

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**

**TESE DE DOUTORADO**

**QUALIDADE DO PROCESSO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR**  
**GOTEJAMENTO COM DIFERENTES ÁGUAS E DECLIVIDADES DA LINHA**  
**LATERAL**

**FLAVIO DANIEL SZEKUT**

**Lembrete:**

**DEFESA DA TESE**

**Flavio Daniel Szekut**

**27/03/2018**

**Terça-Feira, 9:00 h, auditório do**

**Bloco CM**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**Março - 2018**

**FLAVIO DANIEL SZEKUT**

Engenheiro Agrícola

**QUALIDADE DO PROCESSO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR  
GOTEJAMENTO COM DIFERENTES ÁGUAS E DECLIVIDADES DA LINHA  
LATERAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola na área de concentração: Irrigação e Drenagem.

**Orientador:** Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo

Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas

**CAMPINA GRANDE - PB**

Março - 2018

**PARECER FINAL**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida concedida e proteção diária. Ns<sup>a</sup> Aparecida pela benção e intercessão.

A Universidade Federal de Campina Grande, em especial a coordenação de Pós Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade da realização do Curso. Estendendo-se a Coordenadora Prof. Dr. Vera Lucia Antunes de Lima, e secretários Dona Cida, Seu Gilson e Roberto.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo pela orientação, paciência, estímulo, amizade durante a realização do curso. Ao apoio e autorização para que o experimento fosse realizado na Unioeste.

A Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) que possibilitou por meio da estrutura física a realização do experimento. Também pela disponibilidade do docente e Co-orientador, Prof. Marcio Antônio Vilas Boas, este que é um exemplo de pesquisador e compartilhou seu conhecimento e amizade.

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

Aos examinadores e colaboradores Prof<sup>as</sup>. Dr<sup>as</sup>. Vera L. A. de Lima (UAEA/CTRN/UFCG), Prof. Dr. José Dantas Neto (UAEA/CTRN/UFCG), Dr. Antônio Filho Fernandes Monteiro (UEPB) e Dr. Salomão de Sousa Medeiros (INSA).

A todos os docentes do curso pelo compartilhamento do conhecimento nas maravilhosas aulas ministradas.

A direção, docentes e discentes do curso de agronomia Unisep, pelo apoio por meio do plano de carreira da instituição e flexibilidade de horários para o desenvolvimento da pesquisa, congressos e compromissos perante a Copeag.

Aos amigos de convivência, trabalho e pesquisa Márcio Roberto Klein, Maycon Diego Ribeiro, Elysson Marcks Gonçalves Andrade, Silvanete Silva, Felipe Batista de Oliveira, Claudia Facini Reis, Marcelo Dotto e Thiago Zuculotto pela ajuda em todos os momentos.

A minha família, que apesar de todas as dificuldades de saúde, não mediu esforços em apoiar, incentivar e acreditar na formação intelectual, meus pais Clemente Daniel Szekut e Ansília Szekut, e irmão Vânio José Szekut.

Minha esposa Eduarda Marinho Vasconcelos pela paciência e incentivo nos momentos mais difíceis.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização dessa pesquisa. Muito Obrigado.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| Lista de Figuras .....   | vi        |
| Lista de Tabelas .....   | viii      |
| <b>RESUMO.....</b>   | <b>ix</b> |
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>x</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1. QUALIDADE DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO: ESTADO DA ARTE.....</b>                                 | <b>11</b> |
| Resumo .....   | 11        |
| Introdução.....  | 12        |
| Pesquisa bibliográfica.....  | 13        |
| Vantagens e desvantagens na agricultura irrigada por gotejamento.....  | 13        |
| Economia de água .....   | 13        |
| Uniformidade de distribuição de água e fertilizantes .....   | 13        |
| Entupimento de gotejadores.....  | 14        |
| Custo e viabilidade econômica .....  | 15        |
| Uniformidade de aplicação de água .....  | 16        |
| Coeficientes de uniformidade .....   | 16        |
| Uniformidade de aplicação com diferentes águas .....   | 16        |
| Grau de entupimento.....   | 17        |
| Interferências dos materiais e do projeto na qualidade da irrigação.....                                       | 18        |
| Gotejadores e materiais diversos .....   | 18        |
| Interferência topográfica.....   | 19        |
| Mecanismos de avaliação .....  | 20        |
| Metodologias de coleta de dados .....  | 20        |
| Processamento e interpretação dos dados .....  | 20        |
| Gráficos de controle de qualidade aplicados à irrigação .....  | 21        |
| Considerações Finais .....   | 22        |
| Referências Bibliográficas.....  | 23        |
| <b>CAPÍTULO 2: CONTROLE DE QUALIDADE HIDRÁULICO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA ENSAIOS COM GOTEJADORES.....</b> | <b>30</b> |
| Resumo .....   | 30        |
| Introdução.....  | 31        |
| Material e Métodos.....  | 32        |

|  |           |
|--|-----------|
| Resultados e Discussão.....  | 34        |
| Conclusão .....  | 41        |
| Referências Bibliográficas.....  | 42        |
| <b>CAPÍTULO 3: DESEMPENHO HIDRÁULICO DE GOTEJADORES COM<br/>DIFERENTES ÁGUAS E DECLIVIDADES DA LINHA LATERAL .....</b>           | <b>44</b> |
| Resumo .....   | 44        |
| Introdução.....  | 45        |
| Material e Métodos.....  | 45        |
| Resultados e Discussão.....  | 48        |
| Conclusão .....  | 53        |
| Referências Bibliográficas.....  | 53        |
| <b>CAPÍTULO 4: CONTROLE DE QUALIDADE MULTIVARIADO APLICADO NO<br/>DESEMPENHO HIDRÁULICO DE LINHAS LATERAIS GOTEJADORAS .....</b> | <b>56</b> |
| Resumo .....   | 56        |
| Introdução.....  | 57        |
| Material e Métodos.....  | 58        |
| Resultados e Discussão.....  | 61        |
| Conclusão .....  | 67        |
| Referências Bibliográficas.....  | 68        |
| Apêndice A – Decomposição pela distribuição f .....  | 71        |
| Anexo I.....   | 73        |
| Anexo II.....  | 74        |
| Fotos .....  | 75        |

## LISTA DE FIGURAS

### **CAPÍTULO 2: CONTROLE DE QUALIDADE HIDRÁULICO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA ENSAIOS COM GOTEJADORES**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Corte transversal da bancada de testes com os pontos de coleta 1 e 2.....   | 32 |
| Figura 2. Gráfico de controle de qualidade para os valores de coeficiente de uniformidade de distribuição (A) e o coeficiente de uniformidade de emissão (B).....                         | 35 |
| Figura 3. Gráficos de controle estatístico para as pressões obtidas do sistema de bombeamento, pressão inicial de 80 kPa (A), 100 kPa (B), 120 kPa (C), 140 kPa (D) e 160 kPa (E).....    | 37 |
| Figura 4. Gráficos de controle estatístico para as vazões obtidas do sistema de bombeamento, para pressão inicial de 80 kPa (A), 100 kPa (B), 120 kPa (C), 140 kPa (D) e 160 kPa (E)..... | 38 |
| Figura 5. Curva característica de funcionamento da bancada de testes .....  | 39 |
| Figura 6. Gráficos de controle de qualidade para as pressões obtidas na bancada de testes; pressão inicial de 40 kPa (A), 60 kPa (B), 80 kPa (C) e 100 kPa (D).....                       | 40 |
| Figura 7. Gráficos de controle de qualidade para as vazões obtidas na bancada de testes; pressão inicial de 40 kPa (A), 60 kPa (B), 80 kPa (C) e 100 kPa (D).....                         | 41 |

### **CAPÍTULO 3: DESEMPENHO HIDRÁULICO DE GOTEJADORES COM DIFERENTES ÁGUAS E DECLIVIDADES DA LINHA LATERAL**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Desenho ilustrativo da bancada de testes utilizada .....   | 46 |
| Figura 2. Gráficos de controle de qualidade das vazões dos gotejadores submetidos a irrigação com água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro de aves para as linhas laterais com declividades em declive (A), em nível ..... | 51 |

## **CAPÍTULO 4: CONTROLE DE QUALIDADE MULTIVARIADO APLICADO NO DESEMPENHO HIDRÁULICO DE LINHAS LATERAIS GOTEJADORAS**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Desenho ilustrativo da bancada de testes utilizada .....   | 58 |
| Figura 2. Gráficos de controle de qualidade multivariado com efluente de fecularia para Aclive (A), Nível (B) e Declive (C).....                   | 63 |
| Figura 3. Gráficos de controle de qualidade multivariado para água limpa em gotejadores em Aclive (A), Nível (B) e Declive (C) .....               | 64 |
| Figura 4. Gráficos de controle de qualidade multivariado para água com fertilizantes em gotejadores em Aclive (A), Nível (B) e Declive (C).....    | 65 |
| Figura 5. Gráficos de controle de qualidade multivariado efluente de abatedouro de aves em gotejadores em Aclive (A), Nível (B) e Declive (C)..... | 66 |



