramento ou controle de qualidade nos diversos processos e produtos utilizados no meio agrícola, como nos sistemas e no processo de irrigação, é realizado por meio de técnicas estatísticas (MONTGOMERY, 2009).

O controle estatístico de qualidade possibilita monitorar as características de qualidade de um sistema de irrigação, como a vazão dos emissores e a fertirrigação, assegurando sua manutenção dentro de limites preestabelecidos e indicando quando adotar ações de manutenção, por exemplo. Permite, ainda, a redução sistemática da variabilidade nas características da qualidade, num esforço de melhorar a qualidade intrínseca, a produtividade e a confiabilidade do que está sendo produzido ou fornecido (HENNING et al., 2014).

O processo de irrigação está sob controle estatístico quando as causas especiais de variação são eliminadas do processo e os pontos plotados no gráfico de controle permanecem dentro dos limites de controle (MONTGOMERY, 2009).

Andrade et al. (2017), em seu estudo sobre um sistema de micro-aspersão utilizando ferramentas de controle de qualidade, afirmam que, mesmo com as variações das avaliações do sistema de irrigação (pressão e altos valores de uniformidade), estas ferramentas podem ser consideradas próprias para realizar um bom diagnóstico da uniformidade da irrigação.

3.7. Gráficos de controle

Os gráficos de controle são algumas das ferramentas que podem ser utilizadas pelo controle estatístico de qualidade, acompanhando o desempenho de um processo a partir da definição de uma faixa de controle aceitável. O gráfico de controle é usado para analisar tendências e padrões que acontecem ao longo do tempo. Sua finalidade principal é monitorar um processo, verificando se ele está sob controle estatístico, indicando sua faixa de variação. Existem dois tipos de gráfico de controle: para variáveis e para atributos. Os gráficos de controle para atributos se referem às características de qualidade que classificam itens em conformes e não conformes, enquanto que os gráficos de controle para variáveis baseiam-se na medida das características de qualidade em uma escala contínua (HENNING et al., 2014).

Os gráficos de controle são usados no monitoramento de processos para detectar qualquer alteração que possa afetar a qualidade na saída do processo. Em muitas situações, a qualidade do processo pode ser caracterizada por uma única variável aleatória contínua, que geralmente assume uma distribuição normal. No entanto, é cada vez mais comum que os processos sejam caracterizados por mais de uma variável, geralmente correlacionadas. De fato, existem muitos setores em que múltiplas variáveis definem a qualidade do processo (FARAZ et al., 2011).

Para Souza et al. (2008), um processo está fora de controle quando um ou mais pontos situarem-se fora dos limites, sob a configuração aleatória ou quando há configurações especiais com pontos dentro ou fora dos limites de controle. Werkema (2006) entende que o processo está sob controle estatístico quando todos os pontos traçados no gráfico estão dentro dos dois limites de controle e se a disposição dos pontos é aleatória em torno da linha média (LM).

A fim de melhor aproveitamento dos recursos hídricos empregados na irrigação de forma a promover o desenvolvimento sustentável, causando o mínimo de impactos possível, a utilização de ferramentas do controle estatístico de qualidade como gráfico de controle e índices de capacidade de processo se configuram como uma ferramenta útil no monitoramento dos sistemas de irrigação (MERCANTE et al., 2014).

3.8. Capacidade do processo

O índice de Capacidade de um Processo é um parâmetro adimensional que indiretamente mede o quanto um processo consegue atender às especificações. Assim, quanto maior é seu valor, melhor o processo atende às exigências (MONTGOMERY, 2009). O estudo da capacidade do processo reflete a aptidão que o processo tem de manufaturar produtos cuja variação inerente esteja dentro da faixa de tolerância especificada no projeto do produto (BORGES et al., 2008).

Conforme Justi et al. (2010), o índice de capacidade do processo, quando usado para avaliação de sistemas de irrigação, tem comportamento diretamente proporcional ao aumento da uniformidade de distribuição e o índice de capacidade do processo.

Segundo Klein et al. (2015), o índice de capacidade do processo de fertirrigação determina se esse processo é adequado em termos de qualidade. Afirmam ainda que um alto coeficiente de uniformidade e uma baixa variabilidade de distribuição contribuem para aumentar o valor deste índice, que é responsável pela adequação do processo de irrigação ou fertirrigação através do pré-estabelecimento dos critérios de uniformidade.

Em seu estudo sobre um sistema de gotejamento, Juchen et al. (2013) encontraram um índice de capacidade do processo de 2,87, indicando que a metodologia de controle estatístico de processos mostrou ser um método adequado para avaliar a qualidade do sistema de fertirrigação utilizado.

Hermes et al. (2014), realizando um estudo de regressão, afirmam que o aumento do índice de capacidade de processo é diretamente proporcional ao aumento da uniformidade de distribuição e concluem também que o índice de capacidade de processo mostra-se uma ferramenta muito útil para realizar diagnósticos na qualidade da fertirrigação, permitindo a avaliação da sua capacidade de manter níveis toleráveis de uniformidade.

Ao analisar a uniformidade da irrigação em particular, deve-se levar em consideração o cálculo do índice de capacidade de processo por limite unilateral, uma vez que o interesse nesse caso está em encontrar e controlar apenas os eventos em que a uniformidade está abaixo do valor considerado como aceitável, pois quanto maior a uniformidade do sistema, melhores serão os resultados deste processo. Assim, para a análise deste processo, o ideal é que seja utilizado o índice de capacidade de processo pelo limite inferior (CPI) como referência.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e características da área

O sistema de irrigação por gotejamento foi instalado em uma pequena horta familiar na área urbana do município de Cascavel, PR. A pequena horta tem como objetivo a produção de verduras e condimentos, apenas para o abastecimento familiar, visando uma produção livre de defensivos químicos. O terreno possui uma área de 4,6 x 13 m, totalizando 59,8 m², com coordenadas geográficas aproximadas: Latitude 24° 58' 08" Sul e Longitude 53° 28' 34" Oeste, com altitude de 708 m.

4.2. Características do sistema de irrigação

O sistema foi instalado no local de acordo com o esquema apresentado na Figura 1, sendo que a posição de todos os itens é correspondente à representação destes.

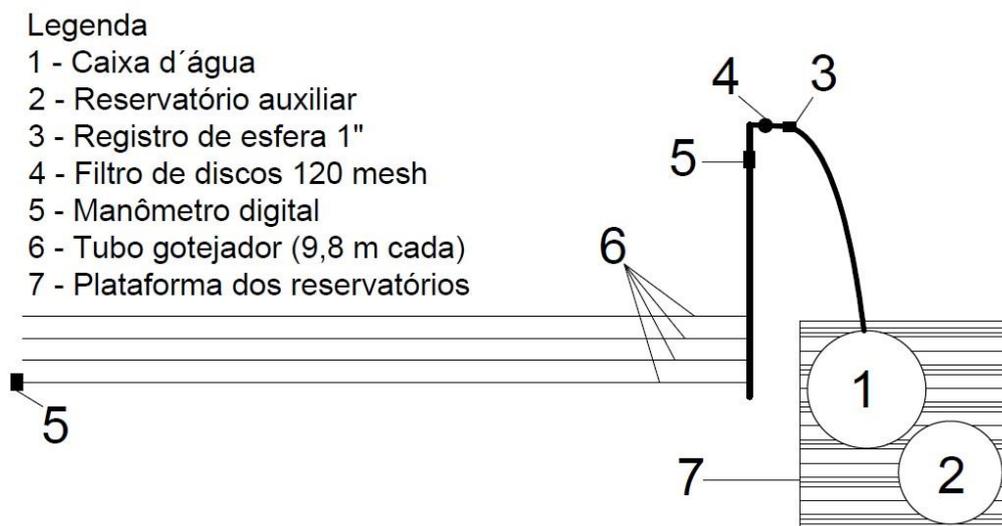


Figura 1 Esquema de instalação do sistema de irrigação por gotejamento.

O sistema de irrigação por gotejamento instalado no local é abastecido por caixa d'água com capacidade de 100 L, responsável também pela carga hidráulica do sistema devido a sua altura de instalação, que neste experimento foi de 1,20, 1,40, 1,60 e 1,80 metros.



Figura 2 Variação de altura da caixa d'água (1,20, 1,40, 1,60 e 1,80 m).
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para garantir que o nível de água na caixa permanecesse sempre o mesmo, a alimentação desta foi feita a partir de um reservatório posicionado acima da caixa que alimentava o sistema, conforme a Figura 3.



Figura 3 Alimentação da caixa d'água.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram instaladas 4 linhas laterais (tubos gotejadores) com 9,8 m cada, espaçadas a cada 0,3 m, totalizando 39,2 m de tubo gotejador, sendo que estes se encontram sobre a superfície do solo.

A alimentação dos tubos gotejadores (linha de derivação) é feita por tubo de polietileno de 1 pol. O cabeçal de controle é composto apenas por um registro de esfera e um filtro de disco de 120 mesh, visto que o sistema possui uma pequena dimensão.



Figura 4 Cabeçal de controle (Registro de esfera e Filtro de discos).
Fonte: Elaborado pelo autor.

O tubo gotejador utilizado é da marca Siplast™, modelo P1, com espaçamento entre gotejadores de 0,2 m, vazão nominal de 2,10 L.h⁻¹ a 1 bar, diâmetro nominal de 16 mm, paredes com espessura de 0,20 mm e pressão máxima de trabalho de 0,8 bar, segundo o fabricante.

A equação de vazão do emissor fornecida pelo fabricante é a seguinte:

$$Q = 0,68 * H^{0,52} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

Q - Vazão do emissor (L.h⁻¹);

H - Pressão de trabalho.

Como a menor vazão média dos gotejadores foi de 0,62 L/h para a altura manométrica de 1,20 mca, e a maior vazão média dos gotejadores foi de 0,84L/h para 1,80 mca, sendo que o sistema possuía 200 gotejadores em funcionamento, a menor vazão atingida pelo sistema foi de 124 L/h para a altura manométrica de 1,20 mca, e a maior vazão foi de 168 L/h para a altura manométrica de 1,80 mca.

4.3. Irrigação

Na horta em que o presente trabalho foi realizado não havia água disponibilizada pela companhia responsável pelo abastecimento da cidade; logo, a água utilizada neste trabalho foi proveniente de uma fonte natural (sem tratamento) localizada a 35 metros do local onde o sistema de irrigação foi instalado.



Figura 5 Fonte de água utilizada.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Um das vantagens do sistema de irrigação por gotejamento é o fato de que a aplicação de água ou fertilizante ocorre diretamente no solo, o que elimina possíveis riscos de contaminação de folhas (verduras) e frutos devido ao uso de fontes duvidosas.

A caracterização da água utilizada neste trabalho está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 Análise Físico-químico e microbiológico da água utilizada

Parâmetro	VMP	Resultados
Cloro residual livre	0,2 - 2,0 mg/L	0,0 mg/L
Cor	0,0 - 15,0 uH	4,0 uH
pH	6,0 - 9,5	5,71
Turbidez	0,0 - 5,0 NTU	0,66 NTU
Coliformes termotolerantes P.A	Ausência	Presença
Coliformes totais P.A	Ausência	Presença

*VMP – Valores máximos permissíveis para potabilidade.

Fonte: Laborsan.

4.4. Fertirrigação

Atualmente, com o aumento da preocupação de todos os meios produtivos com os aspectos ambientais, surgem novas opções de produtos no mercado, provenientes do reaproveitamento ou tratamento dos resíduos gerados durante estes processos.

O biofertilizante utilizado foi gerado a partir do lodo de flotor proveniente do abate de frangos de corte, batata-doce (*Ipomoea batatas (L.) Lam.*) e inóculo.

O lodo de flotor é um dos resíduos gerados em maior quantidade nos abatedouros de aves. Esse material resulta do tratamento físico das águas residuárias provenientes das diversas etapas do abate (sangria, depenamento por escalda, evisceração e preparação das carcaças), denominada “linha vermelha”. Os flotores são utilizados para separar os sólidos em suspensão do efluente líquido por meio de microbolhas que arrastam o material particulado até a superfície, onde são concentrados e removidos por raspadores mecânicos. O material removido segue até uma centrífuga tridecanter que o fraciona em água, óleo e

lodo. O lodo utilizado para produzir o biofertilizante foi concedido pela usina de compostagem Agregare, localizada no município de Cascavel, Paraná. A usina recebe este resíduo de cooperativas que realizam o abate e o processamento da carne de frango na região de Cascavel.



Figura 6 Lodo de flotador do abate de frangos.
Fonte: Agregare.

A batata-doce foi adquirida na Central de Abastecimento (CEASA) do município de Cascavel, Paraná, quando estas se encontravam impróprias para a comercialização por não atenderem a padrões estéticos de qualidade de mercado. A batata-doce foi triturada antes de ser encaminhada à codigestão anaeróbia.

Como inóculo e diluente, foi utilizado efluente líquido (biofertilizante) de um biodigestor anaeróbio de uma unidade de produção de leite, localizada no município de Céu Azul, Paraná. Além de substituir a água limpa e inocular microrganismos anaeróbios, o uso do biofertilizante também foi uma estratégia para fornecer alcalinidade aos reatores. O biodigestor é do tipo lagoa coberta com agitação mecânica, abastecido em sistema contínuo e recebe as dejeções de vacas leiteiras, cuja alimentação consiste em uma mistura de silagem e concentrado. O biofertilizante coletado foi peneirado em uma malha de 3 mm para reter o material fibroso remanescente.



Figura 7 Inoculante
Fonte: Agregare.

Esses materiais abasteceram reatores operados em regime semicontínuo com volume útil de 60 L. A concentração de sólidos utilizada no abastecimento foi de 4,5%. O tempo de retenção hidráulica do material dentro do reator foi dimensionado para 25 dias e a temperatura foi mantida na faixa mesofílica (35 °C).

Para o melhor desempenho do sistema de irrigação por gotejamento durante a aplicação do biofertilizante, este foi diluído numa proporção de 50:1, pois o biofertilizante, apesar de ser em sua maior parte líquido, apresentou uma quantidade considerável de sólidos diante de um sistema de gotejamento, o que causaria o entupimento dos emissores.

Amostras do biofertilizante já diluído (50:1) foram coletadas durante as avaliações para realizar uma breve análise sobre as suas características; os sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) foram determinados pelos métodos gravimétricos, baseados na secagem e na ignição da amostra (APHA, 2005). As leituras de pH e CE foram realizadas com um pHmetro (TECNAL®, modelo TEC-3MP) e um condutímetro (MS Tecnozon®, modelo mCA 150) de bancada.

O Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) foi determinado por meio da digestão das amostras com ácido sulfúrico, seguida da destilação, sendo utilizado o destilador de Kjeldahl, e titulação com H₂SO₄ 0,0025 mol (APHA, 2005).

A determinação do P e do K foi realizada mediante a digestão das amostras em solução nítrico-perclórica (3:1) com fonte externa de calor, seguida de diluição e filtração. O P foi detectado via absorvância no comprimento de onda 725 nm por meio do espectrofotômetro UV-VIS Hach®. O K foi quantificado em fotômetro de chama (MALAVOLTA et al., 1997).

Os resultados das análises feitas sobre o biofertilizante estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Caracterização do biofertilizante diluído (50:1)

Parâmetros	Unidades	Valor médio	DP
Sólidos totais	%	0,03	± 0,004
Sólidos voláteis	%	49,5	± 8,07
Sólidos fixos	%	50,5	± 8,07
pH	unidade de pH	6,84	± 0,03
Condutividade Elétrica	$\mu\text{S cm}^{-1}$	395,60	± 6,79
Nitrogênio total kjeldahl	mg L^{-1}	50,82	± 2,55
Fósforo total	mg L^{-1}	0,98	± 0,14
Potássio total	mg L^{-1}	132,00	± 6,71

Para realizar a fertirrigação, a solução foi preparada na caixa d'água que alimentava o sistema, e uma solução de mesma proporção foi preparada no reservatório que alimentava a caixa d'água, com o propósito de manter a carga hidráulica do sistema constante.



Figura 8 Biofertilizante diluído 50:1
Fonte: Elaborado pelo autor.

A verificação da correta distribuição do biofertilizante pelo sistema foi feita a partir da medição da condutividade elétrica da solução aplicada, o que permite medir indiretamente a concentração de sais. A condutividade elétrica foi medida por um condutímetro da marca Hanna, modelo Hi98311.

4.5. Análise de Regressão

Os tratamentos aplicados foram as diferentes cargas hidráulicas (pressões) às quais o sistema foi submetido, sendo estes aplicados em 4 níveis: 1,20, 1,40, 1,60 e 1,80 mca. As diferentes cargas hidráulicas foram proporcionadas a partir da mudança de altura da caixa d'água que alimentava o sistema, sendo que a pressurização deste era realizada por gravidade, proporcionando economia de energia e de custos com equipamentos.

Para cada tratamento foram realizadas 30 avaliações do sistema (ensaios), sendo que inicialmente foram realizados os ensaios da irrigação (água) em todas as cargas e, posteriormente, foram realizados os ensaios da fertirrigação (biofertilizante diluído) em todas as cargas hidráulicas alturas propostas.

4.6. Avaliação do sistema

4.6.1. Coleta das vazões

Para realizar a coleta e posteriormente a avaliação da uniformidade das vazões foi utilizado o método proposto por Keller e Karmeli (1975), em que são coletadas as vazões em 16 pontos (gotejadores) dentro do sistema de irrigação. As linhas laterais para a coleta são selecionadas a partir de seu posicionamento de instalação na linha principal, sendo estas a primeira, localizada a $1/3$ e a $2/3$ do comprimento da linha principal, e a última, totalizando 4 linhas de coleta. Em cada linha selecionada, devem ser avaliados o primeiro gotejador, os localizados a $1/3$ e $2/3$ do comprimento da linha e o último gotejador.

Ao avaliar um sistema de irrigação por gotejamento com diferentes pressões e metodologias de coleta de vazões, Borssoi et al. (2012) obtiveram em seus resultados classificações de uniformidade mais rigorosas ao utilizar o método proposto por Keller e Karmeli (1975).

Na Figura 9 estão apresentados os respectivos pontos onde foram coletadas as vazões dos emissores.

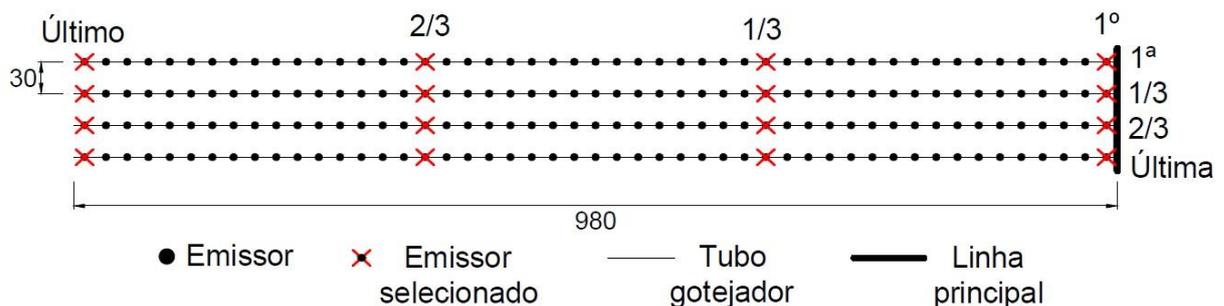


Figura 9 Método de avaliação da uniformidade de acordo com Keller e Karmeli (1975).

O tempo de coleta do volume emitido pelos gotejadores foi estipulado em 3 min, proporcionando a medida direta da vazão (volume/tempo). O tempo de coleta de 3 min foi mais conveniente para a realização deste trabalho, devido à dificuldade de abastecimento do sistema, uma vez que esse processo era todo realizado manualmente.

Para aplicação da fertirrigação, o sistema foi esvaziado antes da aplicação, e para garantir que o biofertilizante estivesse distribuído corretamente antes do início dos ensaios, após o sistema entrar em funcionamento, o final das linhas laterais era aberto um a um, até que a vazão de biofertilizante fosse constante.

Para coletar a vazão dos emissores selecionados foram elaboradas 4 calhas de madeira, com o objetivo de facilitar a coleta, pois assim era feita a coleta das vazões de 4 emissores simultaneamente. Para a realização dos ensaios, as calhas eram posicionadas conforme a metodologia utilizada, agilizando todo o processo de coleta. A calha ainda possuía a função de proteger os coletores (copos de isopor) da ação do vento. Para realizar a coleta

dos 4 pontos simultaneamente, os coletores foram posicionados em placas de isopor, que eram movidas pela parte interna das calhas de madeira, que serviam como guia.



Figura 10 Coleta das vazões
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

4.6.2. Uniformidade de irrigação

Para determinar a uniformidade de aplicação de água e fertilizante do sistema em estudo serão utilizados os Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD) – Equação 2, de Christiansen (CUC) – Equação 3, Estatístico (CUE) – Equação 4, além do Coeficiente de Variação (CV) – Equação 5, de acordo com suas respectivas classificações apresentadas nas Tabelas 3, 4, 5 e 6.

$$\text{CUD} = \frac{\bar{Q}_{25}}{\bar{Q}} * 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

CUD - Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (%);

\bar{Q}_{25} - Média de 25% dos menores valores de vazões coletadas (L.h⁻¹);

\bar{Q} - Vazão média dos gotejadores (L.h⁻¹).

Tabela 3 Classificação de CUD de acordo com Mantovani (2001)

CUD (%)	Classificação
> 84	Excelente
68 – 84	Bom
52 – 68	Razoável
36 – 52	Ruim
< 36	Inaceitável

$$\text{CUC} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - \bar{Q}|}{n\bar{Q}} \right) 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que:

CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%);

Q_i - Vazão de cada gotejador ($L \cdot h^{-1}$);

\bar{Q} - Vazão média dos gotejadores ($L \cdot h^{-1}$);

n - Número de gotejadores.

Tabela 4 Classificação do CUC segundo Keller & Bliesner (2009)

Classificação	CUC (%)
Excelente	> 90
Bom	85 – 90
Razoável	78 – 85
Inaceitável	< 78

$$\text{CUE} = \left(1 - \sqrt{\frac{\sum (Q_i - \bar{Q})^2}{(n-1)\bar{Q}^2}} \right) 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

CUE - Coeficiente de Uniformidade Estatístico (%);

Q_i - Vazão de cada gotejador ($L \cdot h^{-1}$);

\bar{Q} - Vazão média dos gotejadores ($L \cdot h^{-1}$);

n - Número de gotejadores.

Tabela 5 Classificação do CUE segundo Mantovani (2001).

Classificação	CUE (%)
Excelente	> 90
Bom	80 – 90
Razoável	70 – 80
Ruim	60 – 70
Inaceitável	< 60

$$CV = \frac{[(\sum Qi^2 - n\bar{Q}^2) * (n-1)^{-1}]^{\frac{1}{2}}}{\bar{Q}} \quad \text{Eq. (5)}$$

Em que:

CV - Coeficiente de variação (%);

Q_i - Vazão de cada gotejador, (L.h⁻¹);

\bar{Q} - Vazão média dos gotejadores, (L.h⁻¹);

n - Número de gotejadores.