## LISTA DE TABELAS

### **CAPÍTULO 2: CONTROLE DE QUALIDADE HIDRÁULICO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA ENSAIOS COM GOTEJADORES**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Estatística descritiva para as vazões e os valores médios dos coeficientes de uniformidade.....   | 34 |
| Tabela 2. Estatística descritiva das vazões e pressões no ponto de coleta 2 do sistema de bombeamento ..... | 36 |

### **CAPÍTULO 3: DESEMPENHO HIDRÁULICO DE GOTEJADORES COM DIFERENTES ÁGUAS E DECLIVIDADES DA LINHA LATERAL**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Parâmetros físico-químicos analisados para a água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro .....   | 48 |
| Tabela 2. Análise descritiva das vazões e os limites de controle para água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro de aves para declividades da linha lateral em aclave, em nível e em declive..... | 49 |
| Tabela 3. Análise de variância para o tipo de água e declividade da linha lateral .....   | 50 |
| Tabela 4. Desdobramentos da interação e comparação de médias para a declividade da linha lateral e os tipos de água.....  | 50 |

### **CAPÍTULO 4: CONTROLE DE QUALIDADE MULTIVARIADO APLICADO NO DESEMPENHO HIDRÁULICO DE LINHAS LATERAIS GOTEJADORAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1. Parâmetros físico-químicos analisados para a água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro .....                      | 61 |
| Tabela 2. Estatística descritiva para os valores de vazão, coeficiente de variação (CV), coeficiente de distribuição (CUD) e variação da taxa de descarga (Dra)..... | 62 |

## QUALIDADE DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO COM DIFERENTES ÁGUAS E DECLIVIDADES DA LINHA LATERAL

**Resumo:** A irrigação por gotejamento tem como característica principal a distribuição de água de forma localizada, diretamente no sistema radicular da cultura. Suas características físicas de aplicação permitem realizar uma distribuição uniforme de água e/ou fertilizantes, se utilizado o sistema para fertirrigação. Muitas pesquisas propõe o uso de fontes hídricas alternativas, como as águas residuárias ou efluentes, buscando o reaproveitamento de nutrientes com o aporte no solo, destinação pós-tratamento ou por ser um recurso abundante e perene, característica importante principalmente para regiões áridas. Os mecanismos de aplicação de água na irrigação por gotejamento tem interferência por inúmeros fatores, como a qualidade da água utilizada e as características de projeto, dentre eles destaca-se o tipo de gotejador e topográfica da área. O objetivo da pesquisa foi verificar a qualidade da irrigação com águas de fontes hídricas alternativas, alterando a declividade da linha lateral gotejadora. Para a verificação foi utilizada além dos coeficientes de uniformidade, os gráficos de controle de qualidade, esta que é uma ferramenta estatística de utilização para monitoramento da qualidade em processos. Para a pesquisa foi montada uma bancada de testes em laboratório e para sua utilização foi sugerida uma metodologia para aferir sua capacidade de obtenção de dados. Os resultados obtidos demonstraram que a bancada pode ser utilizada para testes em gotejadores, preferencialmente para as pressões de 60 e 80 kPa, valores que não obtiveram pontos fora de controle e mantiveram a aleatoriedade. As linhas laterais gotejadores apresentaram diferença significativa para os valores de vazão entre a declividade da linha e a aplicação de águas com parâmetros de qualidade variada, desta maneira foi verificado que a água com qualidade inferior interfere nas vazões dos gotejadores independente da variação de pressão proporcionada pela declividade da linha lateral. A utilização da estatística de controle de qualidade, univariada ou multivariada, demonstraram ser uma ferramenta sensível à alteração dos valores de vazão e uniformidade de aplicação, se concretizando como uma alternativa a grande geração de dados de monitoramento automatizado. Com a utilização desta estatística foi identificado a capacidade do sistema modificar a vazão médias dos gotejadores uniformemente, sem alterar os coeficientes de aplicação.

Palavras-chave: Efluente de fecularia, fertirrigação, gráficos de Shewart, T<sup>2</sup> Hotelling

## INTRODUÇÃO

A distribuição de água por sistemas de irrigação por gotejamento tem a maior uniformidade de aplicação. Isto se deve pelo seu mecanismo de distribuição que é composto por linhas laterais, de derivação, principal, sistema de bombeamento até os gotejadores utilizados (Bernardo et al., 2006).

Para a aplicação de águas residuais ou com parâmetros de qualidade inferior o sistema por gotejamento é indicado por proporcionar a redução dos contaminantes na parte aérea da planta e nos colaboradores de campo (Feitosa et al., 2011).

A aplicação de águas residuárias, exemplo de água de qualidade inferior, tem como justificativa a escassez de água com boa procedência, rendimento das culturas e o aumento de nutrientes no solo (Singh et al., 2012), diminuição de água residual no meio ambiente visto por Alobaidy et al. (2010) e a diminuição da poluição subterrânea (Muyen et al., 2011). Contudo, o entupimento do sistema é uma problemática e que pode restringir a aplicação ou alterar a uniformidade de aplicação e a popularização desta tecnologia de utilização de águas residuárias (Li et al., 2013).

A topográfica da área ou declividades das linhas laterais também interferem na aplicação pela variação da pressão interna, segundo Clark et al. (2007) a pressão em uma linha lateral em declive tende a diminuir até atingir um valor mínimo e depois aumenta devido ao ganho pela depressão do terreno. Para sistemas não autocompensantes esta variação pode ser significativa.

Os valores de uniformidade, indicados pelos coeficientes de uniformidade, são parâmetros de qualidade utilizados amplamente (Cunha et al., 2014). Esta avaliação realizada pelos coeficientes é de forma espacial (Mantovani et al., 2009), pela obtenção dos valores de vazão em gotejadores escolhidos no sistema.

Uma opção para o monitoramento de forma temporal dos sistemas de irrigação é a utilização da estatística de controle de qualidade. Sua utilização já foi comprovada na irrigação e fertirrigação (Klein et al., 2015; Justi & Saizaki, 2015) e na utilização de águas residuárias (Hermes et al., 2013; Juchen et al., 2013).

Com os inúmeros fatores que interferem na irrigação, as formas de monitoramento devem ser precisas para obter parâmetros e melhorar as decisões em prol da qualidade da irrigação. Em sistemas automatizados de obtenção de informações, na qual gera um grande número de dados para processamento e interpretação, a estatística de qualidade por meio dos gráficos de controle, verifica se os valores das variáveis respostas estão fora de controle estatístico ou proporcionam padrões não aleatórios (Montgomery, 2016).

Tendo em vista essas características apresentadas a pesquisa tem como objetivo verificar a qualidade da irrigação por gotejamento submetido ao uso de água limpa de abastecimento, água com fertilizantes nitrogenados, efluente do processamento de mandioca e efluente de abatedouro de aves, alterando a declividade da linha lateral gotejadora. Para isto foi construída uma bancada de testes e verificada sua capacidade de obtenção de dados por uma nova metodologia de validação.

Para as avaliações foram utilizados além dos coeficientes de uniformidade e a variação da taxa de descarga, a estatística de controle de qualidade por meio dos gráficos de controle univariados e multivariados.

## **CAPÍTULO 1. QUALIDADE DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO: ESTADO DA ARTE**

**Resumo:** A irrigação por gotejamento em comparação com os demais sistemas obtém a melhor uniformidade de distribuição, chegando a patamares de 90%. Existem inúmeras variáveis que interferem nesta distribuição, como o layout do projeto a campo, o modelo dos gotejadores utilizados, a qualidade físico-química da água aplicada, a forma de pressurização e a topografia da área. A manutenção dessa uniformidade requer além de um manejo anti-entupimento, o monitoramento das variáveis que interferem na aplicação. Para as avaliações geralmente são obtidos as vazões dos gotejadores escolhidos no sistema e realizado o cálculo dos coeficientes de uniformidade, porém com ascensão dos mecanismos automatizados de coleta de dados, novos sistemas de monitoramento da qualidade devem ser propostos. O objetivo desta pesquisa bibliográfica é evidenciar as características de interferência na qualidade de irrigação e apresentar as formas de monitoramento, entre eles à estatística de controle de qualidade. Foi observado no estudo que a qualidade da irrigação por gotejamento é afetada principalmente pela obstrução dos gotejadores, de forma parcial ou total. Esta causa é maximizada por outros fatores como o tipo e formato do gotejador e a água usada. Para a manutenção da qualidade da irrigação, a estatística de controle permite reconhecer falhas na irrigação em uma forma temporal, e com isto proporcionar ações preventivas ou corretivas antecipadas. Tendo em vista as características apresentadas na revisão, é possível estabelecer que a infinidade de variáveis atuantes para afetar o sistema de irrigação requer procedimentos mais precisos de supervisão além dos convencionais. Baseado nisso a estatística de controle de qualidade é uma forma eficaz para monitorar a qualidade de sistemas de irrigação por gotejamento submetidos ao uso com diferentes águas e layouts.

**Palavras-Chave:** Uniformidade de irrigação, obstrução de gotejadores, controle de qualidade,

## INTRODUÇÃO

A irrigação por gotejamento tem como vantagem principal a economia de água, pela aplicação diretamente no sistema radicular da cultura. Estes sistemas com alta eficiência de aplicação são os preferenciais segundo Christofidis (2013), tendo em vista o aumento da irrigação no Brasil e a utilização das reservas hídricas.

A qualidade da irrigação, termo baseado na qualidade de processos industriais, indica uma forma mais ampla de monitoramento dos sistemas. Este monitoramento é necessário devido ao grande volume de dados gerados por sistemas automatizados que estão em plena ascensão e a utilização de águas com qualidade físico-química inferior.

Usualmente o acompanhamento da qualidade da irrigação é feita por meio do cálculo dos coeficientes de uniformidade de aplicação ou da variação da taxa de descarga dos gotejadores (Zhou et al., 2013; Cunha et al., 2014). Estes coeficientes são uma forma numérica de representar a eficácia de distribuição de água pelos sistemas. Diversos autores classificam o sistema de acordo com os resultados obtidos por estes coeficientes.

Estes indicadores de uniformidade tem interferência de diversos fatores, entre eles a principal desvantagem da irrigação localizada, a obstrução dos gotejadores (Ahmed et al., 2007), que pode ser de origem física, química e biológica dependente do tipo de água utilizado. A redução do fluxo de saída dos gotejadores pode ser total ou parcial, dependente do potencial obstrutivo das condições locais.

Outras fontes de variação na uniformidade podem ser descritas, como o formato da área Baiamonte (2017), a declividade (Ella, Reyes e Yoder, 2009), o tipo de gotejadores (Dalri et al., 2015), a utilização de fertilizantes e pressão de serviço (Klein et al., 2015).

O monitoramento da vazão de pontos escolhidos no sistema com posterior cálculo da uniformidade de aplicação, podem obter conclusões inadequadas por não considerar a variação no tempo. A avaliação com a estatística de controle de qualidade identifica pontos plotados fora de limites estatísticos de qualidade além da identificação de padrões não aleatórios (Montgomey, 2016) no tempo.

O objetivo desta revisão bibliográfica foi apresentar as características de interferência na qualidade da irrigação e as formas de monitoramento usadas para aferir o desempenho dos sistemas de irrigação por gotejamento. Além disto, discutir sobre a aplicação da ferramenta estatística de controle de qualidade.

## PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

### **Vantagens e desvantagens na agricultura irrigada por gotejamento**

#### Economia de água

A agricultura tida como maior consumidora de água universal, impõe ao Brasil ter uma maior responsabilidade hídrica. Entre as características para que haja comprometimento estão à educação ambiental, políticas de gerenciamento, geopolítica integrada, economia e uso eficiente, além de garantir a segurança qualitativa e quantitativa dos mananciais (Ribeiro, 2017).

A irrigação compõe-se por um conjunto de técnicas com o objetivo de suprir a demanda de água de uma cultura. Sua utilização é crescente e com isto deve ser acompanhada pelo uso de sistemas mais eficientes, adaptados a culturas com maior retorno e ao uso racional dos recursos hídricos e de energia. (Christofodis, 2013).

Um dos sistemas do método de irrigação localizada, o gotejamento tem como principal vantagem aplicar água diretamente no sistema radicular da cultura com alta frequência e baixa intensidade, mantendo a umidade entre a capacidade de campo e o fator de disponibilidade de água no solo (Bernardo et al., 2006). Diminuindo a área molhada conseqüentemente há redução do consumo de água.

#### Uniformidade de distribuição de água e fertilizantes

A irrigação por gotejamento segundo Martins et al. (2007) quando comparada com os outros sistemas de irrigação, possui uniformidade de aplicação alta, economia de água e eficiência operacional. Quanto utilizada, por exemplo, na cultura do café, proporciona aumento de produtividade, diminui riscos de perdas e melhora as características do produto consumido, neste caso a bebida, desde que tenha manejo adequado.

A uniformidade de aplicação alta chegando a patamares de 90% é possível devido ao mecanismo de perda de energia localizada e uniformização da vazão existente nos gotejadores. Para isto as condições de fabricação devem se enquadrar em normas técnicas (Dalri et al. 2015).

A utilização da irrigação para aplicar fertilizantes utiliza da alta uniformidade de distribuição para que tenha boa eficiência da fertilização. A chamada de fertirrigação, segundo Teixeira et al (2011) possibilita a diminuição de gastos pelo aumento da eficiência dos fertilizantes.

Por ser um sistema totalmente pressurizado, a irrigação por gotejamento possibilita a automação de grande parte do seu mecanismo de funcionamento. Com sistemas automatizados ocorre a minimização das interferências causadas pelo irrigante ou operador, diminuindo os erros humanos e aumentando a eficiência de utilização da água (Zapata et al., 2013).

A utilização da irrigação por gotejamento é limitada pela qualidade da água utilizada. Porém, a utilização de águas com qualidade inferior é uma prática crescente devido à escassez de água com boa qualidade, rendimento das culturas e o aumento de nutrientes no solo (Singh et al., 2012), diminuição de água residual no meio ambiente (Alobaidy et al., 2010) e a diminuição da poluição subterrânea (Muyen et al., 2011).

#### Entupimento de gotejadores

Diversos estudos tentam verificar a aplicabilidade da irrigação com águas de qualidade inferior. Esta utilização quando não realizada com precauções e manejo anti-entupimento podem desenvolver mecanismos de obstrução. Estes mecanismos podem ser física, causada pela suspensão de partículas inorgânicas (sedimentos, areia, argila) e materiais orgânicos (resíduos animais, vegetais etc); pode ser química com a precipitação de elementos como, por exemplo, o cálcio. E podem ser microbiológico (algas, protozoários etc); materiais físicos são, muitas vezes, combinados com limos bacterianos (Liu & Huang, 2009).

A obstrução biológica é uma das principais formas de obstrução em gotejadores, devido à sua capacidade de passar pelo sistema de filtragem e formar o biofilme. Segundo Batista et al. (2010) o biofilme é um resultante da interação entre colônias de bactérias e algas, ocasionando entupimento parcial ou total dos emissores.

O potencial obstrutivo de uma água de qualidade inferior e conseqüentemente a perda de uniformidade do sistema é dependente da associação entre os parâmetros constituintes na água e do sistema como o mecanismo de distribuição de água (Pei et al. 2014), da configuração do sistema a campo (Ella, Reyes e Yoder, 2009) da arquitetura interna dos gotejadores (Ribeiro et al., 2012) entre outros.

Os principais parâmetros físico-químicos de qualidade de água e seu risco para sistemas de irrigação foram classificados por Nakayama et al. (2007). Estes parâmetros são fundamentais para o controle da qualidade da água aplicada no sistema a fim de prevenir problemas relacionados com o desgaste e entupimento dos emissores.



Para o monitoramento da distribuição de água em gotejamento são amplamente utilizados os coeficientes de uniformidade (Cunha et al., 2014) e o grau de entupimento ou variação da taxa de descarga (Zhou et al., 2013), além do coeficiente de variação CV.

Uma forma de monitoramento vinda das indústrias e sendo utilizada em sistemas para irrigação e fertirrigação (Klein et al., 2015) é a estatística de controle de qualidade. Esta ferramenta também foi capaz de avaliar a qualidade do processo de irrigação com o uso de águas residuárias (Hermes et al., 2013; Juchen et al., 2013).

Para a desobstrução dos gotejadores são utilizados de forma geral produtos químicos ou meios físicos de desobstrução. Teixeira et al. (2008) utilizaram cloro livre a  $10,0 \text{ mg L}^{-1}$ , a  $50,0 \text{ mg L}^{-1}$ . Cararo & Botrel (2007) usaram para a desobstrução do sistema cloro residual livre a  $0,5 \text{ mg L}^{-1}$  e ar comprimido.

#### Custo e viabilidade econômica

A irrigação por gotejamento tanto superficial como subsuperficial despontam como um dos métodos com maior custo de implantação. Estes sistemas são totalmente pressurizados; tubulações, emissores e a própria instalação requerem investimentos superiores em relação a outros métodos. Para amenizar esta problemática se utilizam culturas com alto valor agregado, que possibilitam o aumento da produtividade com a utilização da irrigação, como visto por Oliveira et al. (2010) na produção de café.

Para que se tenha retorno financeiro, todo o conjunto de técnicas e manejo deve ser seguido para o melhor aproveitamento do montante financeiro investido. Boas et al. (2011) relatam que o manejo de água no solo, utilizando a tensão como parâmetro e a cultivar utilizada interferiu na viabilidade econômica.

Os critérios de relevância para a escolha de sistemas de irrigação é o custo de implantação, a cultura cultivada, o potencial hídrico da região, o tipo de solo e o clima. Para a cultura do café Vieira et al. (2011) relacionaram o tamanho da área com a utilização de diversos sistemas de irrigação e obtiveram a irrigação por gotejamento como o sistema mais economicamente viável. Portanto, o custo alto da irrigação localizada pode ser minimizado.

## Uniformidade de aplicação de água

### Coeficientes de uniformidade

Para obter um valor numérico sobre a uniformidade de aplicação dos sistemas são utilizados os coeficientes de uniformidade. Entre eles destacam-se o coeficientes de Christiansen (CUC), estatístico (CUE), distribuição (CUD), absoluto (CUA), Hart (CUH) e eficiência padrão da HSPA (UDH) (Cunha et al., 2014). Também o coeficiente estatístico de variação (CV) e o coeficiente de emissão (UE) são indicadores de uniformidade.