Tabela 6 Classificação do CV segundo Pimentel Gomes (2000)

Classificação	CV (%)
Baixo	< 10
Médio	10 – 20
Elevado	20 – 30
Muito alto	> 30

4.7. Análise de dados

4.7.1. Análise descritiva e inferencial

Para realizar uma análise inicial sobre os dados obtidos, foram calculadas as seguintes medidas para cada um dos parâmetros estudados (vazão, CUD, CUC, CUE, CV): média, desvio padrão, variância, valores de assimetria e curtose e valores de máximo e mínimo para cada um dos tratamentos aplicados.

Além disso, também foram realizados testes de normalidade, análises de regressão e a confecção de mapas temáticos de superfície, representando visualmente a uniformidade de aplicação do sistema. Para as análises estatísticas e a confecção dos mapas, foram utilizados os programas Minitab (Licensing 16.1.1-Language English) e Surfer (Licensing 10.0.500-Language English).

4.7.2. Controle estatístico de qualidade

As análises do processo de controle estatístico de qualidade da irrigação por gotejamento foram realizadas conforme o trabalho de Frigo et al. (2016), em que foram utilizados 3 modelos de gráficos de controle para medidas individuais, conhecidos como gráficos de Shewhart individual, gráficos de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP), também conhecido como EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) e gráficos de soma cumulativa (CUSUM). Considerando que o número de amostras é grande ($n > 25$), pelo Teorema do Limite Central assume-se normalidade dos dados, requisito necessário para aplicação das técnicas de gráficos de controle.

O gráfico de Controle de Shewhart individual consiste em uma linha central que representa a média da característica de qualidade desejada, uma linha superior do limite de controle superior (LCS) e outra linha inferior do limite de controle inferior (LCI). Pontos que representam o andamento do processo são apresentados entre essas linhas quando este 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 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 é muito utilizado para detectar pequenas variações no comportamento dos dados, fornecendo uma estimativa da nova média do processo, a qual poderá mudar a característica da qualidade desejada. Este gráfico acumula informações sucessivas, ponderando as amostras e atribuindo maior peso para as informações mais recentes.

O gráfico de controle MMEP pode ser construído pela plotagem de Z_i versus o número da amostra i (ou tempo). O gráfico da média móvel exponencialmente ponderada pode ser definido pela Equação 8.

$$Z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)Z_{i-1} \quad \text{Eq. (8)}$$

Em que:

$0 < \lambda \leq 1$;

$Z_i = \hat{\mu}_0 = \bar{x}$ (valor alvo ou valor médio em controle de x_i).

A variância da variável Z é dada pela Equação 9.

$$\sigma_{Z_i}^2 = \sigma^2 \left(\frac{\lambda}{2-\lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^{2i}] \quad \text{Eq. (9)}$$

Em que:

σ - desvio padrão dos dados em relação à média;

λ - peso dado a cada amostra;

i - ordem da amostra utilizada.

Os limites para o gráfico de controle MMEP são dados pelas Equações 10 e 11.

$$LSC = \bar{x} + L\sigma \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right) [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$\text{Linha central} = \hat{\mu}_0 = \bar{x}$$

$$LIC = \bar{x} - L\sigma \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right) [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad \text{Eq. (11)}$$

Em que:

LIC - Limite inferior de controle;

LSC - Limite superior de controle;

\bar{x} - Média dos dados;

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

λ - peso dado a cada amostra;

i - ordem da amostra utilizada.

Os gráficos de controle CUSUM guardam informações acumuladas de toda a sequência de pontos, e por isso tornam-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).

No gráfico de controle CUSUM, os desvios em relação à média são acumulados ao longo do tempo, gerando uma soma cumulativa obtida conforme a Equação 12.

$$C_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \mu_0) \quad \text{Eq. (12)}$$

Em que:

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

C_i - soma cumulativa até a i -ésima amostra.

O gráfico CUSUM tabular acumula desvios que estão abaixo ou acima do valor alvo, com estatísticas C_i^- e C_i^+ , respectivamente. Estas são chamadas CUSUM superior C_i^+ e CUSUM inferior C_i^- , as quais são expressas pelas Equações 13 e 14.

$$C_i^+ = \text{máx}[0; x_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+] \quad \text{Eq. (13)}$$

$$C_i^- = \text{máx}[0; (\mu_0 + K) - x_i + C_{i-1}^-] \quad \text{Eq. (14)}$$

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 monitoramento de médias, tanto na prática quanto na literatura, é comum a utilização de $K = 0,5$; isto significa que está deixando de se preocupar com variações de meio desvio padrão no processo. Este valor K permite o planejamento do gráfico para detectar alterações específicas (MONTGOMERY, 2009).

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

4.7.3. Índice de capacidade do processo

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

O índice de capacidade do processo é expresso pela Equação 15:

$$C_p = \frac{LSC-LIC}{6\sigma} \quad \text{Eq. (15)}$$

Em que:

C_p - Índice de capacidade do processo;

LSC - Limite superior de controle;

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 novos, a classificação do processo se faz da seguinte forma: $C_p \geq 1,45$, o processo é capaz ou adequado, segundo as especificações; $1 \leq C_p < 1,45$, o processo é aceitável; $C_p < 1$, o processo é incapaz ou inadequado.

Para processos “usados”, a classificação do processo possui uma pequena diferença quando comparada a processos novos, sendo realizada da seguinte forma: $C_p \geq 1,25$, o processo é capaz ou adequado, segundo as especificações; $1 \leq C_p < 1,25$, o processo é aceitável; $C_p < 1$, o processo é incapaz ou inadequado (MONTGOMERY, 2009).

O índice de capacidade de processo pelo limite inferior foi utilizado pois o maior interesse de controle deste trabalho foi unilateral, ou seja, o foco maior foi controlar ou

monitorar os eventos em que o sistema de irrigação por gotejamento apresentou baixa uniformidade de aplicação.

O C_{P_i} (Capacidade do Processo pelo Limite inferior) é dado pela Equação 16.

$$C_{P_i} = \frac{\bar{x} - LIC}{3\sigma} \quad \text{Eq. (16)}$$

Em que:

C_{P_i} - 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 novos e especificações unilaterais, a classificação do processo se faz da seguinte forma: $C_{P_i} \geq 1,60$, o processo é capaz ou adequado, segundo as especificações; $1 \leq C_{P_i} < 1,60$, o processo é aceitável; $C_{P_i} < 1$, o processo é incapaz ou inadequado. A definição de C_p assume implicitamente que o processo está centrado no valor nominal da especificação. Se o processo não estiver centrado, sua capacidade real será menor do que a indicada por C_{P_i} .

Para processos “usados” com especificações unilaterais, a classificação do processo possui uma pequena diferença quando comparada a processos novos, sendo realizada da seguinte forma: $C_{P_i} \geq 1,33$, o processo é capaz ou adequado segundo as especificações; $1 \leq C_{P_i} < 1,33$, o processo é aceitável; $C_{P_i} < 1$, o processo é incapaz ou inadequado (MONTGOMERY, 2009).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Irrigação

As análises e os resultados apresentados a seguir foram realizados a partir dos dados coletados durante as avaliações do sistema de gotejamento durante as irrigações (apenas água), para as cargas hidráulicas de 1,20, 1,40, 1,60 e 1,80 mca.

Os dados utilizados para tais análises foram as vazões (L/h) dos emissores (gotejadores), coletados a partir do funcionamento do sistema e de acordo com a metodologia proposta anteriormente.

5.1.1. Estatística descritiva

A Tabela 7 apresenta os resultados da estatística descritiva a partir dos 30 ensaios feitos para cada carga hidráulica de irrigação.

Tabela 7 Estatística descritiva para irrigação

Pressão (mca)	Média (L/h)	DP	CV (%)	Curtose	Assimetria	Mín (L/h)	Máx (L/h)
1,20	0,629	0,011	2,48	-0,782	-0,195	0,608	0,648
1,40	0,751	0,005	2,13	0,286	-0,478	0,740	0,760
1,60	0,804	0,005	1,97	-0,303	0,308	0,794	0,814
1,80	0,853	0,006	1,52	-0,132	0,893	0,846	0,866

A partir da análise dos dados da Tabela 7, observa-se que quanto maior a pressão de funcionamento do sistema, maior a vazão deste, sendo que a menor vazão média foi de 0,629 L/h para a pressão de 1,20 mca e a maior vazão média foi de 0,853 L/h para a pressão de 1,80 mca. A menor vazão encontrada para a irrigação foi de 0,608 L/h, na pressão de 1,20 mca, e a maior vazão encontrada foi de 0,866 L/h, para a pressão de 1,80 mca.

As vazões do sistema ainda demonstraram pouca variação, sendo que o desvio padrão foi pequeno em todas as pressões e o coeficiente de variação também foi classificado como baixo, de acordo com Pimentel Gomes (2000), pois não apresentou valores acima de 10%.

Os valores de assimetria encontram-se entre -1 e 1, o que indica uma distribuição dos dados razoavelmente simétrica, com pequenos desvios, observando-se ainda que os valores de assimetria das pressões de 1,20 e 1,40 mca são negativos, o que indica um desvio dos dados à esquerda, enquanto para as pressões de 1,60 e 1,80 mca os valores são positivos, indicando desvio dos dados à direita, ou seja, a partir de 1,60 mca existem mais valores acima da média.

5.1.2. Relação vazão x pressão

Para conhecer qual a relação entre a vazão dos emissores (gotejadores) e a carga hidráulica (pressão) do sistema, foi realizada uma análise de regressão da vazão em função da pressão. Foram analisados os métodos de regressão linear e regressão quadrática, na intenção de verificar qual dos métodos possui um melhor ajuste ao comportamento do sistema.

Após a referida análise, o método de regressão quadrática foi o que teve maior ajuste ao comportamento dos dados, explicando 99,2% da variação da vazão dos emissores do sistema, conforme apresentado na Figura 11.

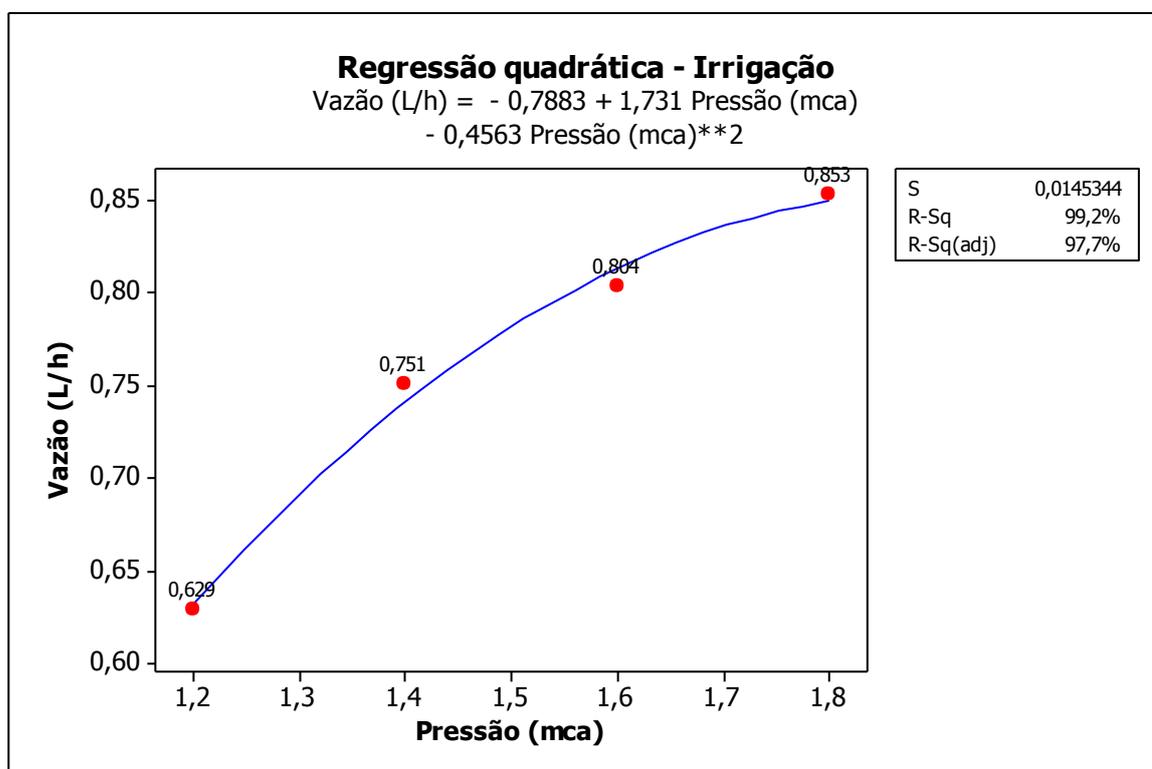


Figura 11 Análise de regressão para irrigação (vazão x pressão).

A análise de regressão ainda apresenta a equação da vazão (L/h) em função da pressão (mca), lembrando que, como o ajuste da regressão quadrática foi maior que o da linear, a equação fornecida é a que possui maior exatidão de acordo com os dados.

Zocoler, et al. (2015), em seus resultados nos ensaios de vazão em função da pressão, para o gotejador novo, adequaram-se ao modelo exponencial com R2 de 98%, com o aumento da pressão, a vazão se aproximou da vazão nominal informada pelo fabricante.

5.1.3. Uniformidade de aplicação

Os coeficientes de uniformidade de irrigação e de variação apresentados na Tabela 8 são resultados das 30 avaliações realizadas, sendo que a média é calculada a partir da uniformidade média das 30 avaliações, e os valores de máximo e mínimo referem-se às mesmas 30 avaliações para cada carga hidráulica.

Tabela 8 Coeficientes de uniformidade para irrigação

Parâmetro	CUD (%)	CUC (%)	CUE (%)	CV (%)	Pressão (mca)
Média	97,29	98,02	97,52	2,48	
Mínimo	95,84	97,25	96,66	1,64	1,20
Máximo	98,56	98,53	98,36	3,34	
Média	97,64	98,28	97,87	2,13	
Mínimo	96,51	97,69	97,26	1,69	1,40
Máximo	98,50	98,99	98,31	2,74	
Média	97,63	98,51	98,03	1,97	
Mínimo	96,23	98,11	97,02	1,43	1,60
Máximo	98,76	98,90	98,57	2,98	
Média	98,51	98,72	98,48	1,52	
Mínimo	97,39	98,39	97,95	1,13	1,80
Máximo	99,26	99,18	98,87	2,05	

A uniformidade de irrigação do sistema de gotejamento em estudo foi classificada como excelente de acordo com os 3 coeficientes calculados e em todas as cargas hidráulicas, sendo que até mesmo os valores mínimos dos coeficientes (pior uniformidade) foram classificados como excelentes.

Isso ainda é afirmado pelo baixo coeficiente de variação, que apresentou um comportamento relacionado ao aumento da carga hidráulica. Como é possível se observar a partir da Tabela 8, quanto maior a carga hidráulica do sistema, menor foi o coeficiente de variação. Posteriormente foi realizada uma análise de regressão para saber qual o comportamento dos coeficientes de uniformidade e de variação em função da variação da carga hidráulica do sistema.

5.1.4. Mapas temáticos de contorno

Para que se possa ter uma melhor visualização da uniformidade de irrigação do sistema, foram confeccionados mapas de contorno, utilizando-se como método de interpolação o inverso da distância. As vazões escolhidas para a confecção do mapa foram de acordo com a avaliação que apresentou o maior coeficiente de uniformidade para cada carga hidráulica.

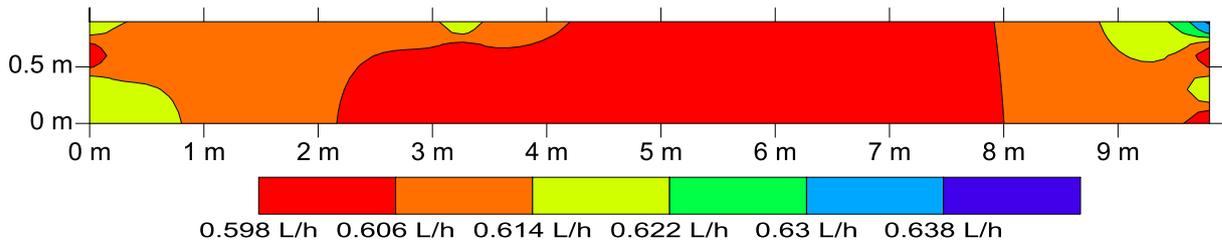


Figura 12 Mapa de contorno da vazão para irrigação a 1,20 mca.

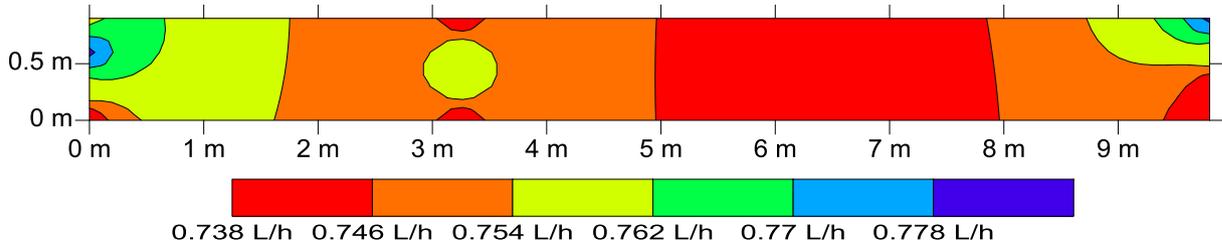


Figura 13 Mapa de contorno da vazão para irrigação a 1,40 mca.

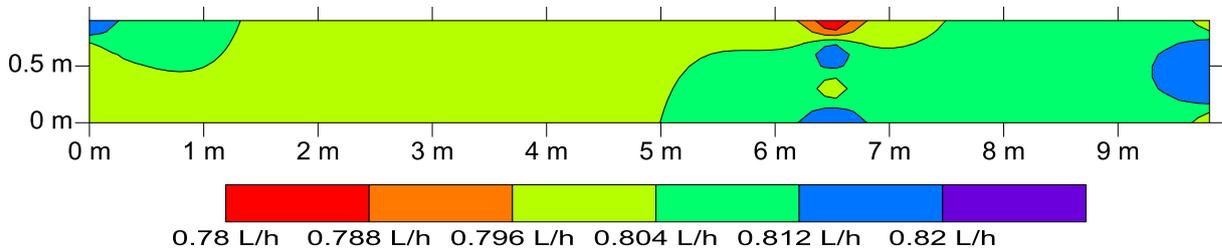


Figura 14 Mapa de contorno da vazão para irrigação a 1,60 mca.

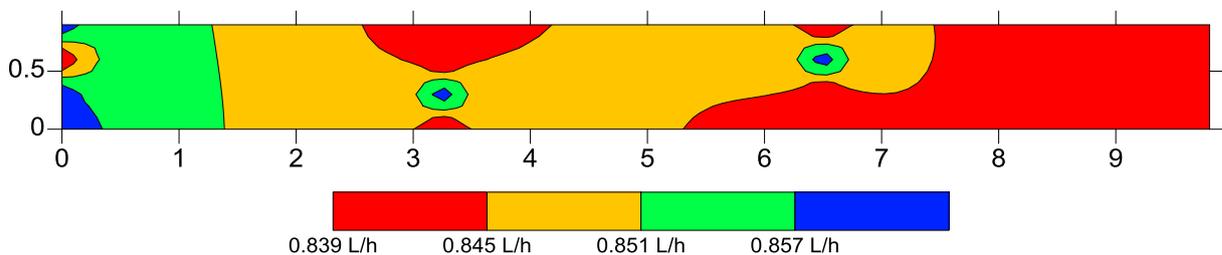


Figura 15 Mapa de contorno da vazão para irrigação a 1,80 mca.

As variações de vazão pelo sistema foram mínimas, indicadas pelos coeficientes de uniformidade e coeficiente de variação, sendo possível observar que em todos os mapas (todas as cargas hidráulicas) as maiores variações ocorreram nas extremidades do sistema, tanto no início quanto no fim dos tubos gotejadores. Vale ainda ressaltar que o método de interpolação pelo inverso da distância possui uma característica de evidenciar os pontos com valores diferenciados, como é possível observar nos mapas acima.

5.1.5. Relação uniformidade x pressão

Para conhecer o verdadeiro comportamento dos coeficientes de uniformidade e de variação de acordo com a variação da carga hidráulica do sistema, foi realizada uma análise de regressão apresentada na Figura 16.

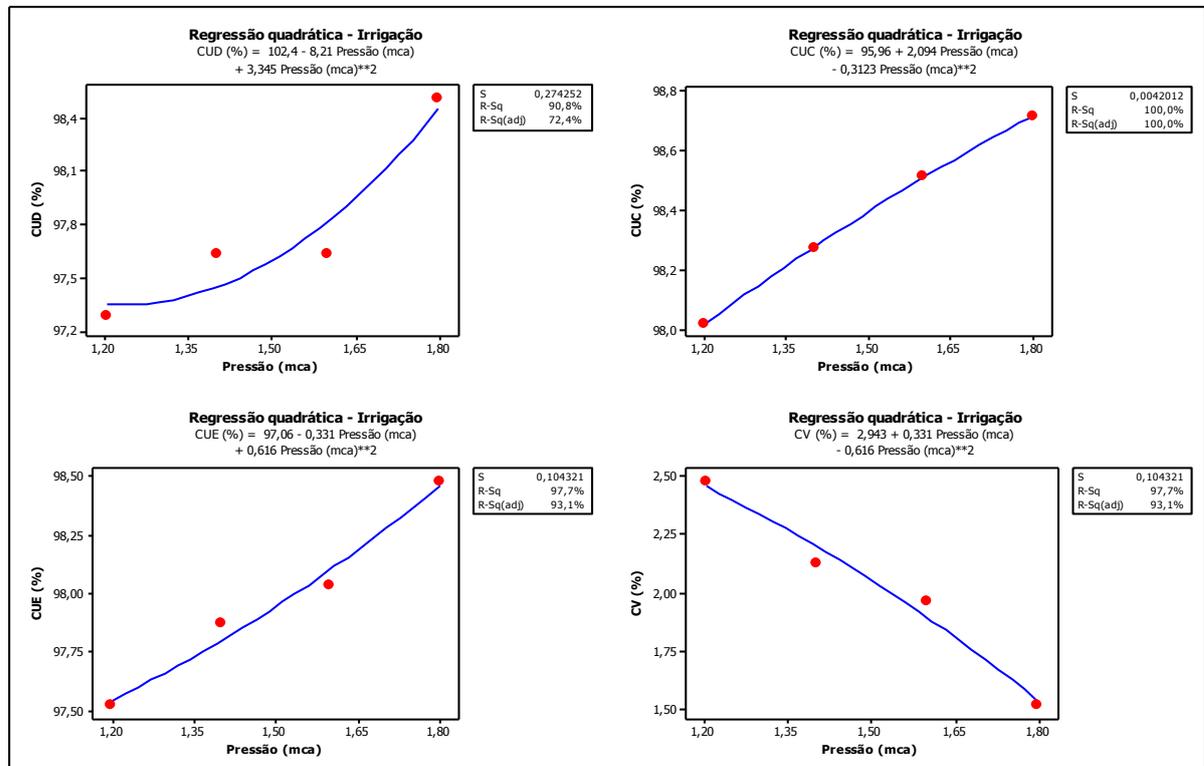


Figura 16 Análise de regressão para irrigação (uniformidade x pressão).

Para todos os coeficientes de uniformidade e para o coeficiente de variação, a análise que teve melhor desempenho foi a regressão quadrática, pois o coeficiente de determinação foi considerado excelente em todos os casos, sendo este de 90,8% para o CUD, 100% para CUC, 97,7% para CUE e 97,7% para o CV.

5.1.6. Gráficos de controle

Com o objetivo de comparar a ação e a rigorosidade de cada tipo de gráfico de controle proposto neste trabalho, estes foram agrupados de modo que cada coeficiente estudado (CUD, CUC, CUE e CV) apresentasse os três gráficos: gráfico de controle de Shewhart individual, gráfico de controle MMEP (média móvel exponencialmente ponderada) e gráfico de controle CUSUM. Assim, é possível realizar a comparação entre os três gráficos, observando qual o mais rigoroso como ferramenta para o controle de qualidade.

Para a confecção do gráfico CUSUM, o valor alvo utilizado foi a média de cada coeficiente, pois os valores plotados são os desvios de cada ponto em relação à média.

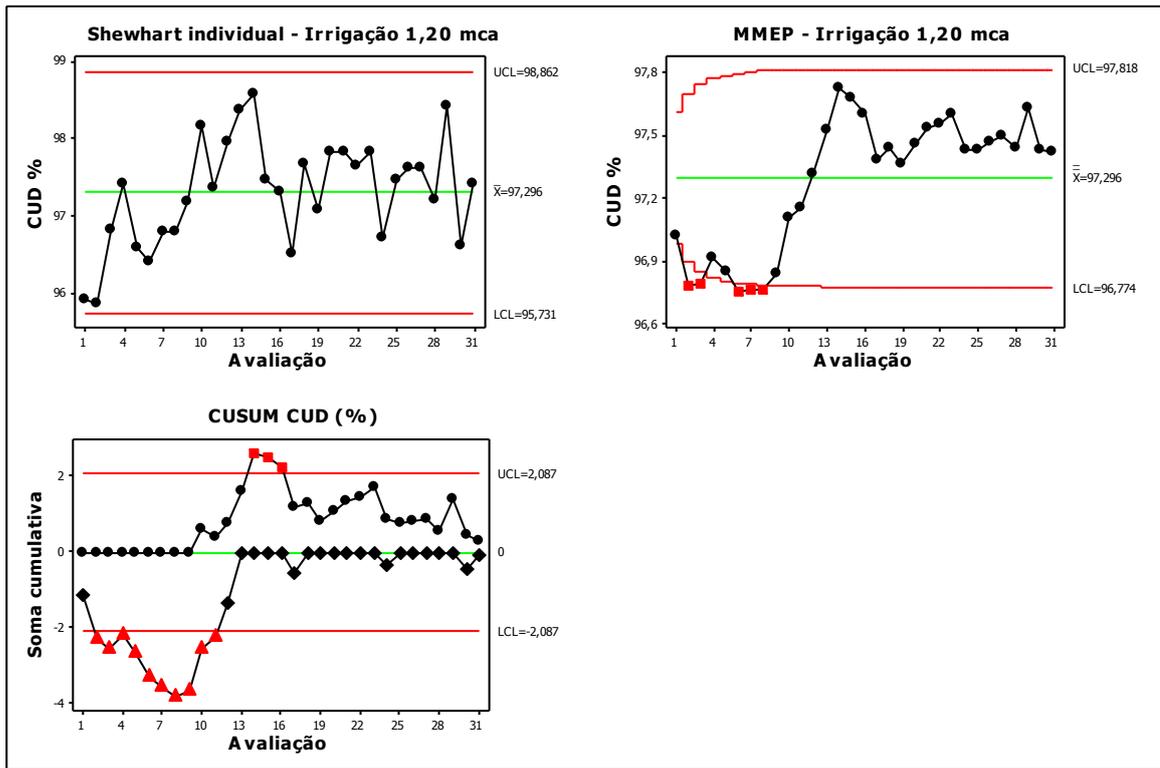


Figura 17 Gráficos de controle do CUD da irrigação a 1,20 mca.

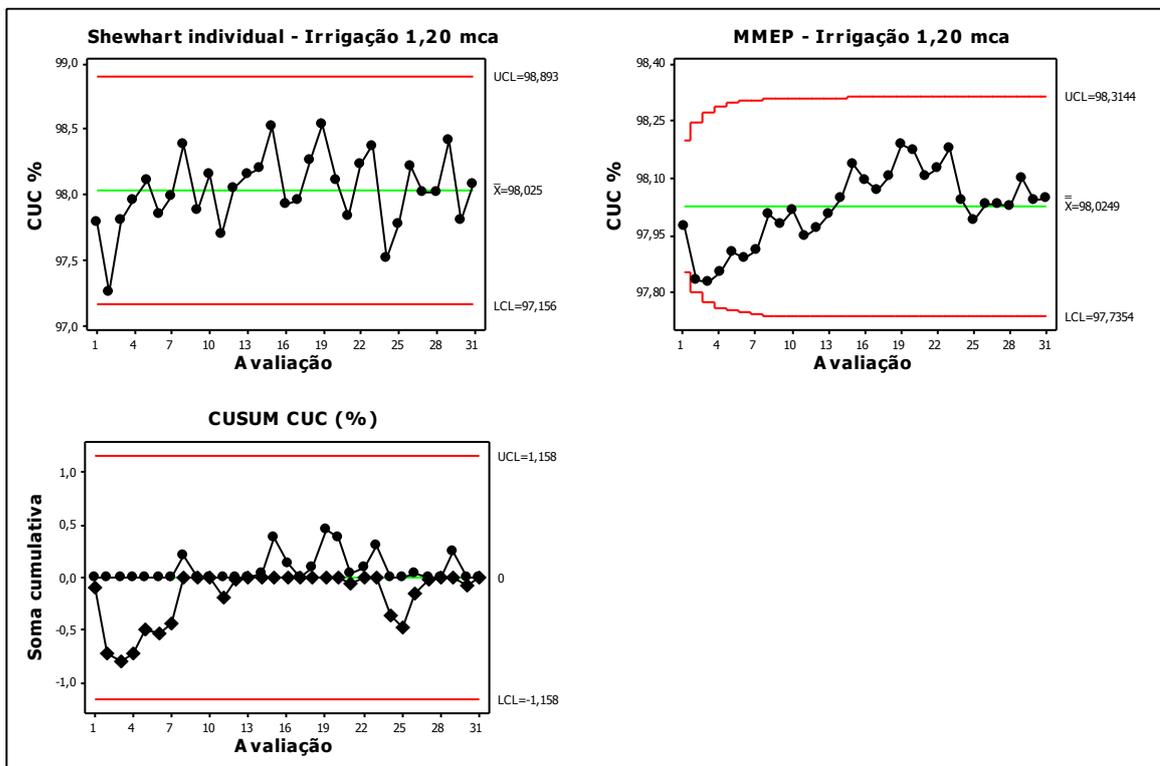


Figura 18 Gráficos de controle do CUC da irrigação a 1,20 mca.

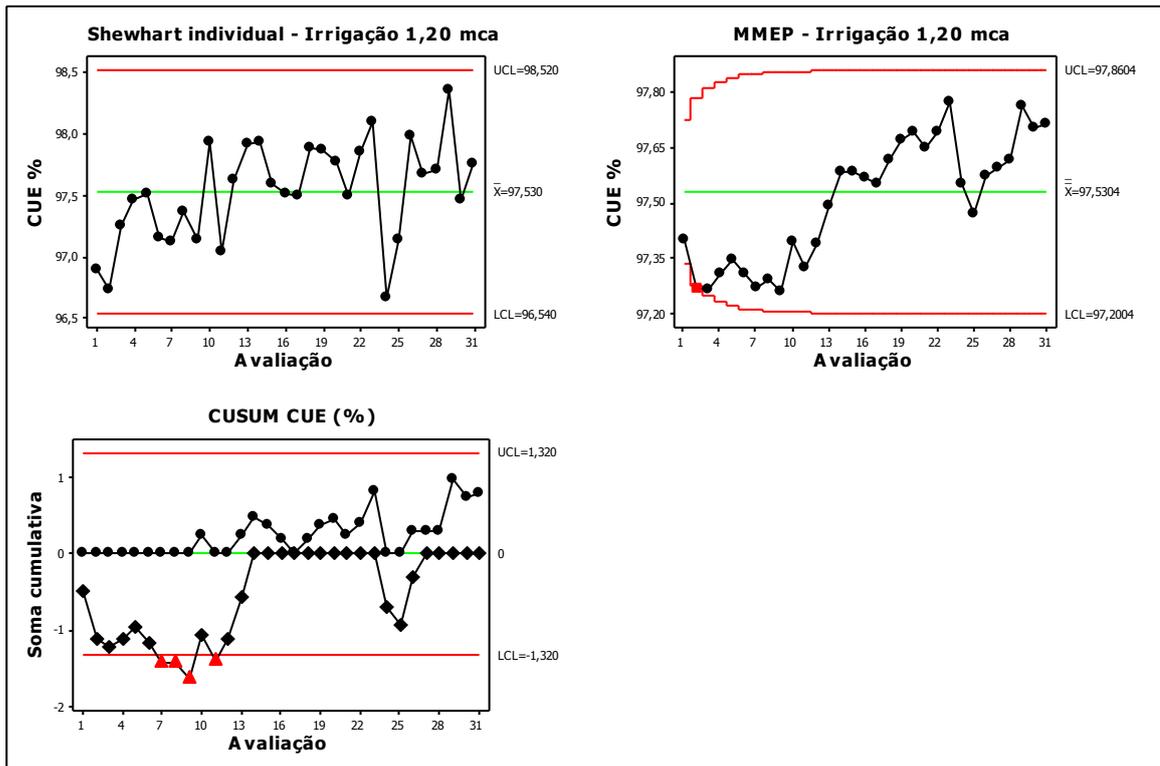


Figura 19 Gráficos de controle do CUE da irrigação a 1,20 mca.

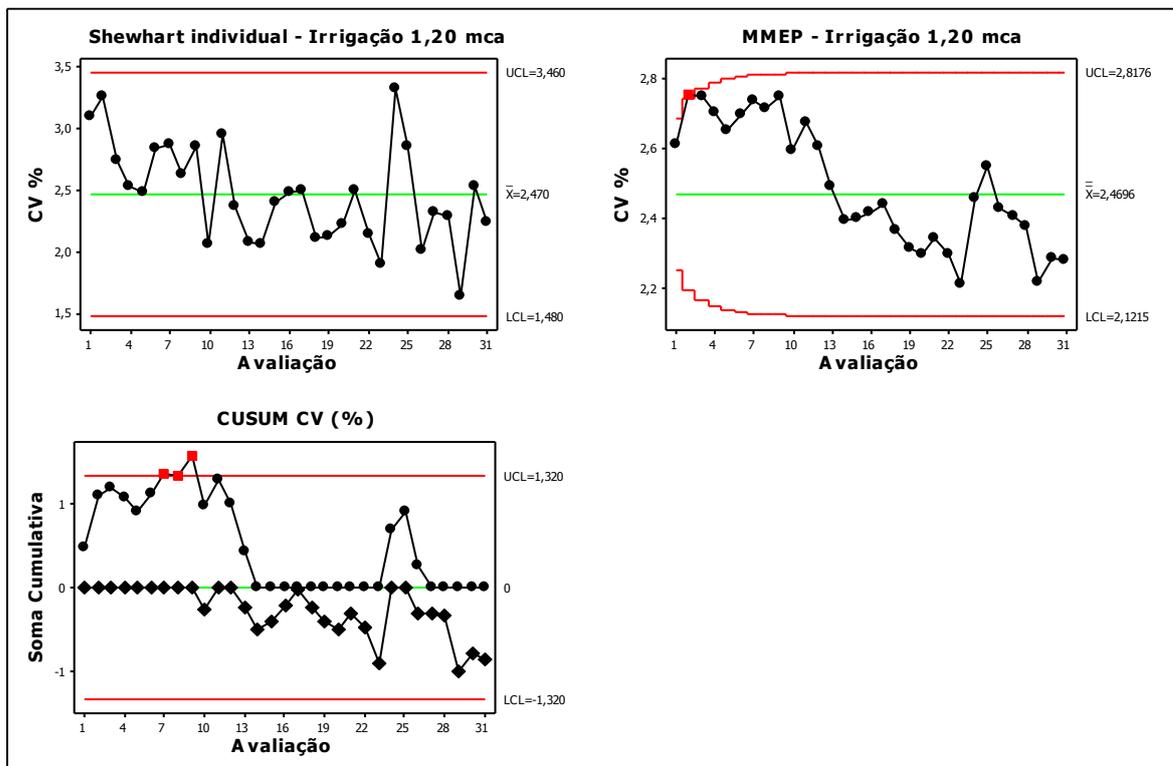


Figura 20 Gráficos de controle do CV da irrigação a 1,20 mca.

Para a carga hidráulica de 1,20 mca é possível observar que para CUD, CUE e CV os gráficos MMEP e CUSUM apresentaram pontos fora dos limites de controle, sendo que para

CUD e CUE o principal problema foram os pontos abaixo do limite inferior, o que indica uma uniformidade abaixo da desejada. Os gráficos de MMEP e CUSUM para CUD (Figura 17) possuem indícios de que o processo possa estar fora de controle, pois existe uma sequência de pontos fora dos limites de controle, sendo este ocorrido visualizado principalmente no gráfico de CUSUM para CUD, onde existe uma sequência de 10 pontos fora do limite inferior.

Já para os gráficos de controle feitos para o coeficiente de variação, a preocupação maior deve estar focada nos pontos acima do limite superior, uma vez que quanto menor o coeficiente de variação melhor será o desempenho de uniformidade de aplicação do sistema. Assim como nos gráficos de controle de MMEP e CUSUM para os coeficientes de uniformidade, houve pontos fora dos limites de controle, porém, estes não são grandes indícios de que o processo está fora de controle, sendo que são poucos pontos.

Assim, para a carga hidráulica de 1,20 mca, no processo de irrigação, a combinação de coeficiente de uniformidade e gráfico de controle que se apresentou mais rigorosa foi o gráfico de controle CUSUM para CUD, observado na Figura 17.

Para confirmar se neste caso o processo é capaz de se manter sob controle, deve-se ainda ser analisado o índice de capacidade de processo.

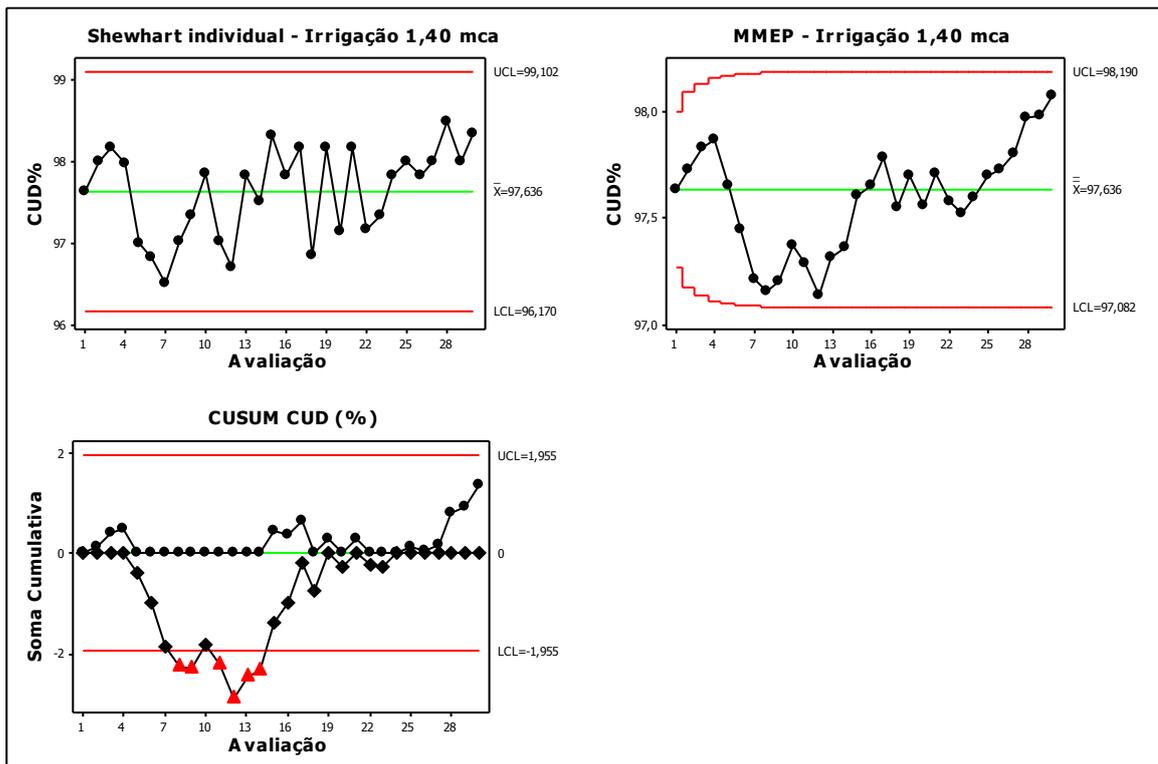


Figura 21 Gráficos de controle do CUD da irrigação a 1,40 mca.

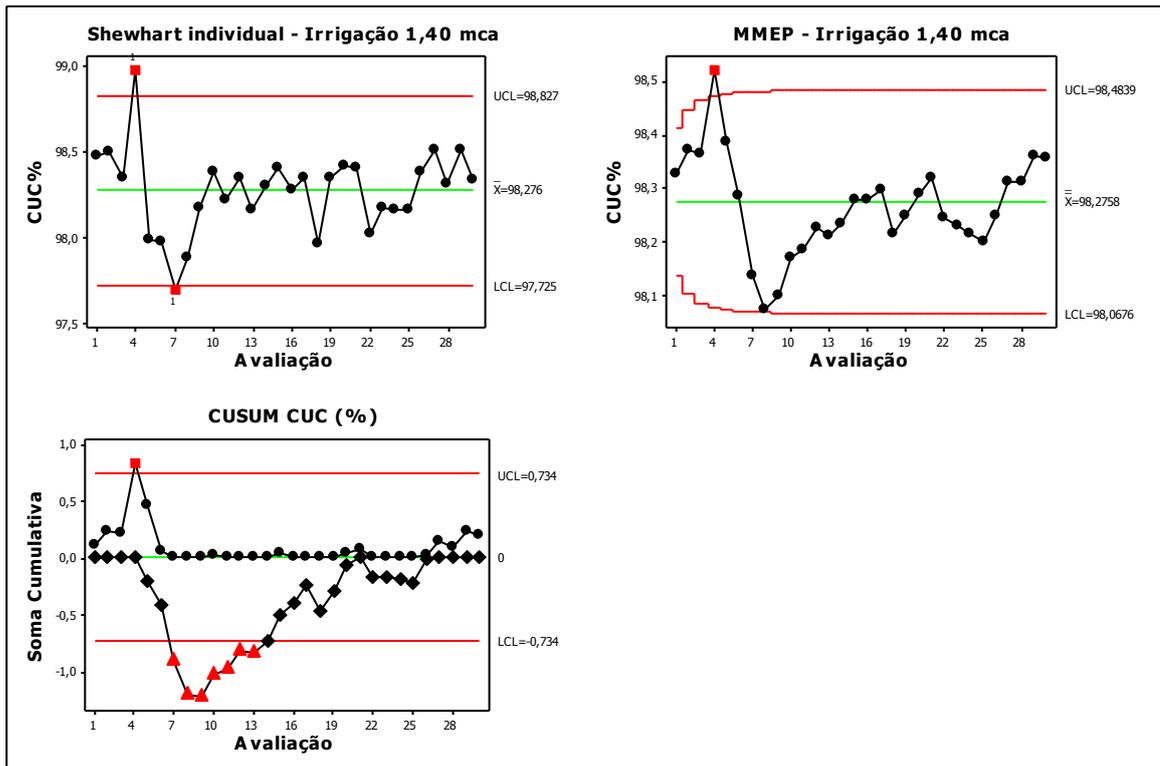


Figura 22 Gráficos de controle do CUC da irrigação a 1,40 mca.

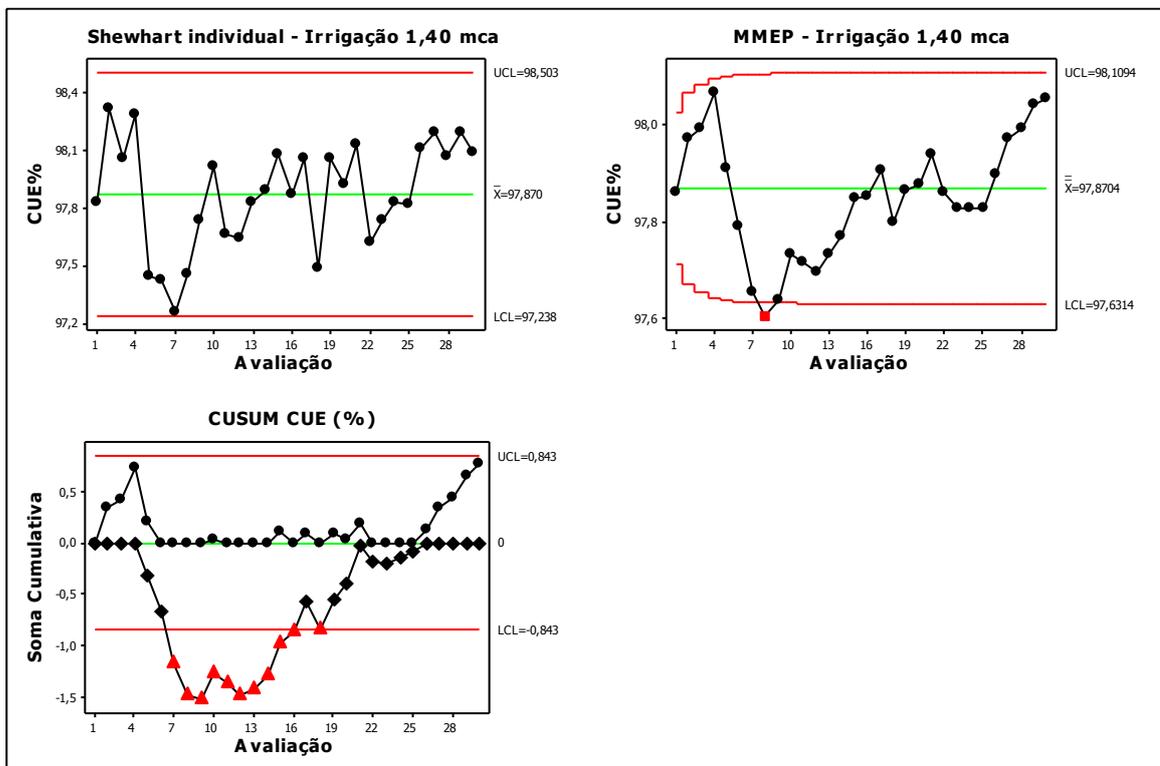


Figura 23 Gráficos de controle do CUE da irrigação a 1,40 mca.