Os resultados obtidos pelos coeficientes indicam uma classificação para o sistema. A ASABE (2008) classifica o coeficiente de uniformidade de distribuição e de emissão, a uniformidade estatístico é classificado por Favetta & Brotel (2001) e coeficiente de uniformidade de Christiansen segundo Bernardo et al. (2006).

O coeficiente de variação é classificado segundo ABNT/NBR ISO 9261:2006 que indica a utilização dos sistemas de gotejamento novos com o máximo de 7% para os valores de vazão.

A resposta de cada cultura para a uniformidade de aplicação é distinta. De forma geral uma uniformidade alta de aplicação indica a mesma quantidade de água para cada planta, evitando possíveis perdas por estresse hídrico. Como por exemplo, na cultura milho para silagem, em que Oliveira et al. (2015) obtiveram maior rentabilidade em áreas com maior uniformidade de aplicação.

### Uniformidade de aplicação com diferentes águas

As variações na uniformidade de aplicação estão diretamente interligadas ao potencial de entupimento de cada tipo de água (Evans & Waller, 2007; Trooien & Hills, 2007).

Para a fertirrigação com cloreto de potássio e uréia Cunha et al., (2014) observaram a diminuição da média dos coeficientes de uniformidade.

Com águas residuárias de agroindústrias de processamento de carne e leite durante o ciclo de produção da alface, Juchen et al. (2013) obtiveram coeficientes de uniformidade de Christiansen entre 89 a 97%.

Para águas com parâmetros de qualidade com alto risco de utilização (Nakayama et al., 2007), como água residuária de suinocultura (Batista et al., 2013), ocorre redução da uniformidade de aplicação de acordo com o tempo de funcionamento.

Com esgoto doméstico tratado Szekut et al. (2015) obtiveram ao longo do tempo de operação maior variabilidade, com coeficiente de variação superior a 15% em 792, 720 e 612 h de operação, para três tipos de gotejadores.

Em bancada de testes utilizando percolado de aterro diluído em 160 h Batista et al. (2016) obtiveram o coeficiente de variação e coeficiente de uniformidade estatístico de 28,9 e 73,11% respectivamente, para os gotejadores com os piores resultados.

Com águas salinas Zocoler et al. (2015) encontraram entupimento parcial em salinidade de 4,5 dSm<sup>-1</sup>, porém manteve-se a uniformidade de aplicação alta em torno de 94%, recomendando essa salinidade da água de irrigação como o limite para a utilização em gotejamento.

Hermes et al. (2013) utilizaram efluente de fecularia e obtiveram níveis de uniformidade aceitáveis em sistemas por gotejamento, porém, indicam a necessidade de monitoramento constante para evitar a obstrução.

Com a aplicação de vinhaça Lelis Neto et al. (2016) obtiveram resultados satisfatórios em relação ao coeficiente de uniformidade de distribuição, acima de 90%, para a maioria dos gotejadores testados em 2016 horas de funcionamento, além de coeficiente de variação satisfatório.

#### Grau de entupimento

O entupimento dos gotejadores pode ser parcial, total ou uma redução uniforme da vazão em todo o sistema como observado por Dantas et al. (2014). Para isto o grau de entupimento ou a variação da taxa de descarga deve ser monitorado em sistemas de irrigação, a fim de identificar esta variação que reduz a lâmina média aplicada pelo sistema.

O grau de entupimento indica a diferença percentual da mudança da vazão dos gotejadores testados em relação às observações realizadas no início da irrigação ou quando novos. Se assemelha ao índice de capacidade de processo da estatística de controle de qualidade, cuja variação é em relação aos limites de especificações, como utilizado por Rocha et al. (2017).

Com a aplicação de águas propícias a formação de biofilme, Zhou et al. (2013) observaram uma redução linear negativa entre a quantidade de biofilme e a variação da taxa de descarga. Mostrando a interferência da obstrução na redução da vazão dos gotejadores.

Em relação aos coeficientes de uniformidade e a variação da taxa de descarga, nos primeiros tempos de funcionamento de um sistema, existe variabilidade entre os dois

indicadores (Pei et al., 2014), entretanto, se ajustam de forma linear com maiores tempos de funcionamento.

## **Interferências dos materiais e do projeto na qualidade da irrigação**

### Gotejadores e materiais diversos

Várias restrições e características do sistema influenciam o processo de distribuição de água (Clark et al., 2007). Entre elas as condições topográficas e os materiais utilizados tem maior efeito significativo.

A menor variabilidade da pressão interna dos emissores proporcionam melhores taxas de distribuição de água. Os gotejadores autocompensantes têm como característica manter a vazão aplicada independente da pressão interna a tubulação, desde que esteja no intervalo de compensação. Para ser autocompensante, o valor do expoente (x) da equação característica do emissor devem ser próximos à zero (Dalri et al., 2015). Desta forma eles são capazes de controlar a variação da pressão ao longo do comprimento lateral, melhorando a uniformidade de aplicação (Tagar et al., 2010).

Os gotejadores do tipo labirinto possuem um mecanismo tortuoso de dissipação de energia para uniformizar a vazão de saída, segundo Pei et al (2014) existe diferença significativa para a uniformidade de acordo com a forma do labirinto. Também gotejadores com maior comprimento de labirinto são suscetíveis ao entupimento (Batista et al., 2008).

A configuração interna ou estrutura espacial do labirinto, diferente para cada modelo, podem favorecer a formação de bioincrustações, mesmo sob as condições ambientais de aplicação de tratamentos de anti-entupimento, incidindo sobre a taxa de descarga de cada gotejador (Katz et al., 2014).

No fluxo de água pelo labirinto há regiões de baixa velocidade próximas às paredes internas, que propícia o surgimento de depósito com pequenas partículas; a eliminação dessas regiões proporciona melhor capacidade de autolimpeza (Li et al., 2008).

Segundo Ribeiro et al. (2012) a arquitetura interna dos gotejadores é fator determinante na caracterização do processo de entupimento. Em relação ao posicionamento, os gotejadores são suscetíveis ao entupimento quando posicionados para baixo.

Novos materiais proporcionam flexibilidade para a utilização da irrigação, como é o caso dos sistemas acionados por energia provida de painéis solares. Guy et al. (2017) obtiveram bom

desempenho em sistemas de irrigação com painéis solares para microaspersão. O que reflete uma utilização promissora.

Visando economia de energia, os sistemas acionados pela diferença de nível, ou seja, pela carga hidráulica gerada pela declividade da área, é outra opção com qualidade alta de distribuição de água. Segundo Nascimento et al. (2009) é viável a utilização de sistemas de irrigação por gotejamento funcionando a baixa pressão para pequenas áreas.

Estes Kits de irrigação familiar, que utilizam baixa pressão, proporcionam elevada eficiência de distribuição de água em condições de campo, além de facilitar a atividade agrícola em pequenas propriedades (Souza et al., 2009).

#### Interferência topográfica

A declividade da área altera a pressão interna da tubulação com gotejadores. Segundo Clark et al. (2007) a pressão em uma linha lateral em declive aumenta devido ao ganho pela depressão do terreno, em aclive a pressão tende a diminuir. Esta alteração reflete no funcionamento dos gotejadores não autocompensantes e conseqüentemente a uniformidade de aplicação (Ella, Reyes e Yoder, 2009).

Em sistemas nivelados as alterações nos valores de pressão são menores do que em declive (Marcuzzo et al., 2011). Além disto, irrigações em áreas declivosas tem percentual de custo maior (Cunha et al., 2012). Portanto, simulações são necessárias para minimizar estes efeitos.

Khemaies et al. (2013) desenvolveram um método analítico de dimensionamento que admite parâmetros de projeto como comprimento da linha lateral e uniformidade. Ainda em seus estudos identificaram que em um ligeiro declive de 2% obtém uma desvantagem na pressão de entrada, porém são compensados com linhas laterais maiores.

A topografia côncava ou convexa em áreas irrigadas por gotejamento foi estudada por Baiamonte (2017), os resultados mostraram que as laterais em topografia convexa determinaram um aumento do comprimento ideal das linhas laterais, enquanto que a topografia côncava obteve uma diminuição.

A forma de avaliação ou as variáveis obtidas, como vazão média, coeficiente de variação e de uniformidade podem obter alterações devido à declividade da área, para isto Jiang & Kang (2010) recomendam as variáveis a serem utilizadas de acordo com a declividade da área.

## **Mecanismos de avaliação**

### Metodologias de coleta de dados

Para a avaliação dos sistemas geralmente são obtidos as vazões, pela coleta de água em um determinado tempo, em diferentes gotejadores escolhidos no sistema. Para a escolha dos gotejadores é utilizado na sua maioria a metodologia de Keller e Karmelli (1975) que escolhe quatro gotejadores em quatro linhas laterais, somando 16 pontos de coleta em um sistema.

Outra forma de avaliação foi indicada por Deniculi (1980), consistindo em indicar oito pontos de coleta ao longo de quatro linhas laterais, somando 32 pontos de coleta em todo o sistema.