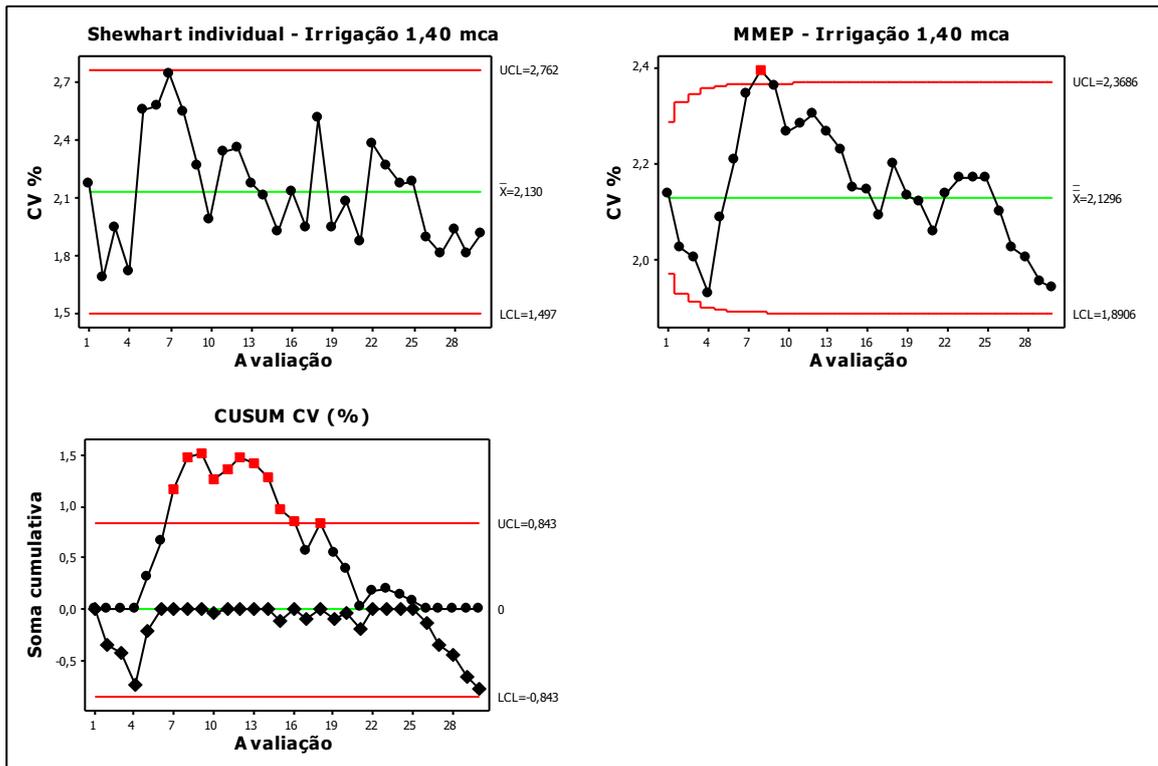


Figura 24 Gráficos de controle do CV da irrigação a 1,40 mca.

Para a carga hidráulica de 1,40 mca é possível observar que pelo menos um dos gráficos de controle apresentou pontos fora dos limites de controle para CUD, CUC, CUE e CV. Os casos que mais chamam atenção para a carga de 1,40 mca, são os gráficos de CUSUM para CUC, CUE e CV, onde existem sequências de pontos fora dos limites de controle. Para confirmar se a uniformidade da irrigação a 1,40 mca é inadequada ou não, é necessário ainda a análise do índice de capacidade de processo.

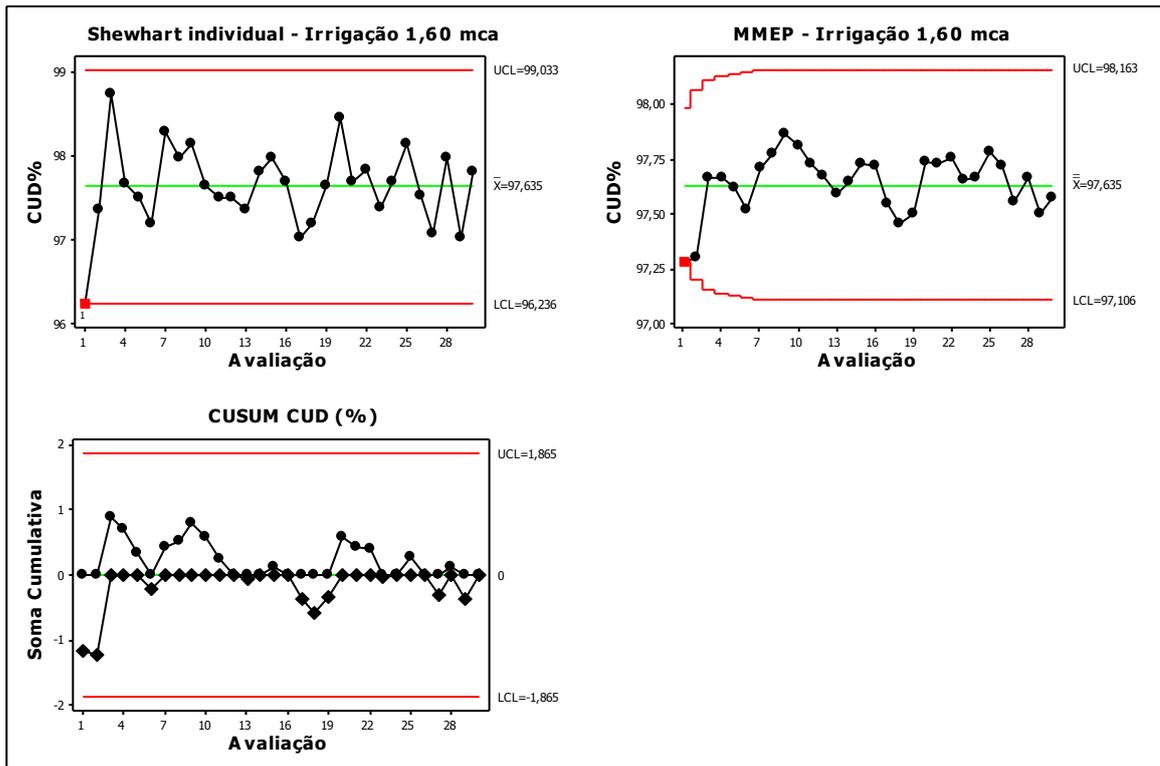


Figura 25 Gráficos de controle do CUD da irrigação a 1,60 mca.

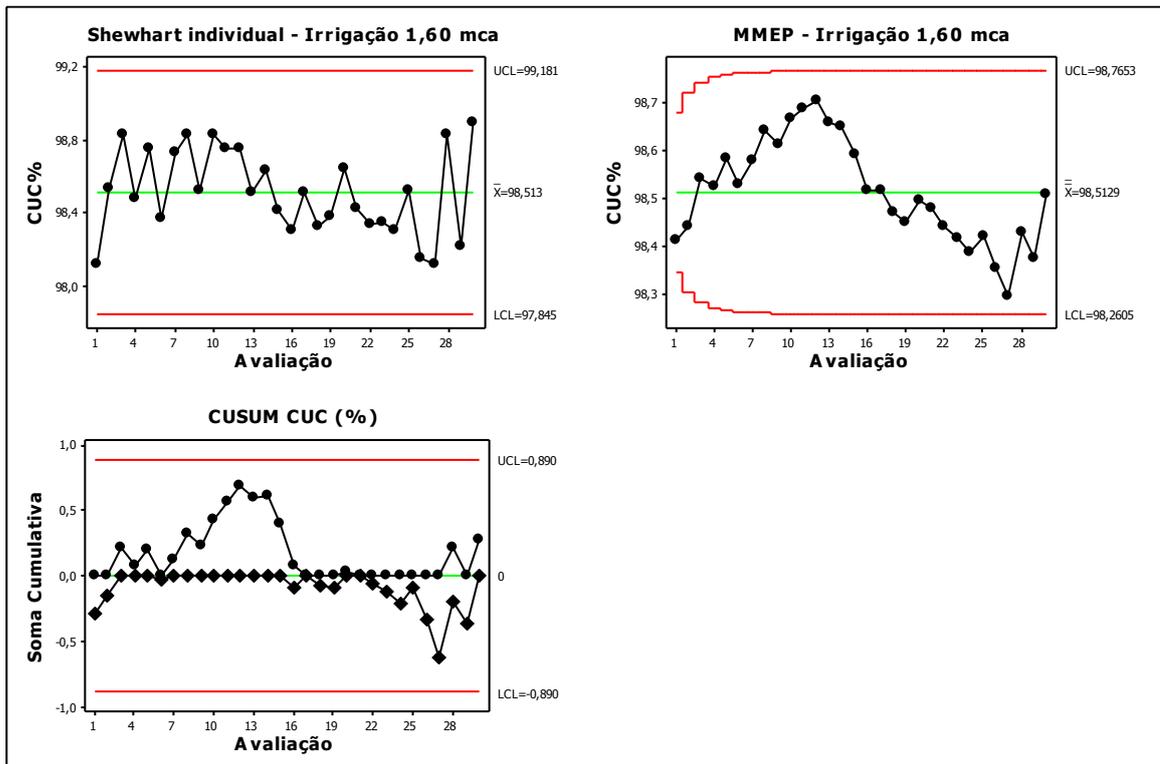


Figura 26 Gráficos de controle do CUC da irrigação a 1,60 mca.

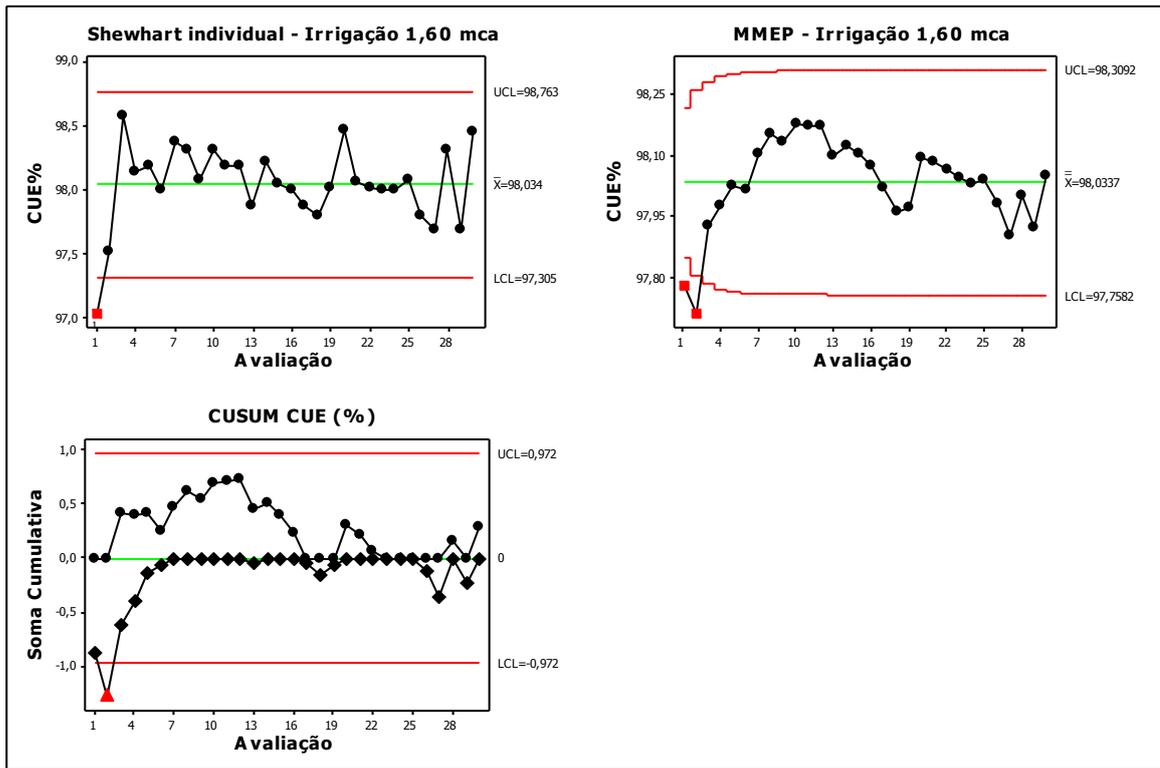


Figura 27 Gráficos de controle do CUE da irrigação a 1,60 mca.

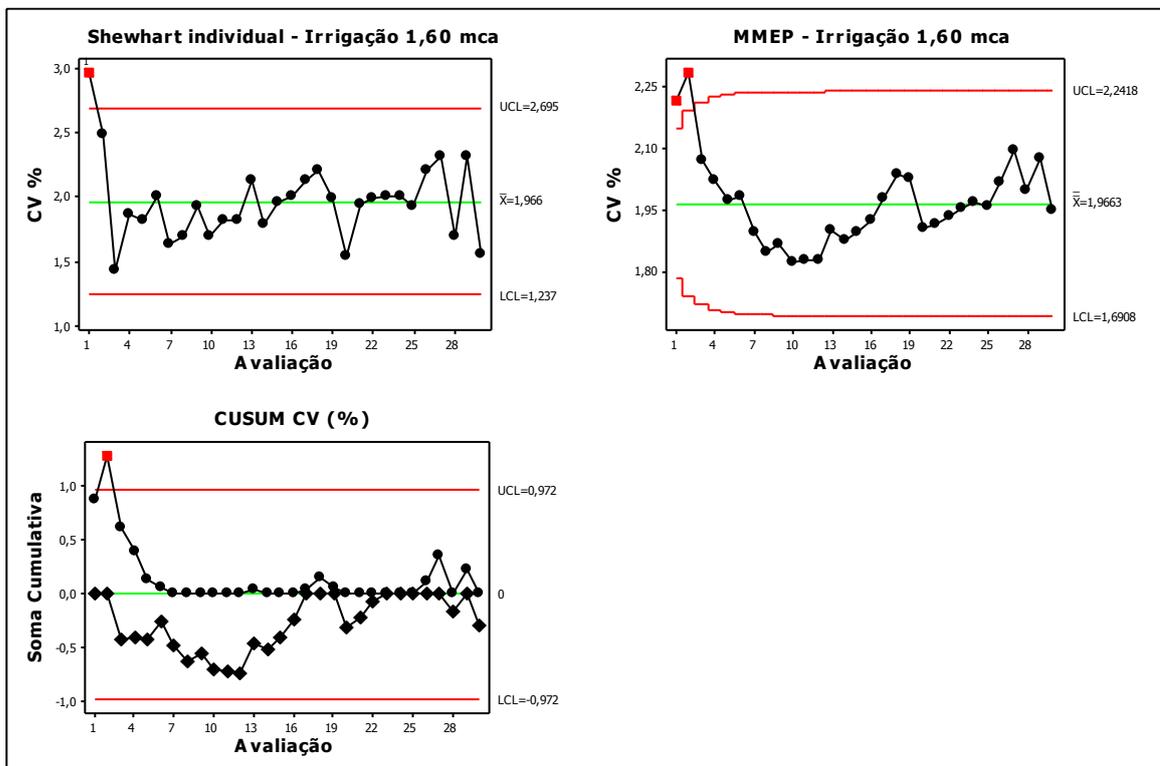


Figura 28 Gráficos de controle do CV da irrigação a 1,60 mca.

Para a irrigação na carga hidráulica de 1,60 mca, é possível observar a existência de pontos fora dos limites de controle em alguns casos; porém, estes não são indícios de que existe uma falha no processo, pois são pontos únicos.

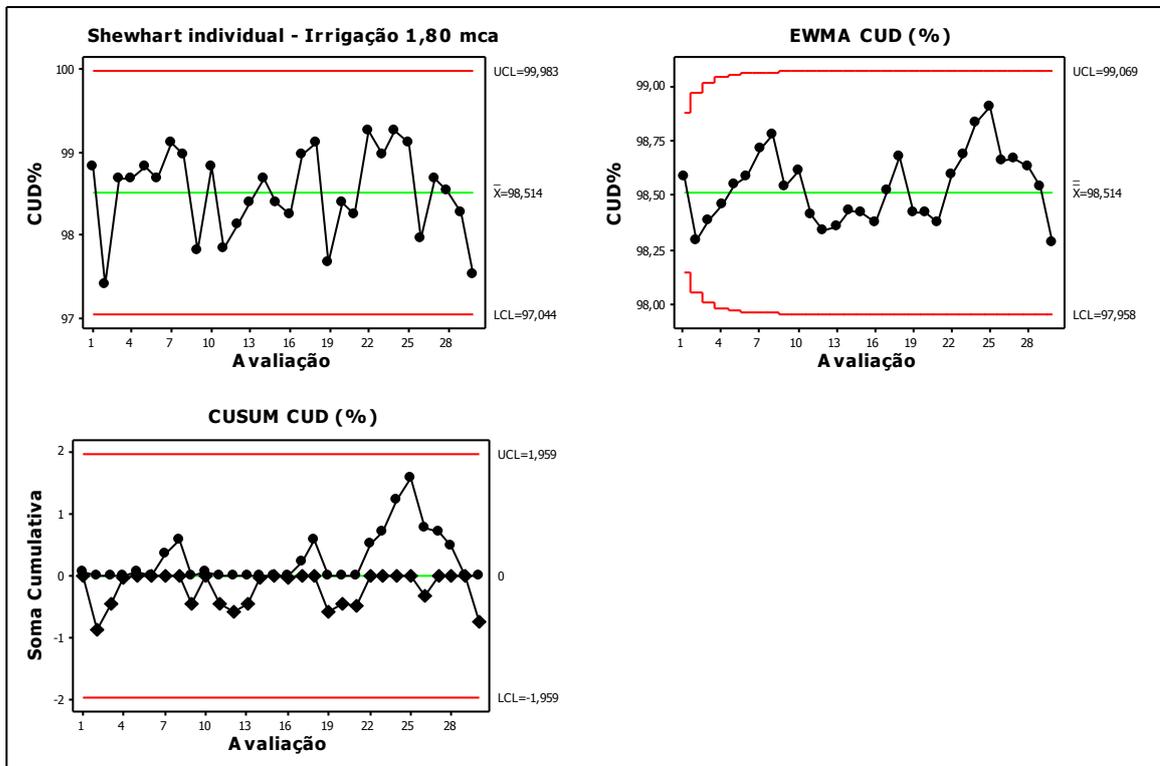


Figura 29 Gráficos de controle do CUD da irrigação a 1,80 mca.

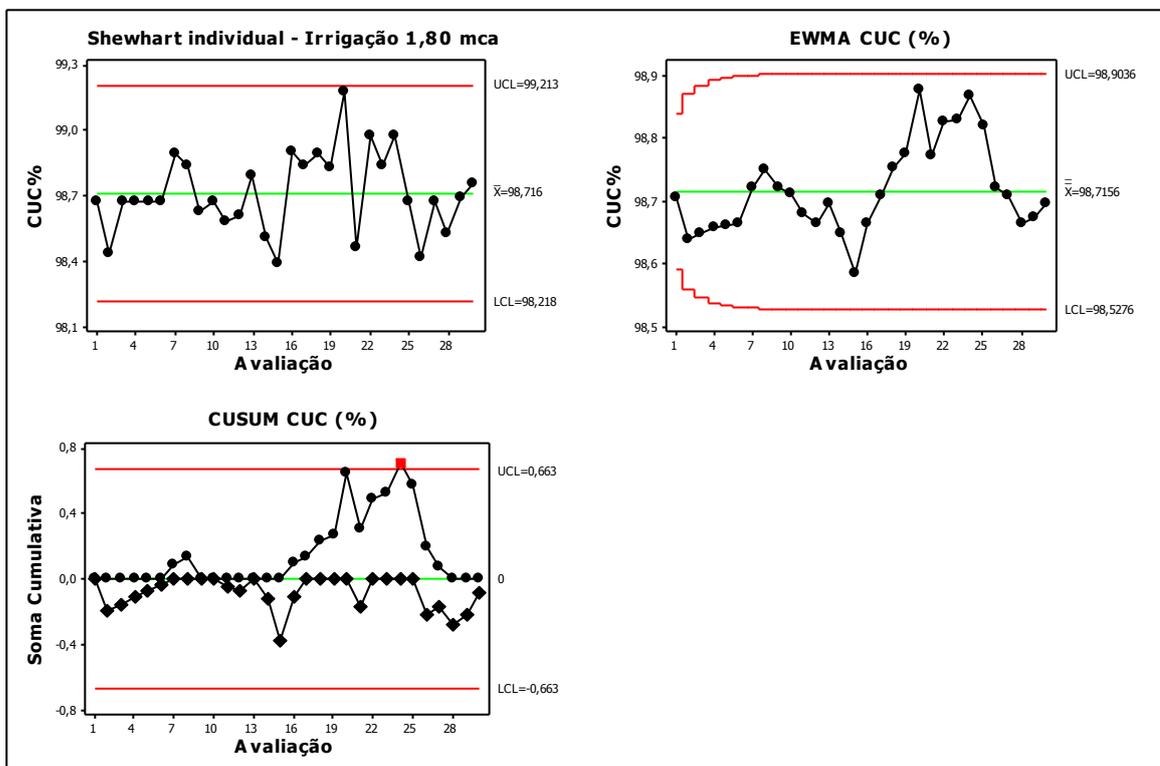


Figura 30 Gráficos de controle do CUC da irrigação a 1,80 mca.

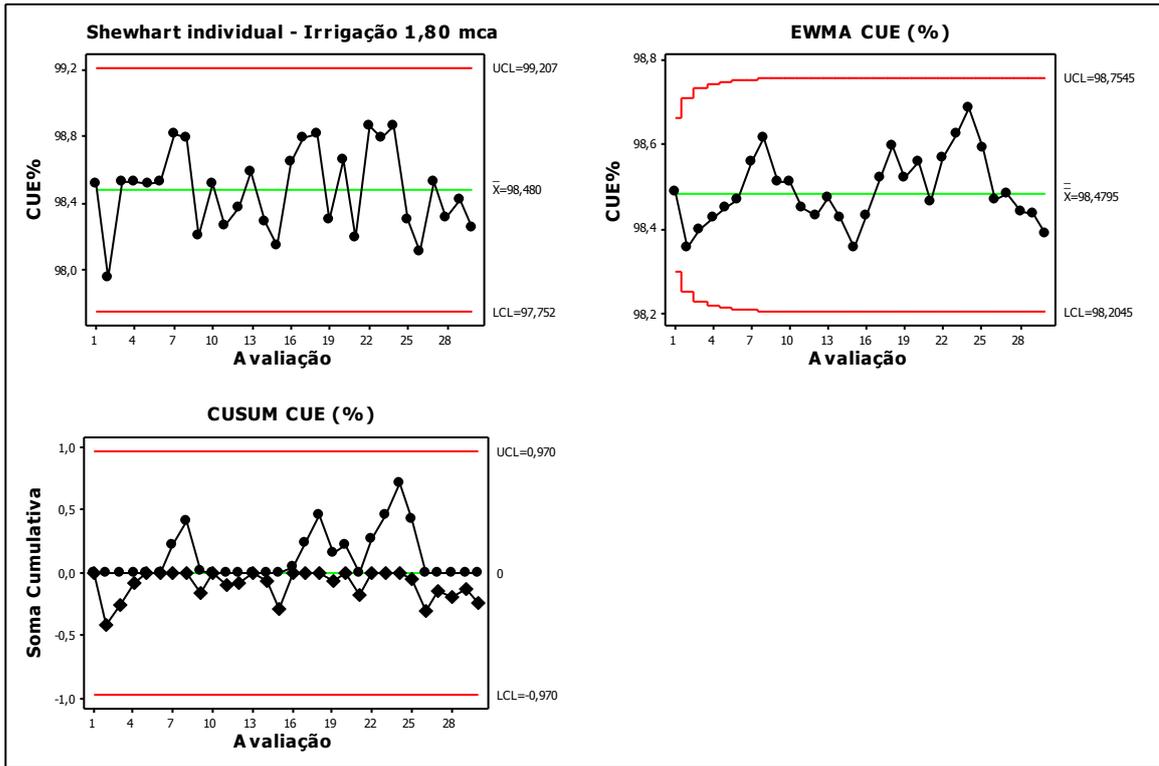


Figura 31 Gráficos de controle do CUE da irrigação a 1,80 mca.