Com uma metodologia de simulação de entupimento Camargo et al (2014) concluíram que o monitoramento da obstrução em sistema por gotejamento pode ser realizado apenas com a medição da taxa de fluxo do emissor e da perda de pressão ao longo da linha lateral. A primeira estima o nível de obstrução e o segundo facilita a localização do entupimento.

Em sistemas de pequeno porte para agricultura familiar com pressurização pela diferença de altura entre sistema e reservatório, Klein et al. (2013) utilizaram mapas e perspectivas tridimensionais para representar a distribuição de vazão no sistema com diferentes cargas hidráulicas.

Em ambientes controlados, para equipamentos novos ou usados, são utilizados as bancada de testes para avaliações (Teixeira et al., 2008; Niu et al., 2013; Costa et al., 2016). Bancadas de testes são um conjunto de equipamentos que possibilitam o controle de diversas variáveis que podem incidir sobre os testes, além de submeter os gotejadores a condições específicas.

Novas estruturas automatizadas também englobam os mecanismos de avaliação, como a utilizada por Rocha et al., (2017), que utilizaram bancada de testes automatizada com sensores de pressão hidráulica e controladores integrativo derivativo, além da estatística de controle de qualidade de processos pelo gráfico EWMA e índice de capacidade do processo para interpretação dos resultados.

### Processamento e interpretação dos dados

A interpretação dos resultados obtidos com a avaliação em sistemas por gotejamento, geralmente são utilizados parâmetros de classificação ou limites de utilização (Bralts, 1986; Favetta & Brotel, 2001; Bernardo et al. 2006; ABNT, 2006; ASABE, 2008).

A uniformidade de irrigação representa um dado numérico, baseado nos coeficientes de variação estatístico, que representa a variabilidade das lâminas ou vazões aplicadas pelo sistema. Como por exemplo, um sistema que tenha 70% de uniformidade de aplicação de água, significa que 70% da área foi aplicado uma vazão ou lâmina superior ou igual à vazão média (Mantovani et al., 2009).

Com os coeficientes é observada uma avaliação espacial (Mantovani et al., 2009) dos gotejadores, pela obtenção dos valores de vazão em pontos escolhidos no sistema. Durante o tempo de funcionamento, de forma temporal, é possível a comparação dos resultados obtidos em cada tempo, e isto pode ocorrer falhas de interpretação, como o entupimento uniforme (Dantas et al., 2014).

Uma forma de monitoramento e interpretação dos resultados é a utilização da estatística de controle de qualidade, segundo Montgomery (2016) esta estatística é uma forma de monitoramento útil para que fontes não usuais de variabilidade sejam percebidas.

A definição de qualidade, tendo em vista o monitoramento de processos, é o inverso de variabilidade (Montgomery, 2016). A busca dessa qualidade na irrigação não é apenas a manutenção da uniformidade de aplicação, e sim a percepção que fontes de variabilidade estão agindo e que precisa de alguma ação corretiva para manter a qualidade do processo.

Na irrigação os resultados de Justi & Saizaki (2015) indicam ser uma ferramenta de grande auxílio para monitorar o sistema segundo o desempenho hidráulico com a utilização de irrigação e fertirrigação.

Esta estatística verifica valores de vazões fora de controle estatístico, além de padrões não aleatórios, como as tendências (Montgomery, 2016). Estes padrões não aleatórios podem identificar mudanças ambientais que interferem na irrigação, desgaste dos materiais e equipamentos, falha nos mecanismos de medição, falha na operação ou manutenção entre outros.

### **Gráficos de controle de qualidade aplicados à irrigação**

Na irrigação diversas pesquisas foram baseadas na utilização dos gráficos de controle de qualidade. Os dados coletados nos sistemas de irrigação são plotados no gráfico e calculados os limites superior e inferior de controle. Observações fora destes limites indicam que fontes de variabilidade estão agindo sobre as variáveis respostas (Montgomery, 2016).

Para a utilização de coeficientes de uniformidade e gráficos de controle, é necessário saber que os coeficientes podem obter valores altos de uniformidade de aplicação, porém

quando submetidos à utilização dos gráficos, podem verificar alguma falta de aleatoriedade, o que são indícios de problemas iniciais no sistema. Em pesquisas realizadas com qualidade de água Smeti et al. (2007) concluíram que o controle estatístico possibilita a investigação do processo e a realização de ações corretivas antes dos problemas de qualidade se acumularem.

O monitoramento do processo de irrigação na sua grande maioria é realizado por meio dos gráficos de controle de Shewart. Segundo Gove et al. (2013) as decisões do gráfico são rápidas e transparentes, podendo obter tomada de decisões e retirar particularidades do processo.

A utilização do controle estatístico pelos gráficos de Shewart também pode ser utilizado para monitorar o desempenho do sistema com águas de qualidade inferior, como Hermes et al. (2013). Estes autores comprovaram a utilização desta ferramenta para avaliar a capacidade do sistema manter as condições satisfatórias de uniformidade.

Outros gráficos são utilizados, como o gráfico de controle média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) e soma cumulativa (CUSUM) (Frigo et al., 2016). Além do índice de capacidade do processo (Justi et al., 2010).

O alto número de variáveis incidentes na qualidade de irrigação permitiu a utilização da estatística de controle de qualidade multivariada. Segundo Henning et al. (2012) a aplicação dos gráficos de controle multivariados melhora ainda mais o processo, por se tratar de um monitoramento que controla simultaneamente várias características, adiante dos gráficos de controle de unidades individuais.

Apesar dessas inúmeras variáveis, não é encontrado na literatura a utilização da ferramenta de qualidade multivariada aplicada na irrigação. Um dos gráficos que poderiam ser usados é o  $T^2$  de Hotelling, porém há a necessidade do uso adequado dessa metodologia (Zamarrón et al., 2012).

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

1. Foram evidenciadas na revisão as inúmeras variáveis que podem interferir na qualidade da irrigação por gotejamento. Não existe apenas uma que induz de forma paralela a perda de qualidade, mas sim um conjunto que potencializa esta redução.
2. A forma de monitoramento usual é formada pela obtenção das vazões no sistema com posterior cálculo dos coeficientes de uniformidade e a variação da taxa de descarga dos emissores. Por sua vez, estes índices dão origem à classificação do sistema.



3. Com o aumento do monitoramento automatizado, por sensores e softwares de gerenciamento, ocorre a grande geração de dados para processamento e interpretação. Aliado as características que influenciam o sistema, como a utilização de diferentes águas, existe a necessidade de aprimorar as ferramentas de controle.
4. A estatística de controle de qualidade pode melhorar o monitoramento dos sistemas de irrigação. Sua principal característica é plotar em gráficos de controle os dados observados no tempo, indicando os limites que o sistema pode alcançar sem diminuir sua qualidade de aplicação. Pontos fora dos limites de qualidade indicam que fontes de variabilidade estão agindo e que podem interferir no sistema, mesmo com os coeficientes de uniformidade em valores altos.
5. A qualidade da irrigação é um contexto criado neste trabalho tendo em vista a aplicação de conceitos da qualidade de processo, em que o monitoramento requer abordagens mais precisas das condições utilizadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubos emissores – Especificações e métodos de ensaio. São Paulo, p. 9, 2006.

AHMED, Bouya Ahmed Ould et al. Assessment of emitter discharge in microirrigation system as affected by polluted water. **Irrigation And Drainage Systems**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.97-107, 2007.

ALOBADY, Abdul Hameed M. Jawad et al. Evaluation of Treated Municipal Wastewater Quality for Irrigation. **Journal Of Environmental Protection**, [s.l.], v. 01, n. 03, p.216-225, 2010.

ANDRADE, Maurício Guy de et al. Statistical quality control for the evaluation of the uniformity of microsprinkler irrigation with photovoltaic solar energy. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 78, p.743-753, out. 2017.

ASABE STANDARDS. Evaluation of irrigation furrows, ASAE EP 419.1 FEB 1993 (R2008).

BAIAMONTE, Giorgio. Design of concave and convex paired sloped drip laterals. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 191, p.173-183, set. 2017.

BATISTA, Rafael O. et al. Obstrução e uniformidade de aplicação em sistemas de irrigação por gotejamento aplicando-se efluente da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 17, n. 7, p.698-705, jul. 2013

BATISTA, Rafael Oliveira; SOUZA, José Antonio Rodrigues de; FERREIRA, Daniel Coelho. Influência da aplicação de esgoto doméstico tratado no desempenho de um sistema de irrigação. **Revista Ceres**, [s.l.], v. 57, n. 1, p.18-22, fev. 2010.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. Viçosa: UFV, p.625, 2006.

BOAS, Renato Carvalho Vilas et al. Viabilidade econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cebola. **Ciência e Agrotecnologia**, [s.l.], v. 35, n. 4, p.781-788, ago. 2011.

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.

CAMARGO, Antonio Pires de et al. Assessment of clogging effects on lateral hydraulics: proposing a monitoring and detection protocol. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 32, n. 3, p.181-191, 7 dez. 2013.

CARARO, Denis C.; BOTREL, Tarlei A.. Uso de cloração e ar comprimido no controle do entupimento de gotejadores ocasionado pela aplicação de água residuária. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 27, n. 2, p.336-345, ago. 2007.