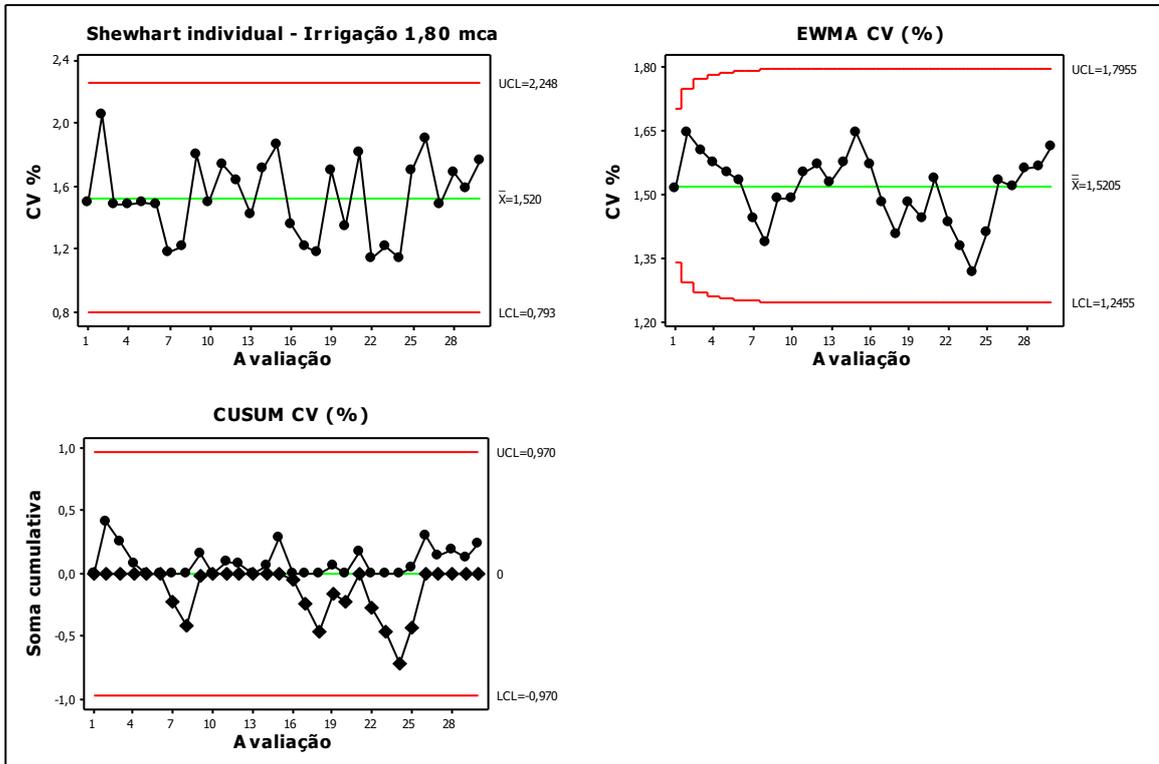


Figura 32 Gráficos de controle do CV da irrigação a 1,80 mca.

Para a irrigação na carga hidráulica de 1,80 mca, apenas o gráfico de CUSUM para CUC (Figura 30) apresentou um ponto fora dos limites de controle, sendo ainda que o ponto em questão está locado acima do limite superior, o que de fato não representa um problema

quando se trata de uniformidade de irrigação, uma vez que quanto maior a uniformidade, melhor para o desempenho do sistema.

5.1.7. Capacidade de processo

Na Tabela 9 estão apresentados os devidos índices de capacidade de processo, de acordo com cada coeficiente de uniformidade e coeficiente de variação para cada carga hidráulica estudada. Assim, é possível dizer se a uniformidade do sistema de irrigação por gotejamento estudado é considerada adequada ou não, conforme os diferentes coeficientes utilizados, podendo estes ser mais ou menos rigorosos.

Tabela 9 Índices de capacidade de processo para irrigação

Índice	CUD	CUC	CUE	CV	Pressão (mca)
CPi	4,66	9,24	7,61		1,2
CP				2,53	
CPi	5,21	15,03	12,45		1,4
CP				7,91	
CPi	5,46	12,75	11,02		1,6
CP				6,86	
CPi	5,79	17,52	11,65		1,8
CP				6,87	

A uniformidade do sistema foi considerada adequada em todos os casos, pois os índices de capacidade de processo pelo limite inferior, calculados para os coeficientes de uniformidade, estão todos acima de 1,33. O índice de capacidade de processo calculado para o coeficiente de variação também confirma a excelente uniformidade, pois se encontram acima de 1,25.

Justi e Saizaki (2016), no estudo do desempenho de um sistema de irrigação utilizando-se o controle estatístico de qualidade, concluíram que houve uma proporção direta entre o aumento da uniformidade de distribuição de água com o aumento do índice de capacidade do processo, o que também pode ser observado neste trabalho, ainda que os índices sejam calculados por limites unilaterais.

5.2. Fertirrigação

As análises e os resultados apresentados a seguir foram realizadas a partir dos dados coletados durante as avaliações do sistema de gotejamento durante as fertirrigações (biofertilizante diluído), para as cargas hidráulicas de 1,20, 1,40, 1,60 e 1,80 mca.

Os dados utilizados para tais análises foram as vazões (L/h) dos emissores (gotejadores), coletadas a partir do funcionamento do sistema e de acordo com a metodologia

proposta anteriormente. Foram realizadas ainda algumas análises sobre a condutividade elétrica medida nas avaliações, parâmetro utilizado para conhecer o comportamento da aplicação do biofertilizante no sistema.

5.2.1. Estatística descritiva

A Tabela 10 apresenta os resultados da estatística descritiva da vazão a partir dos 30 ensaios feitos para cada carga hidráulica de fertirrigação.

Tabela 10 Estatística descritiva para a vazão da fertirrigação

Pressão (mca)	Média (L/h)	DP	CV (%)	Curtose	Assimetria	Mín (L/h)	Máx (L/h)
1,20	0,618	0,006	3,05	-0,064	0,372	0,606	0,633
1,40	0,732	0,005	2,16	0,265	0,505	0,723	0,744
1,60	0,811	0,005	1,70	0,421	-0,209	0,798	0,824
1,80	0,829	0,003	1,23	-0,363	0,213	0,824	0,834

A partir da análise dos dados da Tabela 10, observa-se que quanto maior a pressão de funcionamento do sistema, maior a vazão deste, comportamento semelhante ao processo de irrigação, sendo que a menor vazão média foi de 0,618 L/h para a pressão de 1,20 mca e a maior vazão média foi de 0,829 L/h para a pressão de 1,80 mca. A menor vazão encontrada para a fertirrigação foi de 0,606 L/h na pressão de 1,20 mca, e a maior vazão encontrada foi de 0,834 L/h para a pressão de 1,80 mca.

As vazões do sistema ainda demonstraram pouca variação, sendo que o desvio padrão foi pequeno em todas as pressões e o coeficiente de variação também foi classificado como baixo, de acordo com Pimentel Gomes (2000), pois não apresentou valores acima de 10%.

Os valores de assimetria encontram-se entre -1 e 1, o que indica uma distribuição dos dados razoavelmente simétrica, com pequenos desvios, observando-se ainda que os valores de assimetria das pressões de 1,20, 1,40 e 1,80 mca são positivos, o que indica um desvio dos dados à direita, enquanto para a pressão de 1,60 mca o valor é negativo, indicando desvio dos dados à esquerda.

A Tabela 11 apresenta os resultados da estatística descritiva da condutividade elétrica a partir dos 30 ensaios feitos para cada carga hidráulica de fertirrigação.

Tabela 11 Estatística descritiva para a condutividade elétrica da fertirrigação

Pressão (mca)	Média ($\mu\text{S/cm}$)	DP	CV (%)	Curtose	Assimetria	Mín ($\mu\text{S/cm}$)	Máx ($\mu\text{S/cm}$)
1,20	442,57	0,66	0,59	-0,26	-0,40	441,13	443,69
1,40	442,85	0,65	0,67	-0,20	-0,01	441,44	444,19
1,60	443,77	0,79	0,64	1,95	-1,15	441,75	445,06
1,80	474,25	0,75	0,59	3,70	-1,27	471,69	475,69

A variação dos valores de condutividade elétrica obtidos é independente da pressão aplicada ao sistema, sendo estes relacionados principalmente à qualidade e à diluição do biofertilizante utilizado. Todos os ensaios de fertirrigação foram feitos utilizando-se uma diluição de 50:1; logo, a diferença notada na média da condutividade na pressão de 1,80 mca para as demais pode ser explicada por uma provável diferença na qualidade do biofertilizante utilizado nesta ocasião.

Quanto maior o valor da condutividade elétrica, maior deve ser a quantidade de sais presente na solução, o que pode acarretar em obstruções no sistema de filtragem ou mesmo nos emissores. Isso é verificado a partir do cálculo e da classificação da uniformidade de aplicação do sistema.

5.2.2. Relação vazão x pressão

Para conhecer qual a relação entre a vazão dos emissores (gotejadores) e a carga hidráulica (pressão) do sistema, foi realizada uma análise de regressão da vazão em função da pressão. Foram analisados os métodos de regressão linear e regressão quadrática, na intenção de verificar qual dos métodos possui um melhor ajuste ao comportamento do sistema.

Após a referida análise, o método de regressão quadrática foi o que teve maior ajuste ao comportamento dos dados, explicando 99,9% da variação da vazão dos emissores do sistema, conforme apresentado na Figura 33.

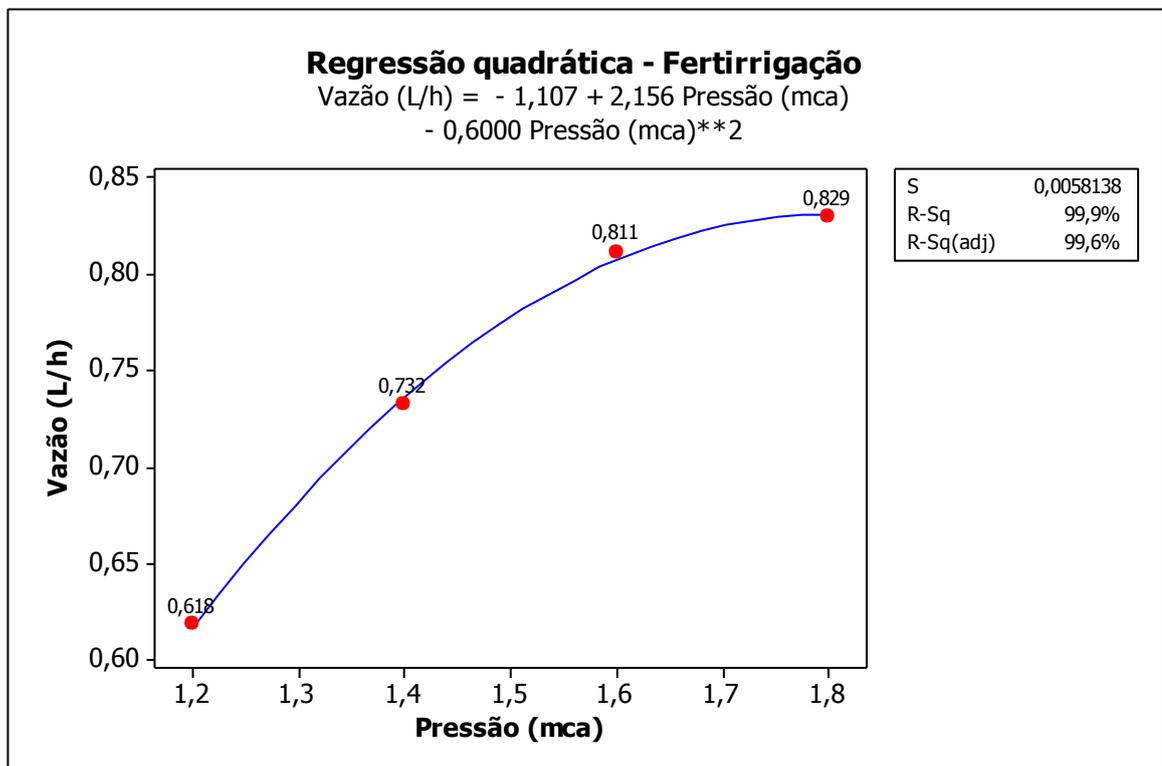


Figura 33 Análise de regressão para fertirrigação (vazão x pressão).

5.2.3. Uniformidade de aplicação

Os coeficientes de uniformidade de irrigação e de variação apresentados na Tabela 12 são resultado das 30 avaliações realizadas para os dados de vazão dos ensaios de fertirrigação, sendo que a média é calculada a partir da uniformidade média das 30 avaliações e os valores de máximo e mínimo referem-se às mesmas 30 avaliações para cada carga hidráulica.

Tabela 12 Coeficientes de uniformidade da vazão para fertirrigação

Parâmetro	CUD (%)	CUC (%)	CUE (%)	CV (%)	Pressão (mca)
Média	96,53	97,57	96,95	3,05	
Mínimo	94,16	96,58	95,64	2,43	1,20
Máximo	97,56	98,02	97,57	4,36	
Média	97,62	98,25	97,84	2,16	
Mínimo	96,79	97,53	96,96	1,71	1,40
Máximo	98,46	98,79	98,29	3,04	
Média	98,24	98,61	98,30	1,70	
Mínimo	97,25	98,27	97,80	1,11	1,60
Máximo	99,38	99,07	98,89	2,20	
Média	98,92	98,87	98,77	1,23	
Mínimo	98,34	98,35	98,10	0,98	1,80
Máximo	99,54	99,26	99,02	1,90	

A uniformidade de irrigação do sistema de gotejamento em estudo foi classificada como excelente de acordo com os 3 coeficientes calculados e em todas as cargas hidráulicas, sendo que até mesmo os valores mínimos dos coeficientes (pior uniformidade) foram classificados como excelentes, assim como na irrigação.

Isso ainda é afirmado pelo baixo coeficiente de variação, que apresentou um comportamento relacionado ao aumento da carga hidráulica. Como é possível observar a partir da Tabela 12, quanto maior a carga hidráulica do sistema, menor foi o coeficiente de variação. Posteriormente, foi realizada uma análise de regressão para saber qual o comportamento dos coeficientes de uniformidade e de variação em função da variação da carga hidráulica do sistema.

De acordo com Cunha et al. (2013), a uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação por gotejamento depende do dimensionamento hidráulico, da qualidade dos gotejadores, da qualidade da água e do uso da fertirrigação com sais que podem ocasionar o entupimento dos emissores.

Hermes et al. (2013), utilizando como fertilizante o efluente do processamento de mandioca diluído na proporção de 50:1, como neste trabalho, obteve um valor médio de CUC de 88,67%, com um coeficiente de variação da vazão de 0,15%, sendo que o sistema estava sob uma carga hidráulica de 1,5 mca.

5.2.4. Mapas temáticos de contorno

Para que se possa ter uma maior noção da uniformidade de irrigação do sistema, foram confeccionados mapas de contorno, utilizando-se como método de interpolação o inverso da distância. As vazões escolhidas para a confecção do mapa foram de acordo com a avaliação que apresentou o maior coeficiente de uniformidade para cada carga hidráulica.

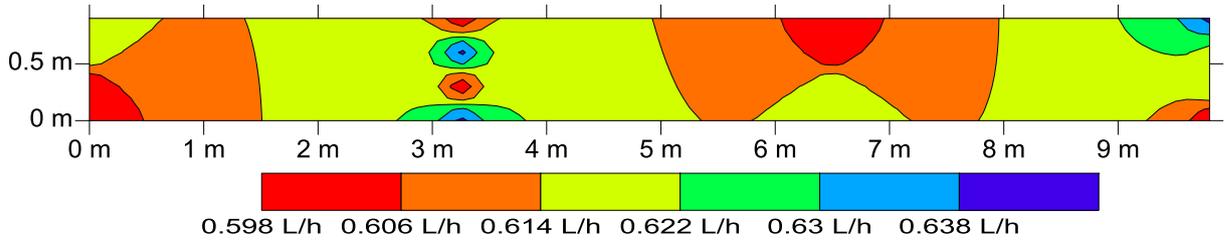


Figura 34 Mapa de contorno da vazão para fertirrigação a 1,20 mca.

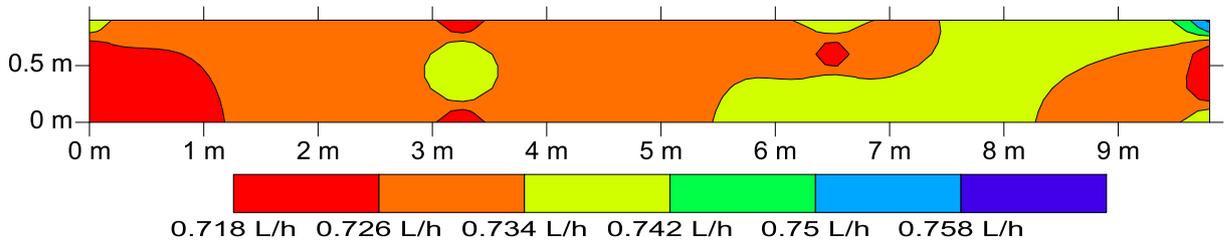


Figura 35 Mapa de contorno da vazão para fertirrigação a 1,40 mca.

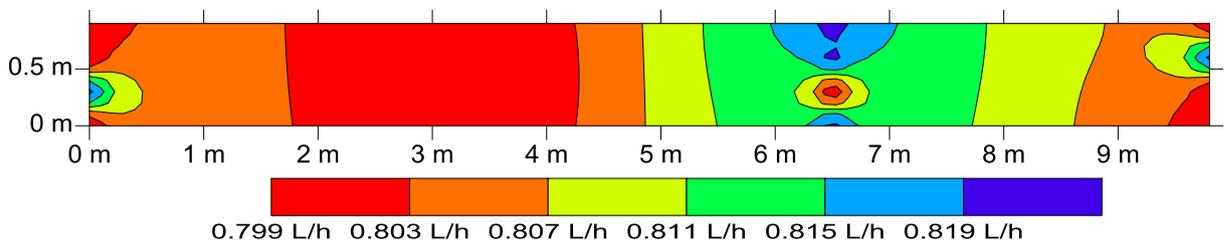


Figura 36 Mapa de contorno da vazão para fertirrigação a 1,60 mca.

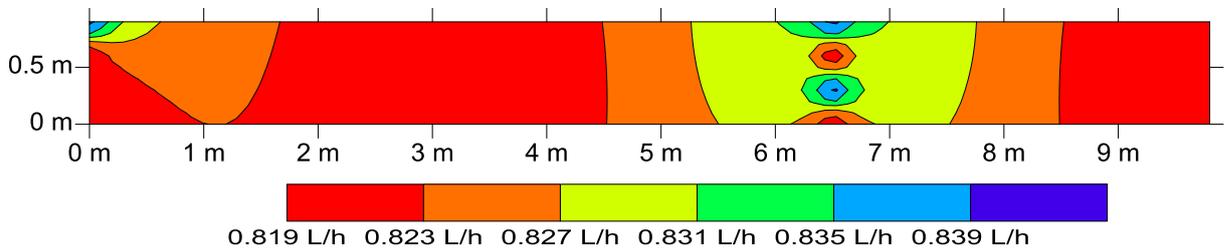


Figura 37 Mapa de contorno da vazão para fertirrigação a 1,80 mca.

As variações de vazão pelo sistema foram mínimas, indicadas pelos coeficientes de uniformidade e coeficiente de variação, sendo possível observar que em todos os mapas (todas as cargas hidráulicas) as maiores variações ocorreram nos pontos coletados intermediários. Vale ainda ressaltar que o método de interpolação pelo inverso da distância

possui uma característica de evidenciar os pontos com valores diferenciados, como é possível observar nos mapas acima.

Para visualização do comportamento de distribuição do biofertilizante, foram confeccionados mapas de contorno para os dados de condutividade elétrica, obtidos a partir dos ensaios de fertirrigação com a melhor uniformidade.

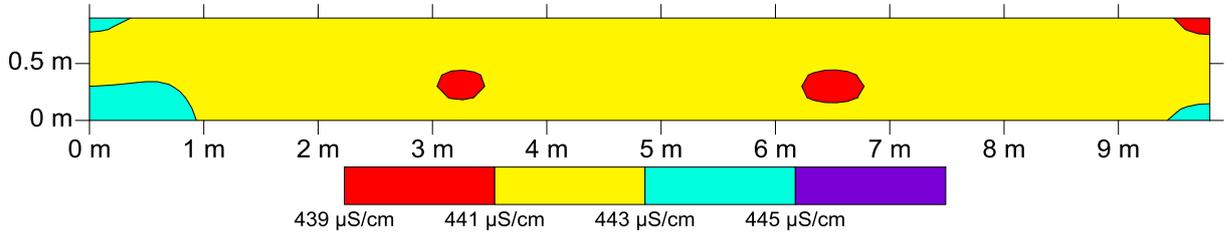


Figura 38 Mapa de contorno da condutividade para fertirrigação a 1,20 mca.

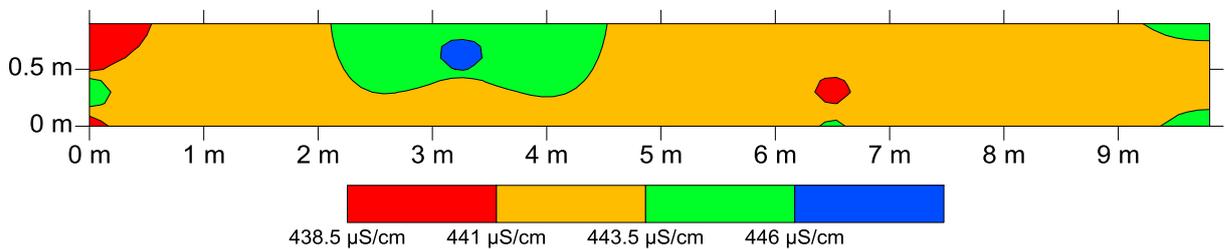


Figura 39 Mapa de contorno da condutividade para fertirrigação a 1,40 mca.

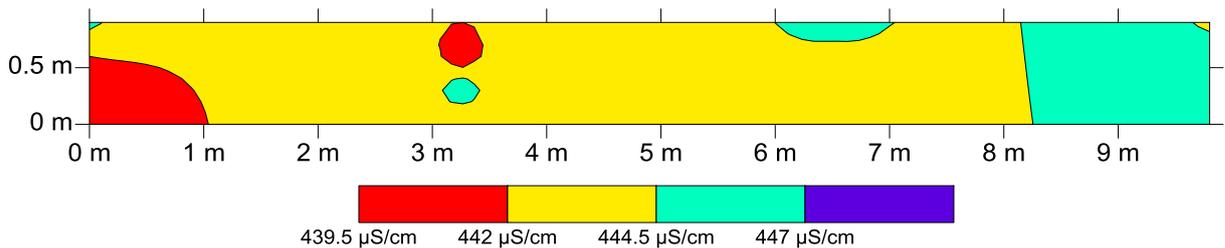


Figura 40 Mapa de contorno da condutividade para fertirrigação a 1,60 mca.

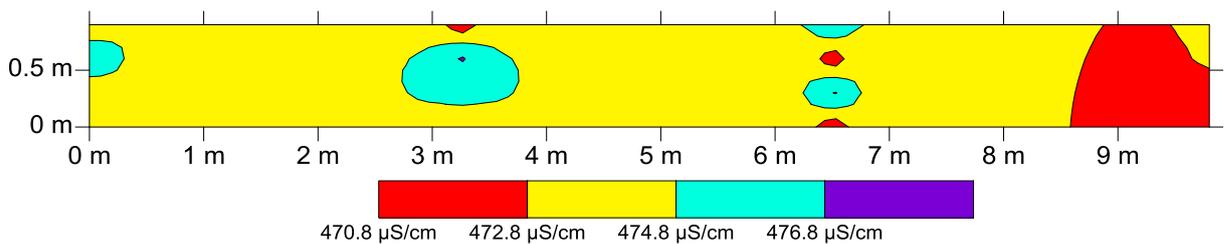


Figura 41 Mapa de contorno da condutividade para fertirrigação a 1,80 mca.

Como é possível se observar, a distribuição do biofertilizante demonstrou-se muito uniforme, com pequenas variações pontuais.

5.2.5. Relação uniformidade x pressão

Para conhecer o verdadeiro comportamento dos coeficientes de uniformidade e de variação de acordo com a variação da carga hidráulica do sistema, foi realizada uma análise de regressão apresentada na Figura 42.

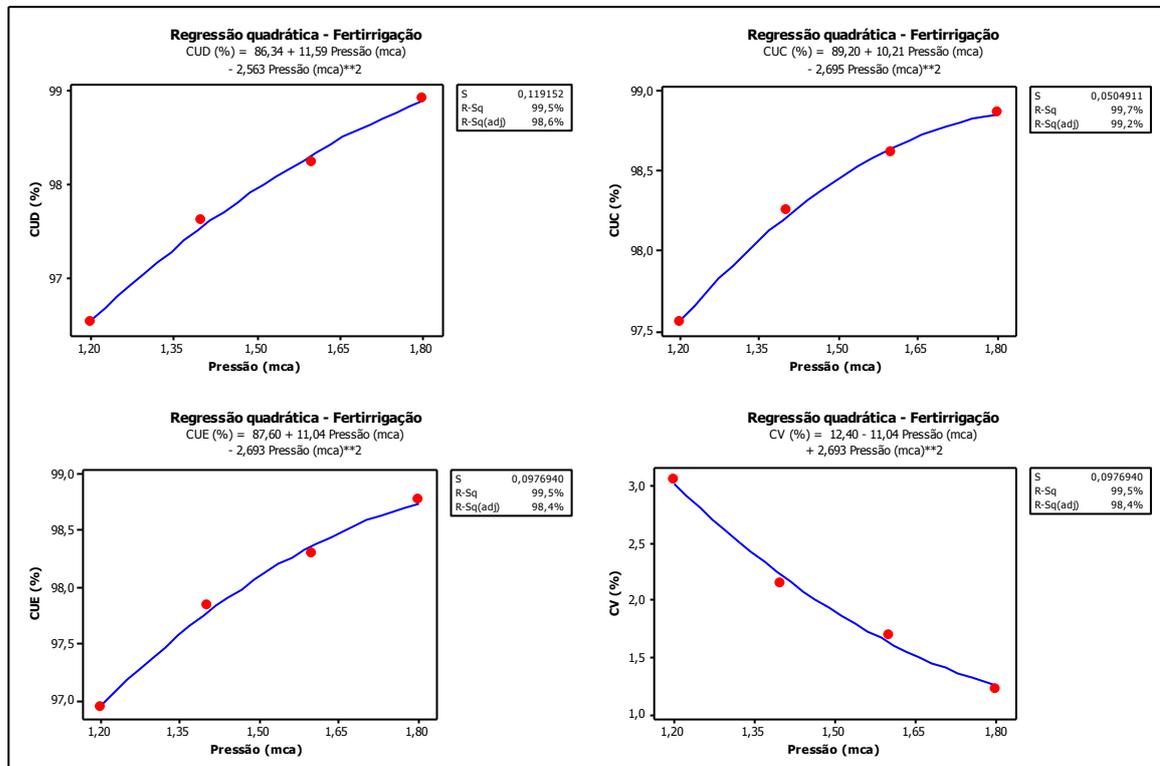


Figura 42 Análise de regressão para fertirrigação (uniformidade x pressão).

Para todos os coeficientes de uniformidade e para o coeficiente de variação, a análise que teve melhor desempenho foi a regressão quadrática, pois o coeficiente de determinação foi considerado excelente em todos os casos, sendo este de 99,5% para o CUD, 99,7% para CUC, 99,5% para CUE e 99,5% para o CV.

5.2.6. Gráficos de controle

Com o objetivo de comparar a ação e rigorosidade de cada tipo de gráfico de controle proposto neste trabalho, estes foram agrupados de modo que cada coeficiente estudado (CUD, CUC, CUE e CV) apresentasse os três gráficos: gráfico de controle de Shewhart individual, gráfico de controle MMEP (média móvel exponencialmente ponderada) e gráfico de controle CUSUM. Assim, é possível realizar a comparação entre os três gráficos, observando qual o mais rigoroso como ferramenta para o controle de qualidade.

Para a confecção do gráfico CUSUM, o valor alvo utilizado foi a média de cada coeficiente, pois os valores plotados são os desvios de cada ponto em relação à média.

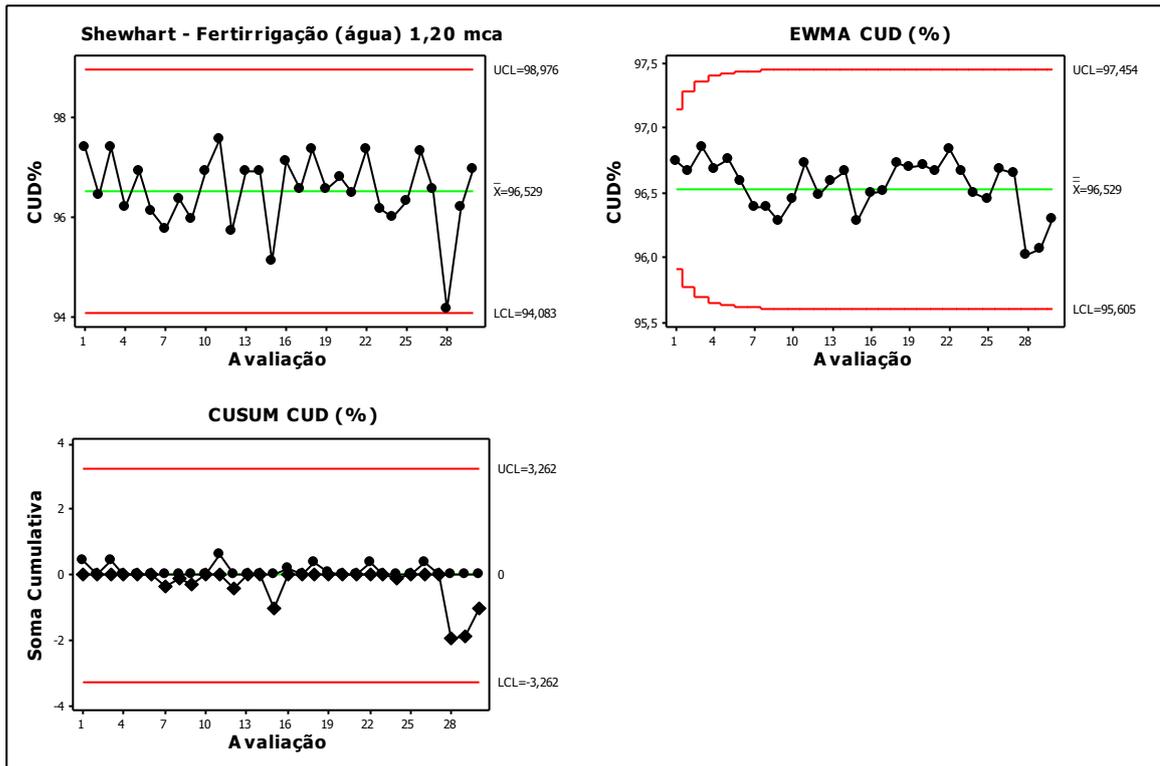


Figura 43 Gráficos de controle do CUD da Fertirrigação a 1,20 mca.

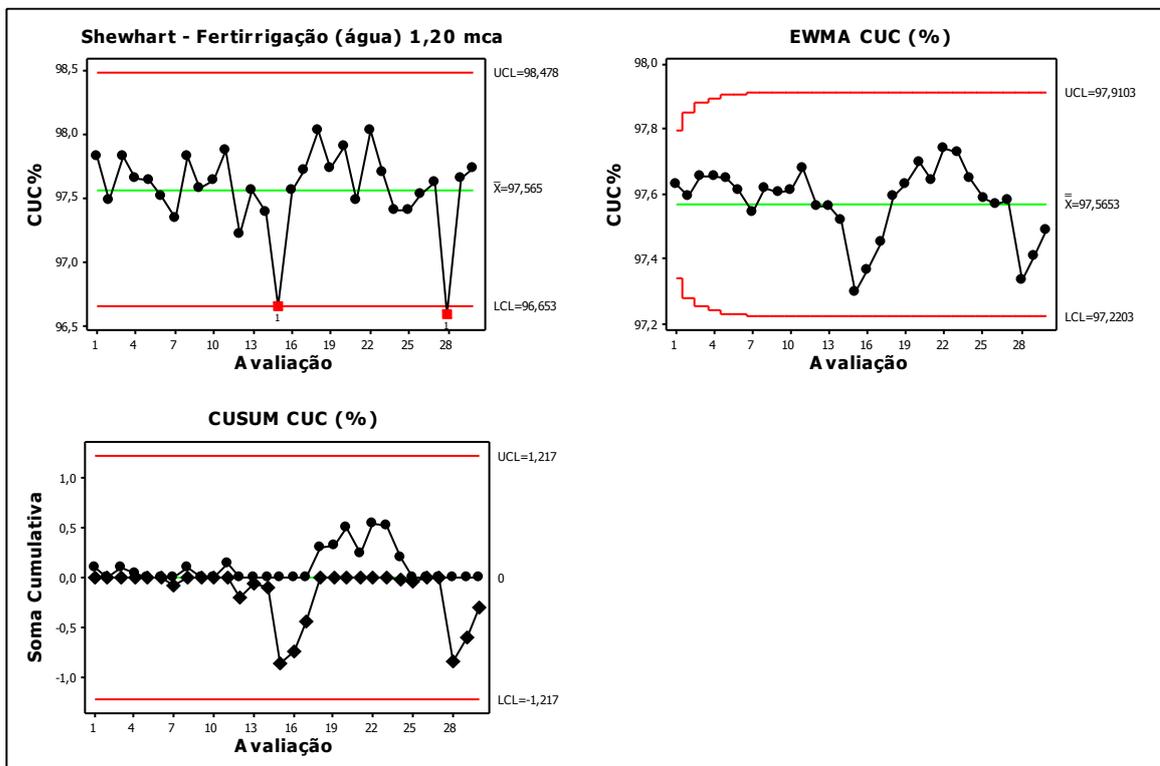


Figura 44 Gráficos de controle do CUC da Fertirrigação a 1,20 mca.

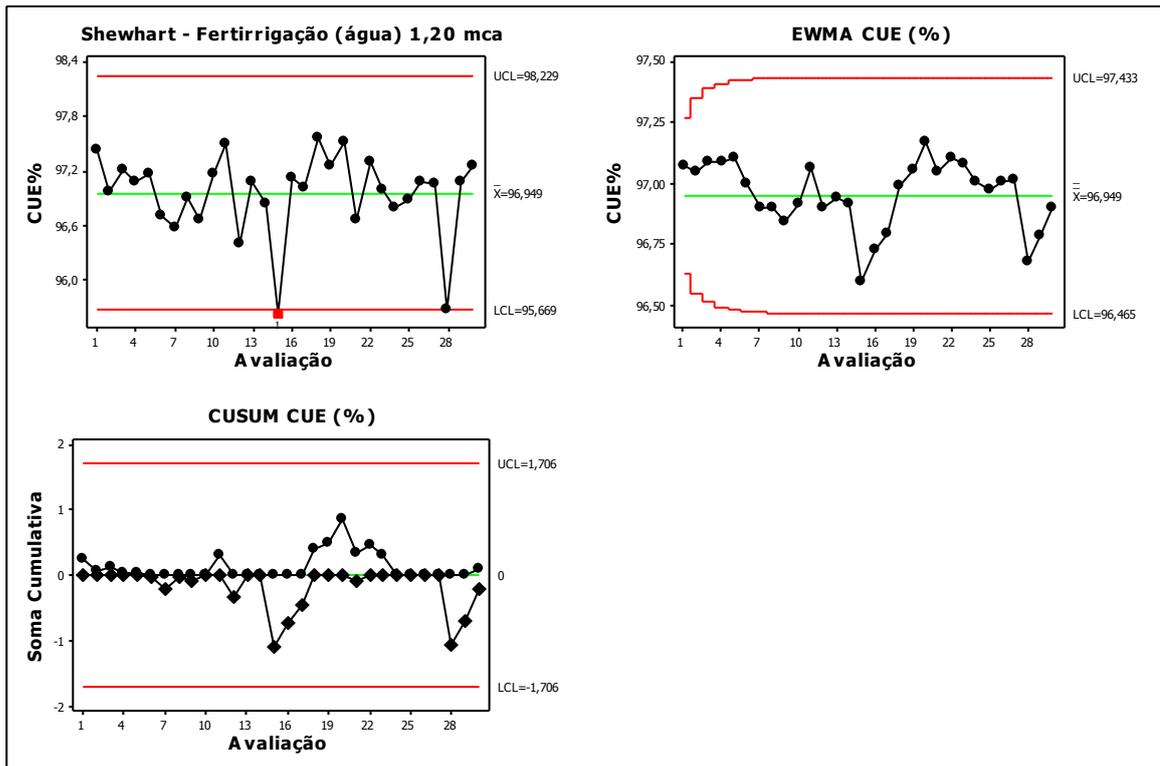


Figura 45 Gráficos de controle do CUE da Fertirrigação a 1,20 mca.

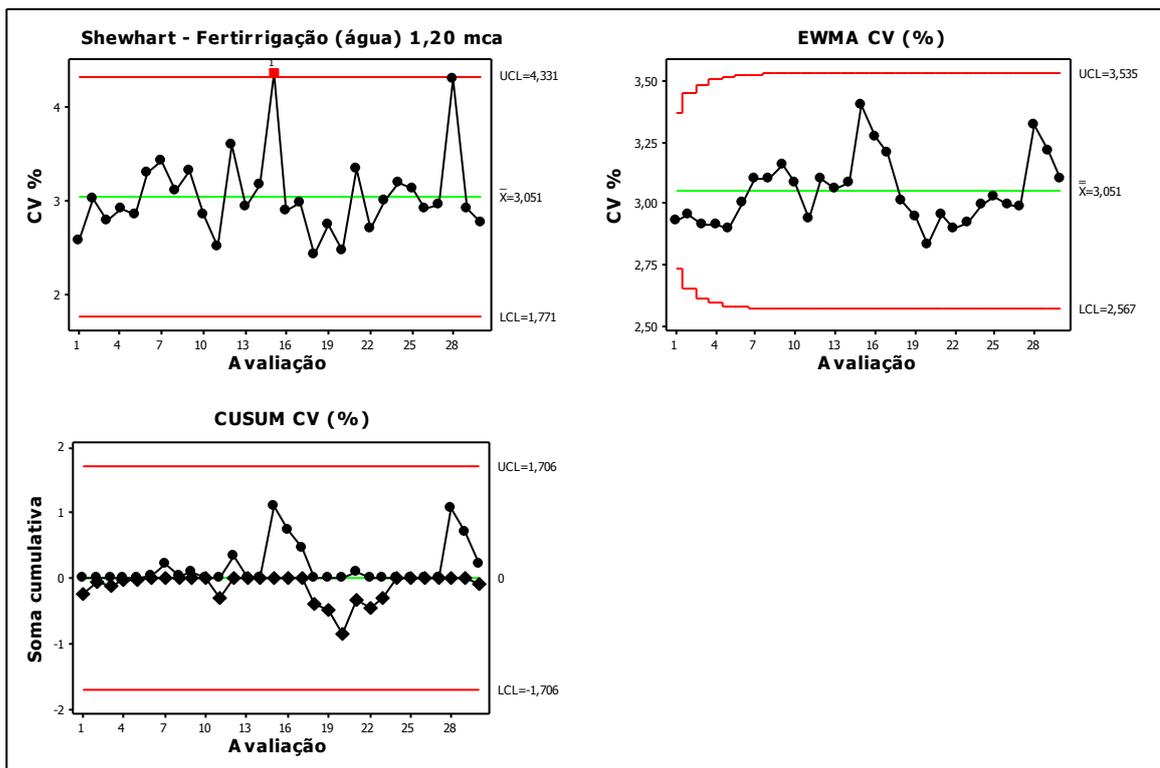


Figura 46 Gráficos de controle do CV da Fertirrigação a 1,20 mca.

Para a carga hidráulica de 1,20 mca é possível observar que para CUC, CUE e CV o gráfico de Shewhart individual foi o único a apresentar pontos fora dos limites de controle, sendo ainda que estes pontos não são indícios confiáveis de que a uniformidade da

fertirrigação esteja fora de controle, pois são casos isolados.

Assim, para a carga hidráulica de 1,20 mca, no processo de fertirrigação, a combinação de coeficiente de uniformidade e gráfico de controle que se apresentou mais rigorosa foi o gráfico de controle de Shewhart individual para CUC, observado na Figura 44.

Para confirmar se neste caso a uniformidade pode ser considerada fora de controle ou inadequado, deve-se ainda ser analisado o índice de capacidade de processo.

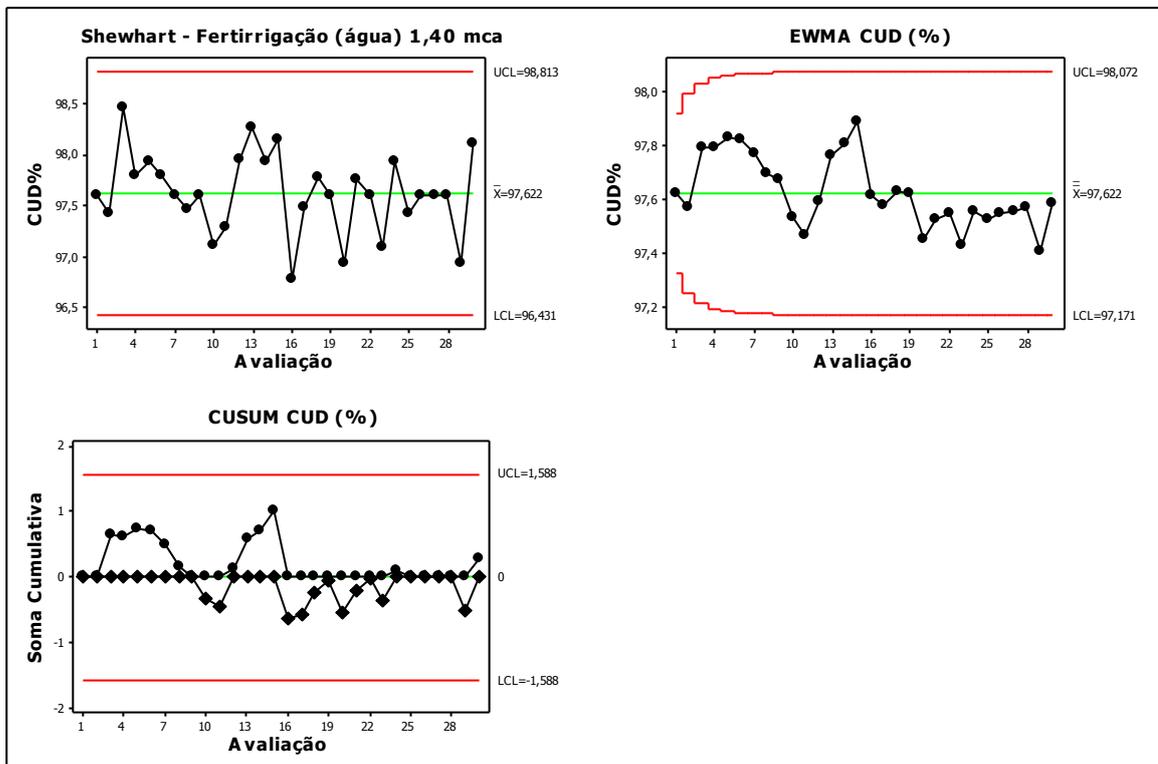


Figura 47 Gráficos de controle do CUD da Fertirrigação a 1,40 mca.

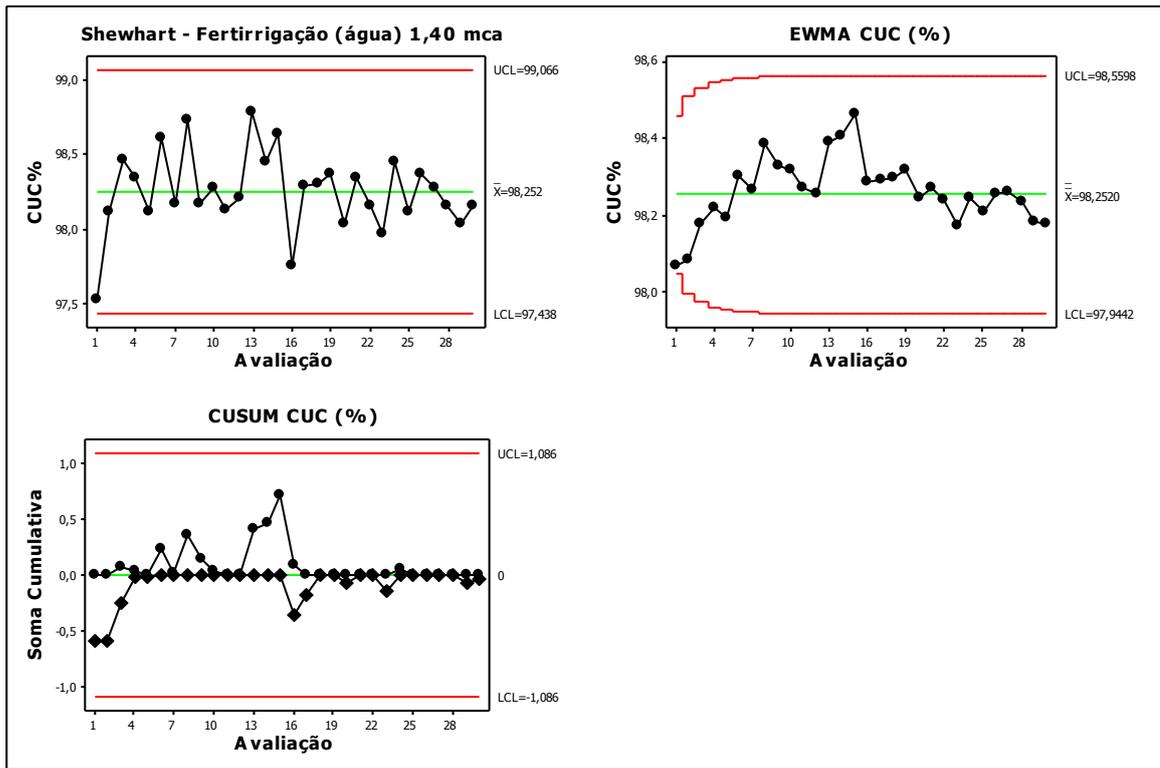


Figura 48 Gráficos de controle do CUC da Fertirrigação a 1,40 mca.