CHRISTOFIDIS, Demetrios. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 1, n. , p.115-127, 2013.

CLARK, Gary A. et al. 5. General system design principles. **Developments In Agricultural Engineering**, [s.l.], p.161-220, 2007.

COSTA, Danniely O. et al. Biological treatment of drippers clogged by the use of treated domestic wastewater. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 20, n. 7, p.595-599, jul. 2016.

CUNHA, Fernando Nobre et al. Coeficientes de uniformidade em sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], v. 8, n. 6, p.444-454, 7 nov. 2014.

CUNHA, Fernando Nobre et al. Influência do declive no custo total de uma rede de irrigação localizada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.247-258, 30 set. 2012.

DALRI, Alexandre Barcellos et al. Caracterização técnica e desempenho hidráulico de quatro gotejadores autocompensantes utilizados no Brasil. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 45, n. 8, p.1439-1444, ago. 2015

DANTAS, Daniel da Costa et al. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando efluente doméstico. **Irriga**, Botucatu, Edição especial, p.179-189, 2014.

DENÍCULI, W.; BERNARDO, S.; THIÉBAUT, J. T. L.; SEDIYAMA, G.C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 27, n. 150, 1980.

ELLA, V. B.; REYES, M. R.; YODER, R.. Effect of Hydraulic Head and Slope on Water Distribution Uniformity of a Low-Cost Drip Irrigation System. **Applied Engineering In Agriculture**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.349-356, 2009.

EVANS, Robert G.; WALLER, Peter M.. 8. Application of chemical materials. **Developments In Agricultural Engineering**, [s.l.], p.285-327, 2007.

FAVETTA, Gilberto Manilli; BOTREL, Tarlei Arriel. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 58, n. 2, p.427-730, jun. 2001.

FEITOSA, A. P. et al., Avaliação do desempenho de sistema para tratamento e aproveitamento de água cinza em áreas rurais do semiárido brasileiro, **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, Espírito Santo do Pinhal, v.8, p. 196-206, 2011.

FRIGO, Jiam Pires et al. Comparação entre gráficos de controle de shewhart, cusum e mmep no processo de irrigação por aspersão convencional. **Irriga**, [s.l.], v. 1, n. 01, p.56-70, 28 nov. 2016.

GOVE, Aaron D. et al. Control charts for improved decisions in environmental management: a case study of catchment water supply in south-west Western Australia. **Ecological Management & Restoration**, [s.l.], v. 14, n. 2, p.127-134, maio 2013.

HENNING, Elisa et al. Gráficos de controle multivariados: um estudo de caso no setor metalomecânico. **P&d em Engenharia de Produção**, Itajubá, v. 10, n. 2, p.143-156, 2012.

HERMES, Eliane et al. Quality control in irrigation and fertigation with cassava processing wastewater into drip system. **Journal Of Food, Agriculture & Environment**, Helsinki, Finland, v. 11, n. 2, p.841-845, 2013.

JIANG, Shufang; KANG, Yaohu. Evaluation of Microirrigation Uniformity on Laterals Considering Field Slopes. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, [s.l.], v. 136, n. 6, p.429-434, jun. 2010.

JUCHEN, Carlos Roberto; SUSZEK, Floriano Luiz; BOAS, Marcio Antonio Vilas. Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais. **Irriga**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.243-256, 11 jul. 2013.

JUSTI, A.I.; SAIZAKI, P.m.. Desempenho da Irrigação e Fertirrigação Avaliadas por Controle Estatístico de Qualidade. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, [s.l.], v. 23, n. 6, p.541-551, 30 dez. 2015.

JUSTI, André L; BOAS, Marcio A Vilas; SAMPAIO, Silvio C. Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.264-270, abr. 2010.

KATZ, Sagi et al. Fouling formation and chemical control in drip irrigation systems using treated wastewater. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 32, n. 6, p.459-469, 23 jul. 2014.

Keller, J.; Karmeli, D. Trickle irrigation design. Glendora, California: Rain bird sprinkler manufacturing corp, 1975. 133p.

KHEMAIES, Zayani et al. Design of Nonzero Uniformly Sloping Laterals in Trickle Irrigation Systems. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, [s.l.], v. 139, n. 5, p.419-425, maio 2013.

KLEIN, Marcio et al. Uniformidade de irrigação e fertigação em um sistema de irrigação familiar por gotejamento sob diferentes cargas hidráulicas. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, Espírito Santo do Pinhal, v. 10, n. 3, p.56-69, maio 2013.

KLEIN, Márcio Roberto et al. Fertigation quality with drip irrigation system in grape orchard by using the process capability index. **Journal Of Food, Agriculture & Environment**, Helsinki, Finland, v. 13, n. 2, p.179-183, abr, 2015.

Lelis Neto, João Alberto et al. Drippers used in vinasse application: Uniformity and obstruction. **African Journal Of Agricultural Research**, [s.l.], v. 11, n. 28, p.2443-2449, 14 jul. 2016.

LI, Yunkai et al. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 26, n. 5, p.427-438, 26 mar. 2008.

LI, Yunkai et al. Preliminary surface topographical characteristics of biofilms attached on drip irrigation emitters using reclaimed water. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 31, n. 4, p.557-574, 14 mar. 2012.

LIU, Haijun; HUANG, Guanhua. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 5, p.745-756, maio 2009.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3ª ed., Viçosa: UFV, 2009

MARCUZZO, Francisco F. N.; WENDLAND, Edson. Distribuição de pressão em rede de irrigação localizada otimizada por algoritmos genéticos. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 31, n. 3, p.497-505, jun. 2011.

MARTINS, Cristiani Campos et al. Manejo da irrigação por gotejamento no cafeeiro. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 2, p.61-69, abr. 2007.

Montgomery C. D. Introdução ao controle estatístico de qualidade. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 549p.

MUYEN, Zahida; MOORE, Graham A.; WRIGLEY, Roger J.. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 99, n. 1, p.33-41, nov. 2011.

Nakayama, F. S.; Boman, B. J.; Pitts, D. Maintenance. In: Lamm, F. R.; Ayars, J. E. and Nakayama, F. S. In: Lamm F. R.; Ayars J. E.; Nakayama, F. S. *Microirrigation for crop production: Design, operation, and management*. Amsterdam: Elsevier, 2007. Cap.11, p.389-430.

NASCIMENTO, João Marcelo Silva do et al. Avaliação da uniformidade de aplicação de água em um sistema de gotejamento para pequenas propriedades. **Ciência e Agrotecnologia**, [s.l.], v. 33, n. , p.1728-1733, 2009.

NIU, Wenquan; LIU, Lu; CHEN, Xue. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 31, n. 4, p.545-555, 14 mar. 2013.

OLIVEIRA, Ednaldo L. de et al. Manejo e viabilidade econômica da irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro acaia considerando seis safras. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 30, n. 5, p.887-896, out. 2010.

OLIVEIRA, Flávio Gonçalves et al. Influência da uniformidade de irrigação na produção e na rentabilidade de silagem de milho irrigado. **Irriga**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.103-108, 31 ago. 2015.

PEI, Yiting et al. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 32, n. 2, p.141-157, 12 nov. 2013.

RIBEIRO, Pabblo Atahualpa de Aguiar et al. gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. **Irriga**, [s.l.], v. 1, n. 01, p.368-379, 2012.

RIBEIRO, Sidnei Lopes. Considerações iniciais sobre a segurança hídrica do Brasil. **Revista Brasileira de Estudos de Defesa**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.156-180, 17 jan. 2018.

ROCHA, Hermes S. da et al. Dripper testing: Application of statistical quality control for measurement system analysis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 9, p.587-593, set. 2017.

SINGH, P.k.; DESHBHRATAR, P.b.; RAMTEKE, D.s.. Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 103, p.100-104, jan. 2012.

SMETI, E.m. et al. An approach for the application of statistical process control techniques for quality improvement of treated water. **Desalination**, [s.l.], v. 213, n. 1-3, p.273-281, jul. 2007.

SOUZA, Rodrigues de Melo et al. Irrigação localizada por gravidade em comunidades agrícolas do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 1, p.34-40, 2009.

SZEKUT, Flavio Daniel et al. Emitter clogging in drip irrigation using treated domestic wastewater. **Journal Of Food, Agriculture & Environment**, Helsinki, v. 13, n. 34, p.60-66, 2015.

TAGAR, A. A. et al. Hydraulic performance of different emitters under varying lateral lengths. **Pak. J. Agri., Agril. Engg**, Tandojam, v. 26, n. 2, p.48-59, 2010.

TEIXEIRA, Luiz Antonio Junqueira; QUAGGIO, José Antônio; MELLIS, Estêvão Vicari. Ganhos de eficiência fertilizante em bananeira sob irrigação e fertirrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s.l.], v. 33, n. 1, p.272-278, 25 mar. 2011.

TEIXEIRA, Marconi Batista. Tratamento para desentupimento de gotejadores convencionais. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p.235-248, 2008.

TROOIJEN, Todd P.; HILLS, David J.. 9. Application of biological effluent. **Developments In Agricultural Engineering**, [s.l.], p.329-356, 2007.