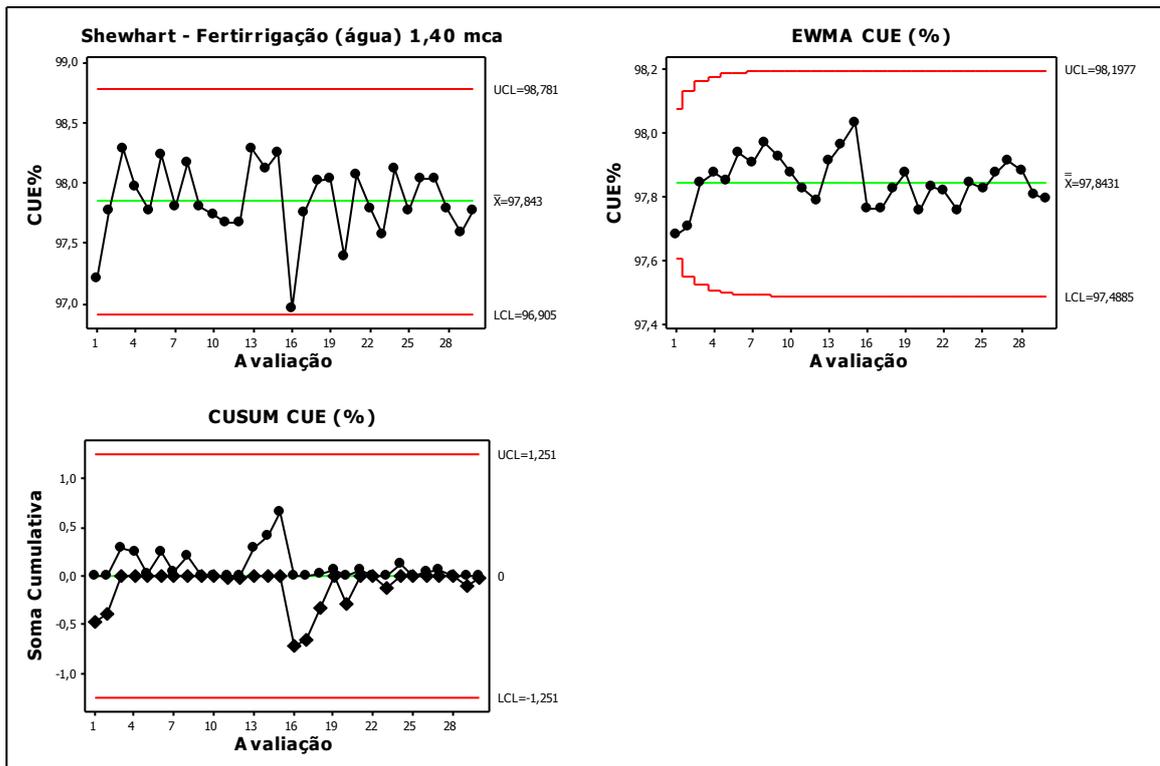


Figura 49 Gráficos de controle do CUE da Fertirrigação a 1,40 mca.

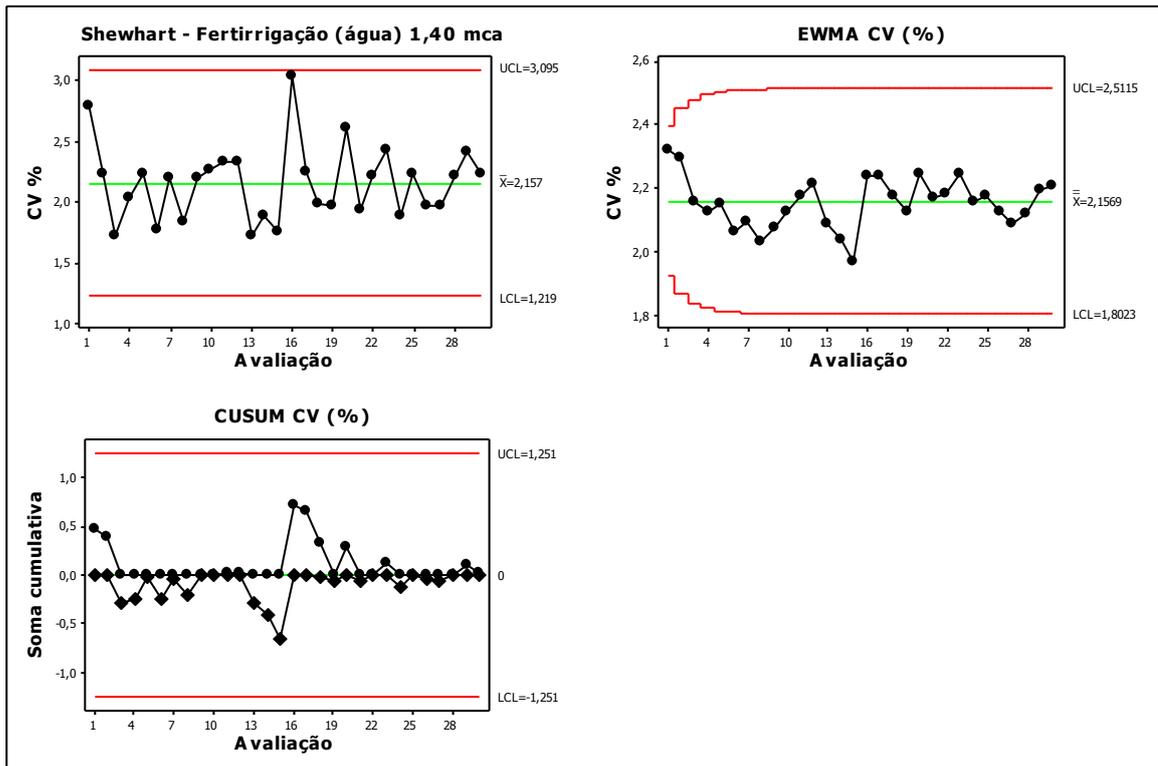


Figura 50 Gráficos de controle do CV da Fertirrigação a 1,40 mca.

Para a carga hidráulica de 1,40 mca, não houve a ocorrência de pontos fora dos limites de controle para nenhum dos casos, podendo assim confirmar que a uniformidade está sob controle na fertirrigação a 1,40 mca.

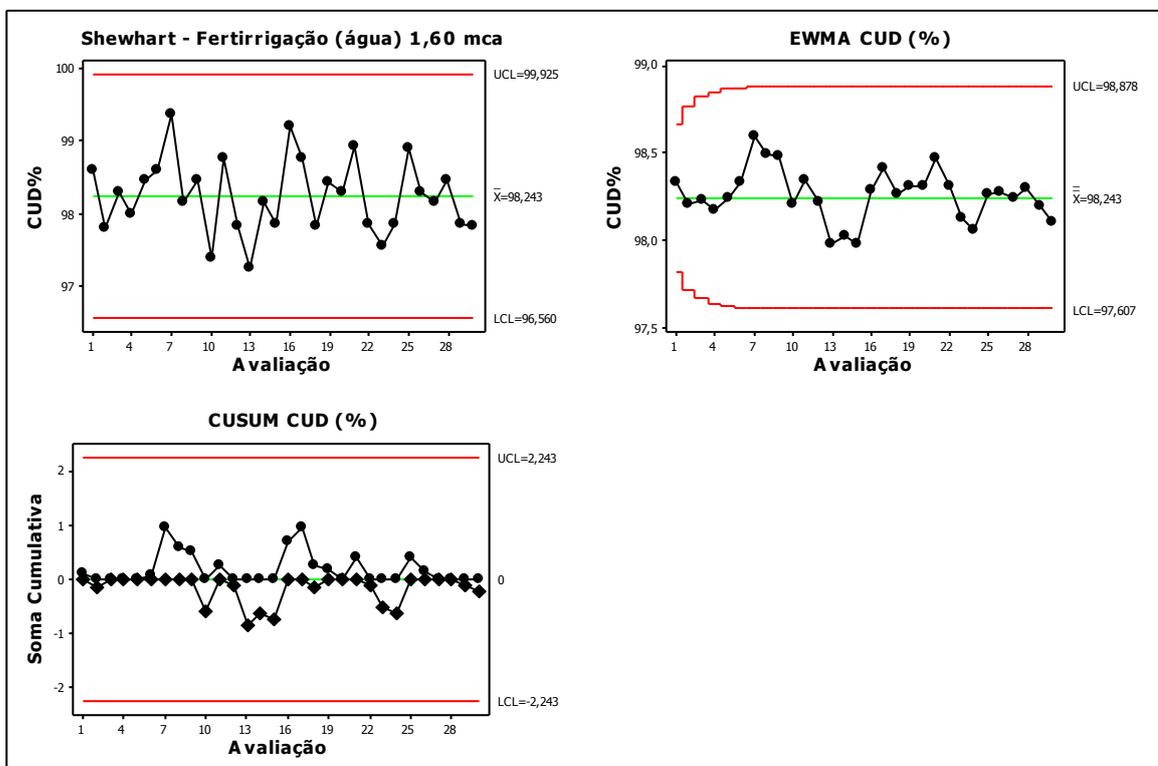


Figura 51 Gráficos de controle do CUD da Fertirrigação a 1,60 mca.

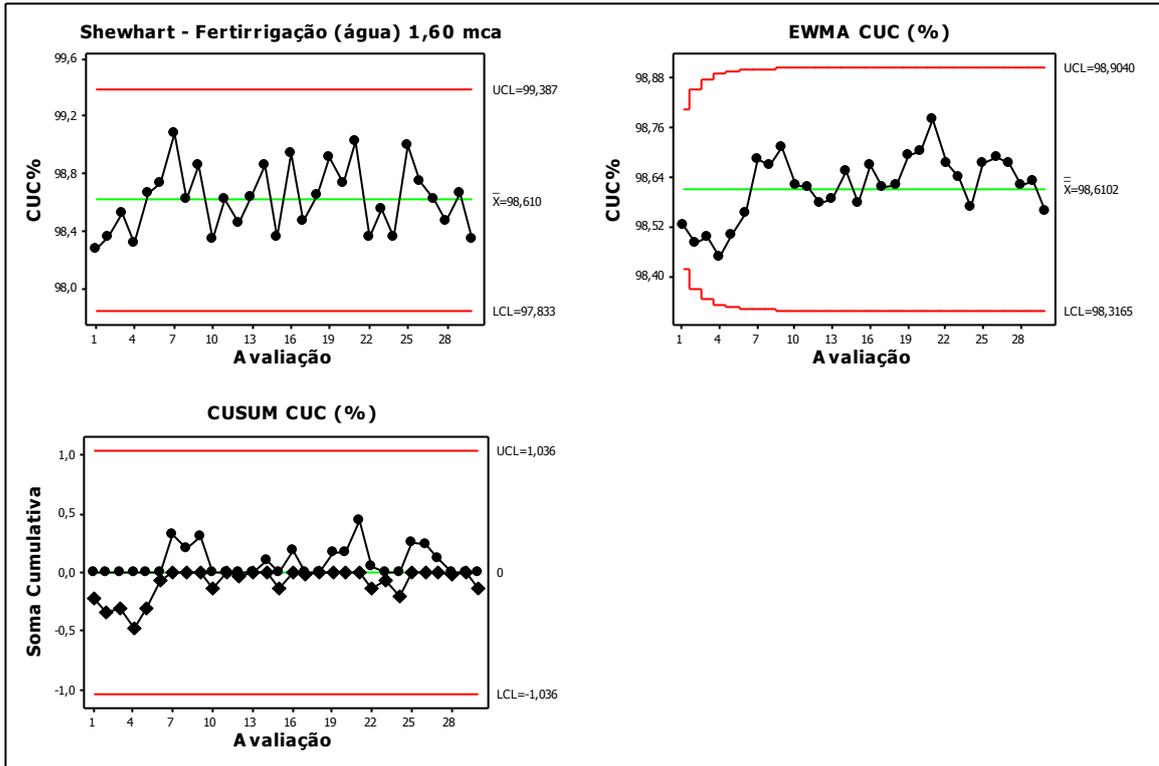


Figura 52 Gráficos de controle do CUC da Fertirrigação a 1,60 mca.

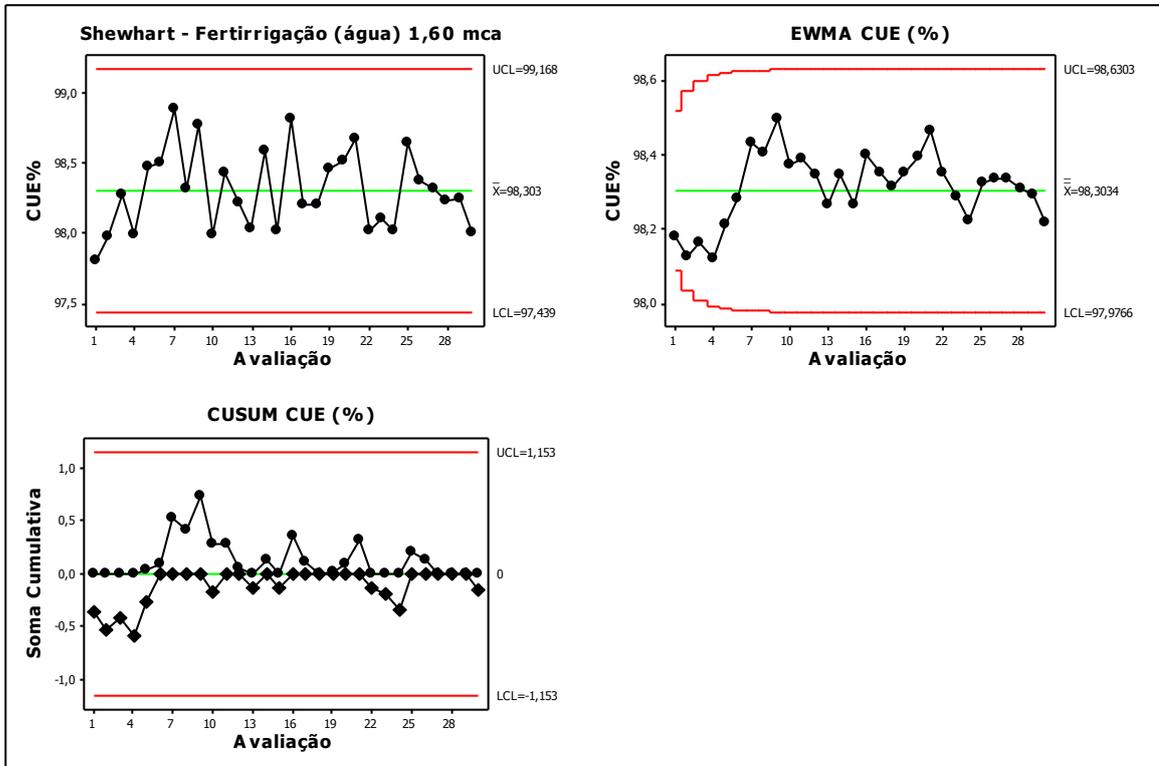


Figura 53 Gráficos de controle do CUE da Fertirrigação a 1,60 mca.

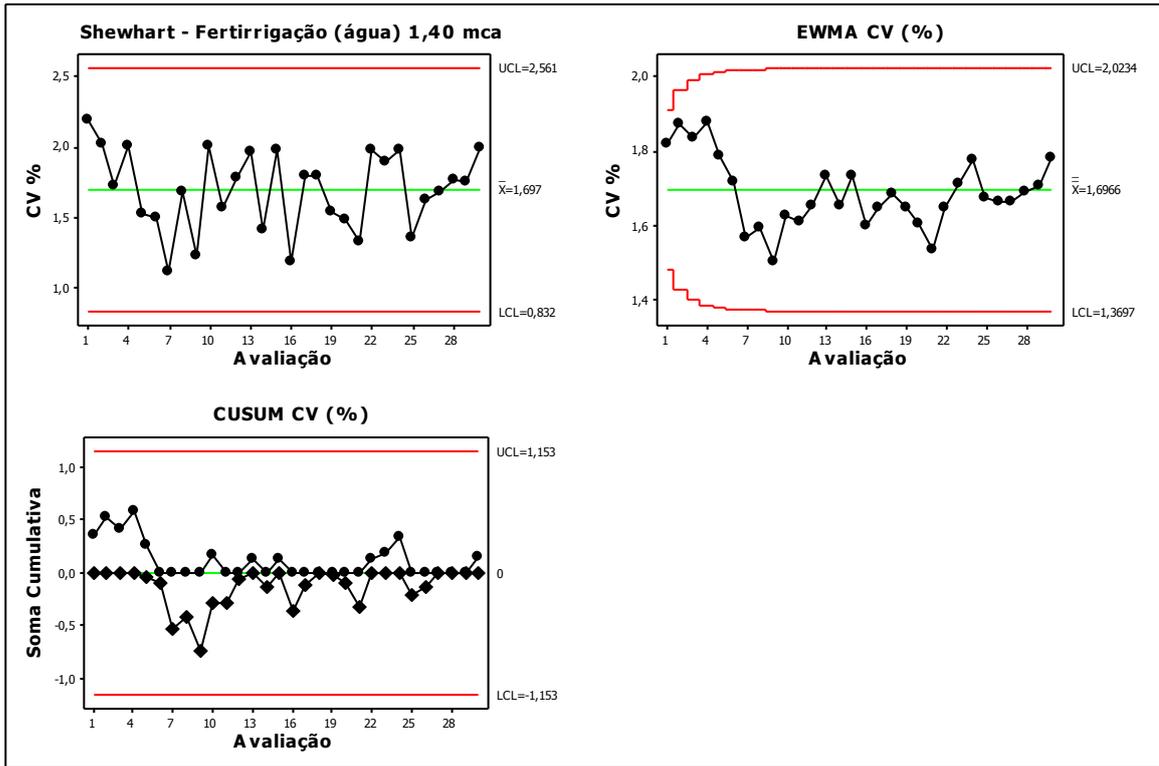


Figura 54 Gráficos de controle do CV da Fertirrigação a 1,60 mca.

Para a carga hidráulica de 1,60 mca, não houve a ocorrência de pontos fora dos limites de controle para nenhum dos casos, podendo assim confirmar que a uniformidade está sob controle na fertirrigação a 1,60 mca.

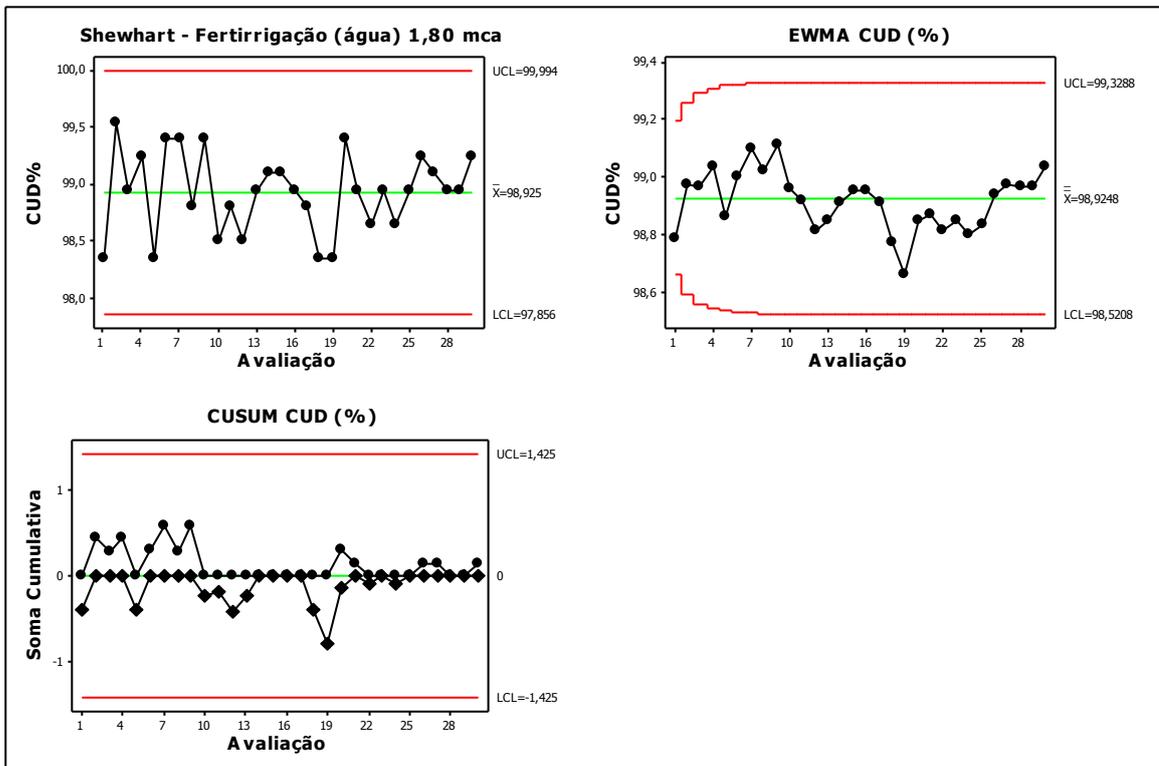


Figura 55 Gráficos de controle do CUD da Fertirrigação a 1,80 mca.