VIEIRA, Gustavo Haddad Souza et al. Custo da irrigação do cafeeiro em diferentes tipos de equipamento e tamanhos de área. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 1, p.53-61, jan. 2011.

ZAMARRÓN, Aida Magdalena Contreras; PRADO, Eduardo Marroquín; LUIS, Federico Zertuche. Monitoreo y Control de un Proceso Normal Multivariado. **Consciência Tecnológica**, México, v. 43, p.29-35, jan. 2012.

ZAPATA, N. et al. Field test of an automatic controller for solid-set sprinkler irrigation. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 31, n. 5, p.1237-1249, 12 dez. 2012.

ZHOU, Bo et al. Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 31, n. 6, p.1251-1263, 19 fev. 2013.

ZOCOLER, João Luiz et al. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com aplicação de água salina. **Irriga**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.234-247, 28 jul. 2015.

## **CAPÍTULO 2: CONTROLE DE QUALIDADE HIDRÁULICO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA ENSAIOS COM GOTEJADORES**

**Resumo:** Com a evolução dos materiais e a inserção de novas tecnologias na agricultura irrigada, os procedimentos de controle de qualidade na fabricação desses produtos devem acompanhar estas mudanças. O objetivo da pesquisa foi verificar a qualidade da utilização de bancadas para testes em sistemas de irrigação por gotejamento, por meio da aplicação dos gráficos de controle estatístico de qualidade. Para o experimento foi construída uma bancada de testes constituída de sistema de bombeamento, linha de recalque e sistema de irrigação por gotejamento. Para o sistema de irrigação foi monitorado as vazões em pontos estabelecidos no sistema e calculado o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e de emissão (EU), além do coeficiente de variação (CV). A estrutura foi monitorada por meio da coleta das vazões e pressões do sistema de bombeamento e do final da bancada por uma hora de funcionamento. Com os dados das 25 repetições, foram plotados os gráficos de controle de qualidade de Shewart para medidas individuais e confeccionado a curva característica da bancada de ensaios. O sistema de irrigação obteve todas as avaliações dentre os limites recomendados e permaneceu entre os limites de controle de qualidade. Para o sistema de bombeamento as pressões ficaram entre os limites de controle, porém foi observado valores não aleatórios para a pressão inicial de 160 kPa. Nas vazões a não aleatoriedade incidiu sob as pressões iniciais de 100 e 140 kPa, para a pressão de 160 kPa foi observado um valor atípico. Para a bancada as pressões obtiveram a não aleatoriedade dos dados para a pressão inicial de 100 kPa. Para as vazões foi observado um valor atípico para a pressão inicial de 40 kPa. A utilização da desta bancada de testes para avaliações de gotejadores pode ser empregada preferencialmente nas pressões iniciais de 60 e 80 kPa, valores que não obtiveram pontos fora de controle e mantiveram a aleatoriedade. Os gráficos de controle de qualidade indicaram variabilidade nas variáveis de pressão e vazão da bancada de testes, com isto é indicado para ensaios com gotejadores à eliminação destas causas de variação.

Palavras-chave: Gráficos de Shewart, Irrigação por gotejamento, Uniformidade de Emissão, CUD.



## INTRODUÇÃO

Os equipamentos e materiais utilizados na irrigação por gotejamento são submetidos a inúmeros testes de qualidade pelo fabricante. Todos os procedimentos são baseados em metodologias e devem se enquadrar em normas reguladoras como a ABNT/NBR ISO 9261:2006.

O desenvolvimento de novos materiais ou de processos automatizados na irrigação localizada geram de forma paralela procedimentos mais específicos e precisos para a validação e monitoramento da qualidade. Estes ensaios necessitam da medição de inúmeras variáveis além de um controle rígido das condições do ambiente laboratorial (Rocha et al., 2017).

Para ensaios com gotejadores geralmente são utilizados bancada de testes em ambiente controlado para a avaliação das condições de funcionamento. Como por exemplo, de alvenaria utilizada por Costa et al. (2016), com tubos de aço inoxidável com cinco gotejadores espaçados em 3,0 m usada por Niu et al. (2013), metálica com andaes utilizada por Teixeira et al. (2008). Além de bancadas a campo para obter condições ambientais específicas (Szekut et al., 2016).

Um monitoramento eficaz utilizado para a manutenção da qualidade de processos e produtos é o uso da estatística de controle de qualidade (Montgomery, 2016), aplicada como ferramenta para identificação de variabilidades que podem estar incidindo sob o sistema de irrigação.

A utilização desta ferramenta estatística ocorre por meio de gráficos de controle de qualidade como o de Shewhart e índice de capacidade do processo (Frigo et al, 2013; Andrade et al., 2017) além de gráficos de controle média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) e soma cumulativa (CUSUM) (Frigo et al., 2016).

Com os gráficos de controle de qualidade, é possível identificar momentos para manutenção preventiva, além de um acompanhamento restrito em estruturas, equipamentos, sistemas e na qualidade laboratorial (Souza et al., 2012). Portanto, em ensaios com gotejadores é necessária uma avaliação das condições de funcionamento e controle de qualidade da estrutura que determinam as características de experimentação destes ensaios.

Tendo em vista estas abordagens a pesquisa teve como objetivo avaliar uma bancada de testes construída para ensaios de gotejadores, por meio do monitoramento realizado com gráficos de controle de qualidade de Shewhart com observações individuais em pontos de coleta na bancada.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Desenvolvimento de Protótipos da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, coordenadas geográficas 24° 56' 26" S e 53° 33' 32" O. O clima para a região é subtropical Cfa segundo a classificação de Köppen; altitude de 781 m; precipitação pluviométrica média de 1822 mm.

Para o experimento foi construída uma bancada de testes de 5,0 m de comprimento constituída de motobomba para recalque de água de 0,5 CV, 1,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> em 100 kPa (ANEXO 1 catálogo do fabricante); cabeçal de controle com filtro de disco 120 mesh, controlador de pressão da marca BERMAD® modelo 0075 PRVy.

O sistema de irrigação instalado foi constituído de 4 linhas laterais com gotejadores internos da marca IRRITEC®, modelo P1 espaçados a 50 cm (ANEXO catálogo do fabricante). A linha lateral possui diâmetro nominal de 16 mm, pressão de trabalho de 80 kPa, coeficiente de proporcionalidade da equação do emissor (K) 1,26 e expoente de descarga (x) 0,48.

Para a verificação do sistema de bombeamento e da bancada foi inserido em pontos de coleta (Figura 1) de dados o manômetro digital da marca INSTRUTEMP®, Modelo 8215 (100 mca) calibrado e o hidrômetro ultrassônico do modelo Hydros da marca DIEHL METERING® para o monitoramento da pressão e vazão de funcionamento.

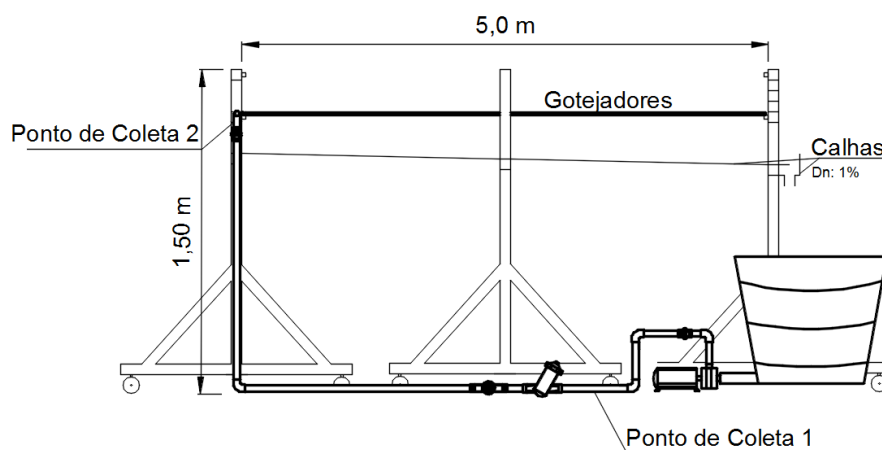


Figura 1. Corte transversal da bancada de testes com os pontos de coleta 1 e 2

Em cada ponto de coleta foi monitorado a pressão e vazão por uma hora. Cada observação foi a cada 2 min e 24 s, tempo obtido para 25 observações, número necessário para a estatística de controle de qualidade, no período determinado.

Para as avaliações no sistema de bombeamento (ponto de coleta 1) as pressões iniciais foram reguladas em 80, 100, 120, 140 e 160 kPa. Estas pressões foram reguladas por um registro de gaveta no final da bancada. As coletas para as avaliações da bancada (ponto de coleta 2) tiveram pressão inicial de 40, 60, 80 e 100 kPa.

O monitoramento do sistema de irrigação instalado foi pela amostragem das vazões em pontos escolhidos no sistema segundo a metodologia de Keller & Karmelli (1975), indicando 16 gotejadores para a avaliação. As vazões foram obtidas por meio da coleta do volume de água em cada ponto selecionado por 3 min. Foram realizadas 25 repetições com a pressão de serviço dos gotejadores nominal de 80 kPa.