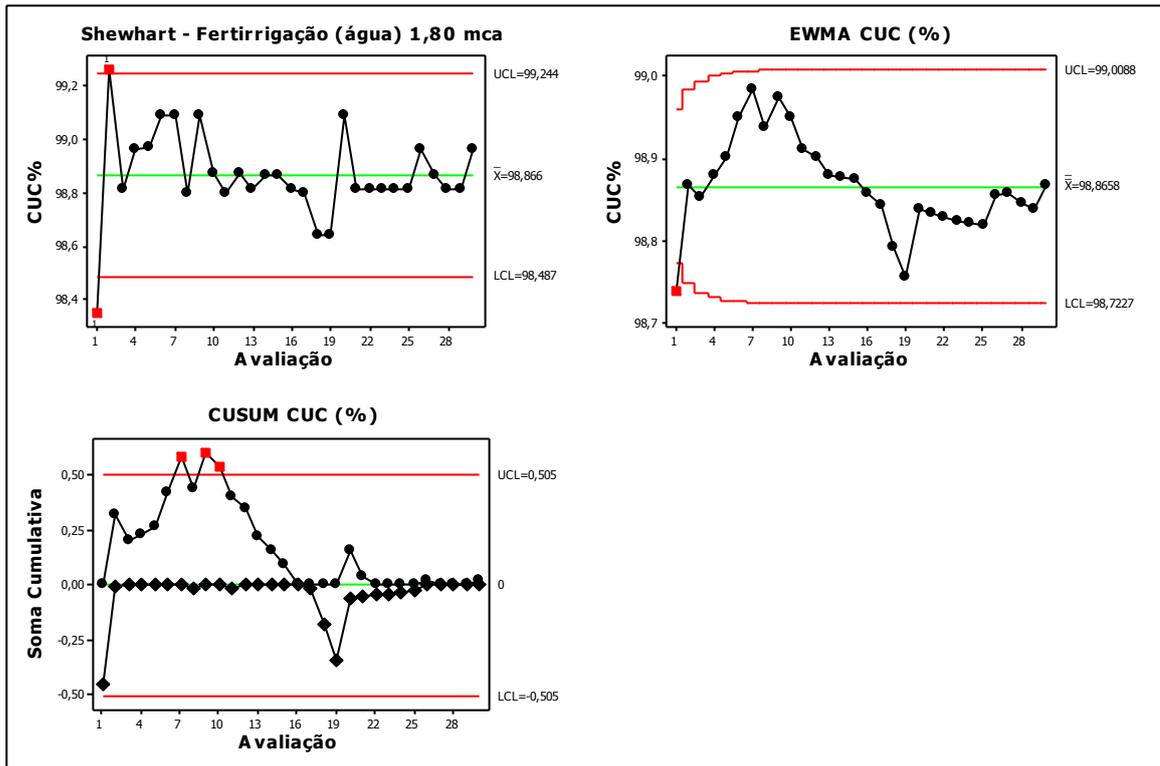


Figura 56 Gráficos de controle do CUC da Fertirrigação a 1,80 mca.

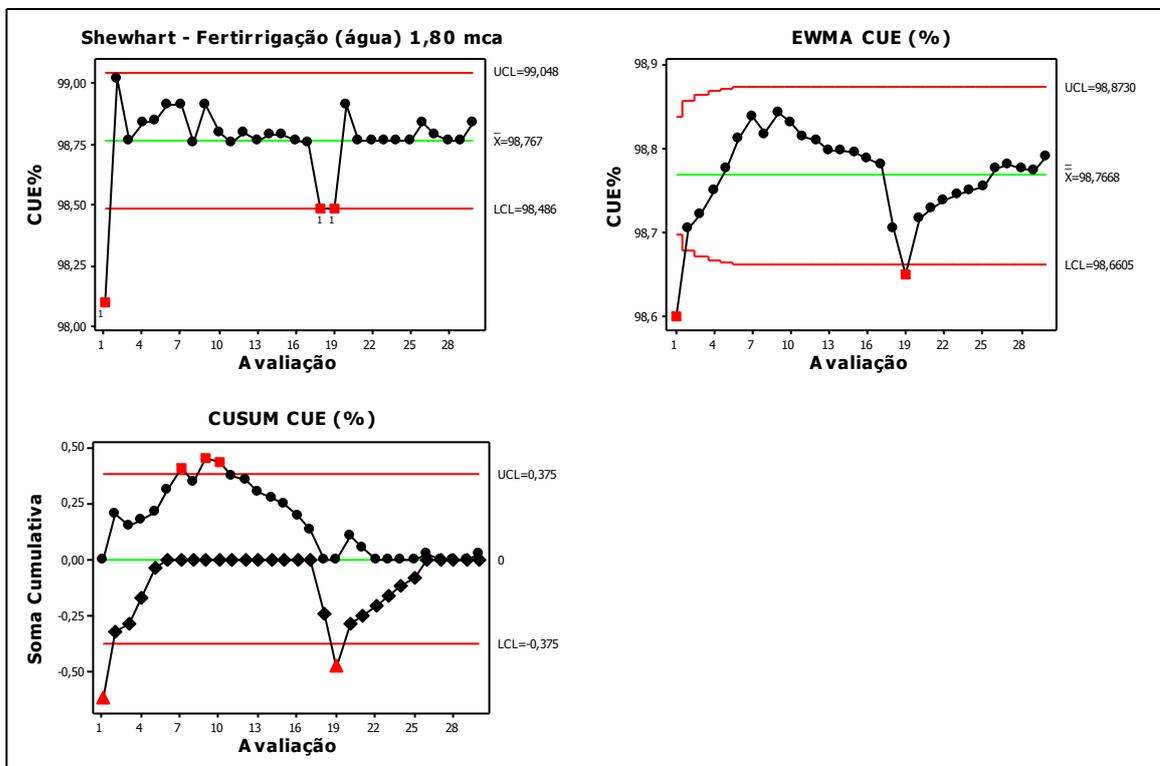


Figura 57 Gráficos de controle do CUE da Fertirrigação a 1,80 mca.

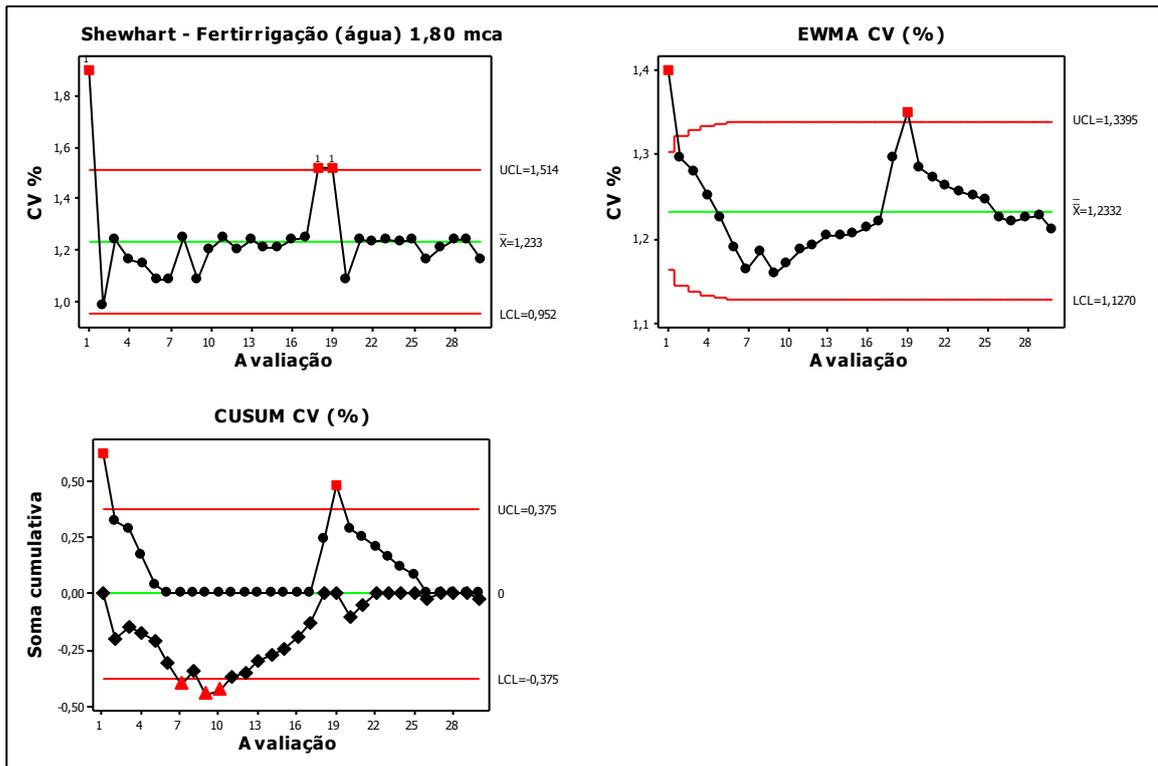


Figura 58 Gráficos de controle do CV da Fertirrigação a 1,80 mca.

Para a carga hidráulica de 1,80 mca, apenas o CUC não apresentou pontos fora dos limites de controle. Os demais coeficientes apresentaram pontos fora dos limites de controle em todos os gráficos, porém em nenhum dos casos existem eventos que caracterizem o descontrole da uniformidade. Isso pode ser comprovado através da análise do índice de capacidade de processo.

5.2.7. Capacidade de processo

Na Tabela 13 estão apresentados os devidos índices de capacidade de processo para a fertirrigação, de acordo com cada coeficiente de uniformidade e coeficiente de variação para cada carga hidráulica estudada. Assim, é possível dizer se a uniformidade do sistema de irrigação por gotejamento estudado é considerada adequada ou não, conforme os diferentes coeficientes utilizados, podendo estes ser mais ou menos rigorosos.

Tabela 13 Índices de capacidade de processo para fertirrigação

Coeficiente	CUD	CUC	CUE	CV	Pressão (mca)
CPi	2,67	8,29	5,43	3,91	1,2
CP					
CPi	6,4	10,13	8,36	5,33	1,4
CP					
CPi	4,9	11,08	9,6	5,78	1,6
CP					
CPi	8,35	23,42	31,19	17,19	1,8
CP					

A uniformidade do sistema foi considerada adequada em todos os casos, pois os índices de capacidade de processo pelo limite inferior, calculados para os coeficientes de uniformidade, estão todos acima de 1,33. O índice de capacidade de processo calculado para o coeficiente de variação também confirma a excelente uniformidade, pois se encontram acima de 1,25.

Zocoler et al. (2015), utilizando água salina para estudar a uniformidade de aplicação em sistema de irrigação por gotejamento, obteve valores de CPi abaixo de 1,06, sendo, ainda, que suas análises foram realizadas a curto prazo, o que sugere que o índice de capacidade de processo irá diminuir quando causas adicionais de variações acontecerem, como o entupimento de emissores.

De acordo com Hermes et al. (2013), o índice de capacidade de processo mostrou ser uma ferramenta aplicável para o diagnóstico da qualidade da fertirrigação, permitindo a avaliação de sua capacidade para manter níveis de uniformidade toleráveis.

6. CONCLUSÕES

De acordo com as análises realizadas, foi possível concluir que a vazão observada durante a fertirrigação foi menor do que a vazão durante a irrigação. A análise de regressão de melhor ajuste foi a quadrática (exponencial) e mostrou que quanto maior a carga hidráulica utilizada, maior será a vazão e a uniformidade de aplicação do sistema, sendo que os maiores valores de vazão e uniformidade foram encontrados para a carga hidráulica de 1,80 mca.

A uniformidade do sistema de gotejamento foi classificada como excelente de acordo com todos os coeficientes estudados (CUD, CUC e CUE) para a irrigação (água pura) e a fertirrigação (biofertilizante diluído em 50:1) em todas as cargas hidráulicas utilizadas (1,20, 1,40, 1,60 e 1,80 mca). O sistema ainda apresentou um baixo coeficiente de variação (CV) em todos os casos, confirmando a boa uniformidade.

Os mapas temáticos de contorno se mostraram totalmente funcionais como ferramenta para a análise de uniformidade, podendo estes indicar pontos onde existem possíveis alterações no comportamento do sistema, como entupimentos parciais ou totais dos emissores.

Os gráficos de controle se mostraram uma ótima ferramenta para conferir se a uniformidade de aplicação do sistema se mantém durante uma sucessão de eventos. O gráfico de controle de Shewhart para medidas individuais mostrou-se menos sensível a possíveis alterações, enquanto os gráficos de MMEP (média móvel exponencialmente ponderada) e CUSUM (soma cumulativa) se mostraram mais rigorosos, sendo este último o que apresentou mais sensibilidade a variações.

A partir do cálculo e classificação dos índices de capacidade de processo, pode-se verificar que a uniformidade do sistema estava adequada independente do caso (irrigação ou fertirrigação, coeficiente de uniformidade e variação, carga hidráulica).

Assim, pode-se concluir a partir deste trabalho que pode existir excelente uniformidade de aplicação em sistema de irrigação e fertirrigação por gotejamento utilizado em hortas urbanas.

A carga hidráulica indicada para um usuário de horta urbana é de 1,20 mca, pois assim o usuário economizaria com materiais e tornaria o manuseio do sistema mais fácil, possuindo ainda assim uma excelente uniformidade de irrigação.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para uma melhor afirmação sobre a qualidade da uniformidade de aplicação de sistemas de irrigação e fertirrigação por gotejamento, é necessária uma pesquisa que avalie o sistema durante um período maior, respondendo se há alterações significativas durante o tempo. Ainda, seria ideal que o sistema fosse de uma maior dimensão, possuindo maior representatividade.

No presente trabalho, um dos fatores limitantes para a metodologia proposta foi a vazão do sistema, uma vez que os reservatórios eram alimentados manualmente, pois a fonte de água era distante, e a própria vazão da fonte pode ser considerada pequena. Devido ao processo manual, outro fator que dificultou o processo foi a altura dos reservatórios, pois quanto mais alto, mais difícil se tornou alimentá-los.

8. REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2013**. Brasília, DF, 2013. 432 p. il.
- ANDRADE, M. G.; VILAS BOAS, M. A.; SIQUEIRA, J. A. C.; SATO, M.; DIETER, J.; HERMES, E.; MERCANTE, E. Uniformity microsprinkler irrigation system using statistical quality control. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 4, 2017.
- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 18^a ed., Washington, 1992.
- ASPTA. Subsídio para uma Política Nacional de Agricultura Urbana Periurbana (PNAUP). AS-PTA - **Agricultura Familiar e Agroecologia**. Rio de Janeiro, p. 15. 2015.
- BIZARI, D. R.; CARDOSO, J. C. Reuse water and urban horticulture: alliance towards more sustainable cities. **Horticultura Brasileira**, Brasília-DF, v. 34, p. 311-317, 2016.
- BORGES, R. C.; FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. Estudo do padrão de não-aleatoriedade seqüência no controle estatístico do processo. **Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2. p. 31-35, 2008.
- BORSSOI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; REISDORFER, M.; HERNANDEZ, R. H.; FOLLADOR, F. A. C. Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 4, p. 718-726, 2012.
- BRALTS, V.F. Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. (Ed.) **Trickle irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p.216-240. (Development in Agricultural Engineering, 9).
- CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, ano 22, n. 1, p. 115-127, 2013.
- CHRISTOFIDIS, D. Água na produção de alimentos: O papel da irrigação no alcance do desenvolvimento sustentável. **Revista de Ciências Exatas**, Taubaté, v. 12, n. 1, p. 37-46, 2006.
- COELHO, E. F., COSTA, F. S., SILVA, A. C. e CARVALHO, G. C. Concentração de nitrato no perfil do solo fertigado com diferentes concentrações de fontes nitrogenadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 263-269, 2014.
- CÓRCOLES, J. I.; JUAN, J. A.; ORTEGA, J. F.; TARJUELO, J. M. F.; MORENO, M. A. Fertigation in furrows and level furrow systems. I: model description and numerical tests. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware v. 138, n. 3, p. 225-234, 2012.
- CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, N. F.; MOURA, L. M. F.; TEIXEIRA, M. B.; GOMES FILHO, R. R. Variabilidade temporal da uniformidade de distribuição em sistema de gotejamento. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 4, p. 248-257, 2013.
- CUNHA F. N.; SILVA N. F.; TEIXEIRA M. B.; CARVALHO J. J.; MOURA L. M. F.; SANTOS C. C. Coeficientes de uniformidade em sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.8, p. 444-454, 2014.
- DE DEUS, F. P.; FERRAREZI, R. S.; PRIMO, R.; MARTINS, G. A.; TESTEZLAF, R. Susceptibilidade ao entupimento de um sistema de irrigação por gotejamento para agricultura familiar. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 102-112, 2015.

DIMA, S. J.; OGUNMOKUN, A. A.; NANTANGA, T. The Status of Urban and Peri-Urban Agriculture in Windhoek and Oshakati; **Food and Agriculture Organisation (FAO)**, Windhoek, Namibia, 2002.

FARAZ, A.; CHALAKI, K.; MOGHADAM, M. B. On the properties of the hotelling's T2 control chart with variable sampling intervals. **Quality and Quantity**, Netherlands, v. 24, p. 579-586, 2011.

FRIGO, J. P.; VILAS BOAS, M. A.; FRIGO, J. P.; FRIGO, E. P. Comparação entre gráficos de controle de Shewhart, CUSUM e MMEP no processo de irrigação por aspersão convencional. **Irriga**, Botucatu, Edição especial, v. 01, p. 56-70, 2016.

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

FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A.C.A.; HEBEL JÚNIOR, A. Produtividade do feijoeiro sob diferentes uniformidades de distribuição de água na superfície e na subsuperfície do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p.414-425, 2007.

HENNING, E.; WALTER, O. M. C. F.; SOUZA, N. S.; SAMOHYL, R. W. Um estudo para a aplicação de gráficos de controle estatístico de processo em indicadores de qualidade da água potável. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, Volume 9, Número 1, p. 2-13, 2014.

HERMES, E.; VILAS BOAS, M. A.; RODRIGUES, L. N.; MELO, E. L.; GONÇALVES, M. P.; LINS, M. A.; BERGER, J. S. Process capacity index in drip irrigation with cassava wastewater processing. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, p. 1427-1433, 2015.

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

HERMES, E.; VILAS BOAS, M. A.; GOMES, S. D.; GOMES, B. M.; REIS, C. F. Quality control in irrigation and fertigation with cassava processing wastewater into drip system. **International Journal of Food, Agriculture and Environment**, v.11, p.841-845, 2013.

JIMENEZ-BELLO, A. M.; MARTINEZ, F.; BOU, V.; BARTOLIN, H. Analysis, assessment, and improvement of fertilizer distribution in pressure irrigation systems. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 29, p. 45-53, 2011.

JUCHEN, C. R.; SUSZEK, F. L.; VILAS BOAS, M. A. Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuária agroindustriais. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 1, p. 243-256, 2013

JUSTI, A. L.; SAIZAKI, P. M. Desempenho da irrigação e fertirrigação avaliadas por controle estatístico de qualidade. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, v. 2, n.6, p. 541-551, 2015.

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

KELLER, J.; BLIESNER, R. D.; **Sprinkle and Trickle Irrigation**. Chapman Hall, Publishers, 1990, Utah State University, Copyright to 2009. 314 p.

- KELLER, J.; KARMELEI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 1975. 133p.
- KLEIN, M. R.; VILAS BOAS, M. A.; SUSZEK, F. L.; SZEKUT, F. D.; MELLO, E. L.; GOMES, B. M.; SILVA, B. B.; ZUCULOTTO, T. Fertigation quality with drip irrigation system in grape orchard by using the process capability index. **International Journal of Food, Agriculture and Environment**, v.13, p.179-183, 2015.
- LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84-94, 2014.
- LIU, F.; NRIAGU, J. O. Irrigation strategies for sustainable environmental and influence on human health. **Encyclopedia of Environmental Health**, Ed.; Elsevier: Burlington, NY, USA; p. 297-303, 2011.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2a. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MANTOVANI, E. C. **AVALIA**: Programa de avaliação da irrigação por aspersão e localizada. Viçosa, MG: UFV, 2001.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação Princípios e Métodos**. 2a. edição. Viçosa-MG: UFV, 2007.
- MEDEIROS, C. B. N.; SILVA, M. L. P.; ATAÍDE, R. M. da C. As hortas urbanas como uma contribuição às cidades sustentáveis: o caso do Gramorezinho em Natal/RN. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, [S.l.], v. 3, n. 8, 2015.
- MERCANTE, E.; VILAS BOAS, M. A.; SILVA, B. B.; KLEIN, M. R. Utilização de gráficos de controle estatístico na irrigação. **Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, Volume Especial, 2014.
- 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. 513 p.
- NASCIMENTO, J. M. S.; LIMA, L. A.; CARARO, D. C.; CASTRO, E. M.; SILVA, M. V. G. Avaliação da uniformidade de aplicação de água em um sistema de gotejamento para pequenas propriedades. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n.spe, p. 1728-1733, 2009.
- OLIVEIRA, V. A. M.; VILLAS BÔAS, R. L. Uniformidade de distribuição do potássio e do nitrogênio em sistema de fertirrigação por gotejamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p.95-103, 2008.
- PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONCA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 465-473, 2000.
- PIMENTEL GOMES. **Curso de estatística experimental**. 14a. ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. p.477.
- RIBEIRO, P. A. de A.; TEIXEIRA, M. B.; COELHO, R. D.; FRANCO, E. M.; SILVA, N. F. da; CARVALHO, L. C. C. de; ALVES, M. E. B. Gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA**, Botucatu, Edição Especial, p. 368-379, 2012.

RICARTE-COVARRUBIAS, J. D.; FERRAZ, J. M. G.; BORGES, J. R. P. Segurança alimentar através da agricultura urbana: um estudo de caso em duas comunidades de baixa renda em Porto Ferreira/SP. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 3, p. 62-80, 2011.

ROCHA, C. T. D.; CHRISTOFIDIS, D. Vantagens da opção pela agricultura irrigada. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, ano 24, n. 2, p. 17-25, 2015.

RUSSO, T.; ALFREDO, K.; FISHER, J. Sustainable water management in urban, agricultural, and natural systems. **Water**, v. 6, p. 3934-3956, 2014.

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

SANTOS, M. A. L.; SANTOS, D. P.; SILVA, D. S.; SILVA, M. S.; CAVALCANTE, P. H. S. Avaliação da uniformidade de distribuição de um sistema de irrigação por gotejamento em inhame (*Dioscoreacayennensis* L.). **Revista Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 13, n. 1, p. 7-12, 2015.

SILVA, A. O.; KLAR, A. E.; SILVA, E. F. F. Manejo da fertirrigação e salinidade do solo no crescimento da cultura da beterraba. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, p. 230-241, 2015.

SOUZA, L. M.; JÚNIOR, J. I. R.; REIS, G. M.; IDE, M. S. Eficiência dos gráficos de controle XBARRA, EWMA e CUSUM. **Eletrônica & Engenharia**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 81-94, 2008.

SOUZA, R. S.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, G. S. Produção e qualidade comercial de alface fertirrigada com nitrogênio e potássio em ambiente protegido. **Ceres**, v. 64, n. 2, 2017.

SOUZA, T. R.; VILLAS BÔAS, R. L.; QUAGGIO, J. A.; SALOMÃO, L. C.; FORATTO, L. C. Dinâmica de nutrientes na solução do solo em pomar fertirrigado de citros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 846-854, 2012.

TOLENTINO JÚNIOR, J. B.; MARINHO, L. B.; SOUZA, C. F.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de um modelo numérico para modelagem do bulbo molhado em irrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, Edição especial 1, p.11-20, 2014.

WARD, J. D.; WARD, P. J.; SAINT, C. P.; MANTZIORIS, E. The urban agriculture revolution: Implications for water use in cities. **Journal of Australian Water Association**, v. 41, p. 69-74, 2014.

WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2006.

ZOCOLER, J. L.; RIBEIRO, P. H. P.; CUNHA, F. N.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com aplicação de água salina. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, 20 anos Irriga + 50 anos FCA, p. 234-247, 2015.