Com os dados do sistema de irrigação foi calculado o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) Eq. 1 (Merriam & Keller, 1978), e o coeficiente de uniformidade de emissão (UE) Eq. 2 (Keller & Karmelli, 1975), este indicado pelo fabricante dos gotejadores, além do coeficiente de variação. Todos os testes seguiram as condições recomendadas pela ABNT/NBR ISO 9261:2006.

$$CUD = \frac{q_{25\%}}{\bar{q}} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

CUD – Coeficiente de uniformidade de distribuição, %;

$q_{25\%}$  - Vazão média dos 25% menores valores,  $Lh^{-1}$ ; e,

$\bar{q}$  - Vazão média dos gotejadores,  $Lh^{-1}$ .

$$UE = 100 \left( 1 - 1,27 \frac{CV}{\sqrt{n}} \right) \frac{q_n}{\bar{q}} \quad (2)$$

Em que:

UE – Coeficiente de uniformidade de emissão, %;

CV – Coeficiente de variação de fabricação (Solomon, 1979)  $CV_t = 0,03$ ;

$q_n$  - Menor vazão entre as observações,  $Lh^{-1}$ ; e,

n – número de gotejadores por planta,  $n = 1$ .

Para o sistema de irrigação, sistema de bombeamento e a bancada os valores coletados foram submetidos à construção dos gráficos de controle individual baseado na metodologia descrita por Montgomery (2016), tendo como variável resposta os coeficientes de uniformidade, as vazões e pressões obtidos nos pontos de coleta.

Os gráficos de controle possuem três linhas: a central que indica a média dos valores observados; a do limite de controle inferior (LIC), Eq.3; e a do limite superior de controle (LSC), Eq. 4.

$$LIC = \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (3)$$

$$LSC = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (4)$$

Em que:

$\bar{x}$  - Média do processo;

$\overline{MR}$  - Amplitude móvel; e,

$d_2$ - Média da amplitude relativa em função do tamanho da amostra (tabelado).

Para a utilização da estatística de controle é necessário que os dados seguem uma distribuição normal. Todos os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro Wilk, e aos que não eram normais aplicado a transformação de Box-Cox (Follador et al., 2012).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

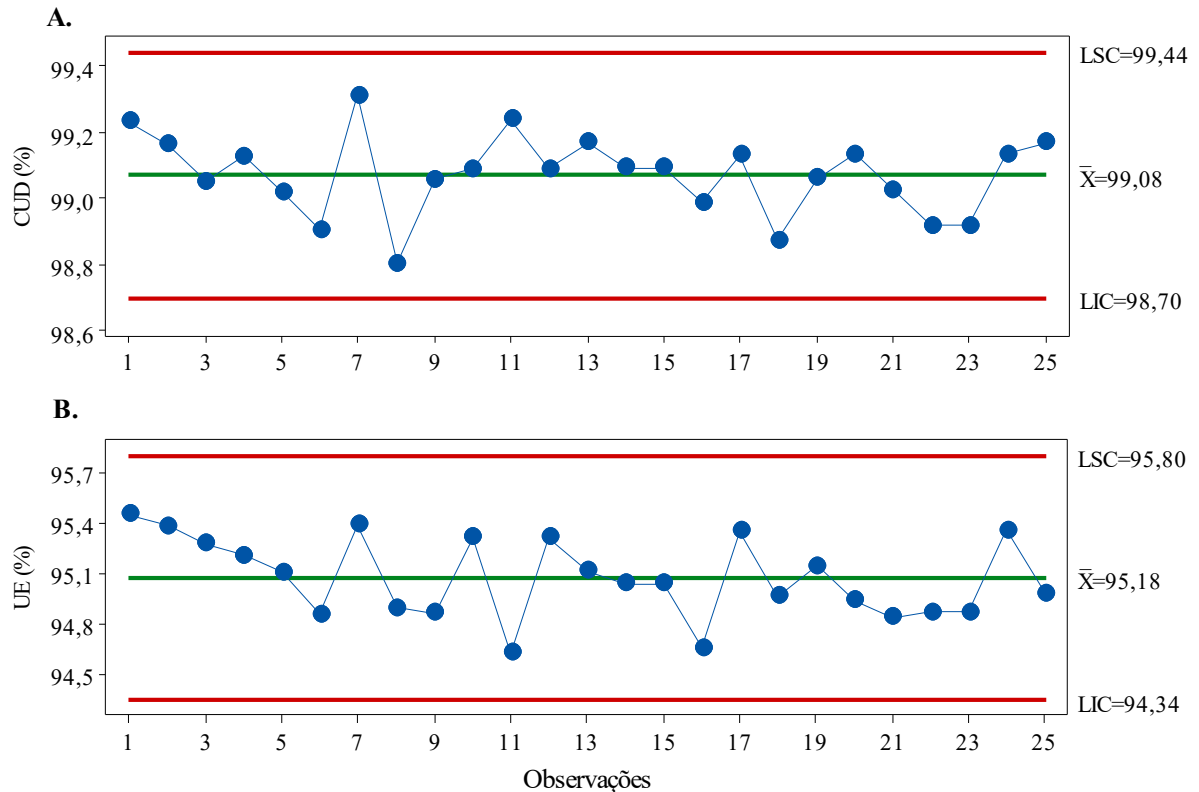
Para o sistema de irrigação instalado o coeficiente de variação se manteve a baixo do valor limite indicado pela ABNT/NBR ISO 9261:2006 que é de 7%. Segundo Jiang (2010) o coeficiente de variação é o melhor coeficiente para avaliações de emissores e para relacionar com os demais coeficientes. A Tabela 1 mostra a estatística descritiva dos valores de vazão, coeficiente de uniformidade de distribuição e uniformidade de emissão.

Tabela 1. Estatística descritiva para as vazões e os valores médios dos coeficientes de uniformidade

|                           | Média | Máximo | Mínimo | 1º Quartil | Mediana | 3º Quartil | CV (%) |
|---------------------------|-------|--------|--------|------------|---------|------------|--------|
| Vazão (Lh <sup>-1</sup> ) | 3,43  | 3,50   | 3,38   | 3,40       | 3,42    | 3,44       | 0,82   |
| CUD (%)                   | 99,08 | 99,23  | 98,91  |            |         |            |        |
| UE (%)                    | 95,18 | 95,45  | 94,86  |            |         |            |        |

Os valores médios dos coeficientes foram todos acima de 90%, para o coeficiente de uniformidade de distribuição, indica um excelente funcionamento; para a uniformidade de emissão, os valores obtidos estão superiores aos limites recomendados, ambos classificados segundo a ASABE (2008). O valor médio das vazões alterou em 0,33% do calculado por meio da curva característica do emissor descrita no catálogo do fabricante.

A Figura 2 mostra os coeficientes de uniformidade plotados no gráfico de controle de qualidade. O limite superior de controle não indica problemas no sistema para este caso, já que maiores valores de uniformidade são indicados para qualquer sistema.



$\bar{x}$  - Pressão média (kPa), LSC – limite superior de controle, LIC – limite inferior de controle, marcadores azuis avaliações com as pressões entre LSC e LIC, marcadores vermelhos avaliações com as vazões fora do LSC e LIC.

Figura 1. Gráfico de controle de qualidade para os valores de coeficiente de uniformidade de distribuição (A) e o coeficiente de uniformidade de emissão (B)

Os valores obtidos tanto para CUD como para UE estão entre os limites de controle, o que indica a qualidade do processo de forma ampla. Entretanto, é observada no gráfico, nos primeiros pontos da UE (Figura 2B), uma sequência não aleatória dos dados, sugerindo a falta de controle de qualidade e que devem ser investigadas prováveis causas.

Para testes e ensaios de sistemas de irrigação novos, o sistema deve estar em controle de qualidade para que fontes de variabilidade não incidam desde a primeira observação. Segundo Montgomery (2016) esta é a primeira fase da utilização dos gráficos de controle, verificar se o sistema ou processo está em controle de qualidade; Na segunda fase os dados devem estar estáveis e depois monitorar a qualidade do processo. De forma análoga o sistema deve estar estável para que o desempenho hidráulico seja testado e que fontes de variabilidade externa não estejam incidindo.

Os valores médios obtidos para o sistema de bombeamento (ponto de coleta 1), pode ser observado pela análise descritiva (Tabela 2)

Tabela 2. Estatística descritiva das vazões e pressões no ponto de coleta 2 do sistema de bombeamento

| Pressão inicial (kPa) | Pressão (kPa) |        |        |            |         |            |      |
|-----------------------|---------------|--------|--------|------------|---------|------------|------|
|                       | Média         | Máximo | Mínimo | 1º Quartil | Mediana | 3º Quartil | CV   |
| 80                    | 81,45         | 82,78  | 80,00  | 81,06      | 81,21   | 81,99      | 0,86 |
| 100                   | 101,91        | 103,97 | 100,00 | 101,47     | 102,40  | 102,40     | 0,87 |
| 120                   | 121,17        | 122,81 | 119,38 | 120,55     | 120,95  | 122,32     | 0,84 |
| 140                   | 139,77        | 141,35 | 137,53 | 139,20     | 139,78  | 140,76     | 0,74 |
| 160                   | 160,11        | 161,36 | 159,11 | 159,80     | 160,19  | 160,58     | 0,35 |

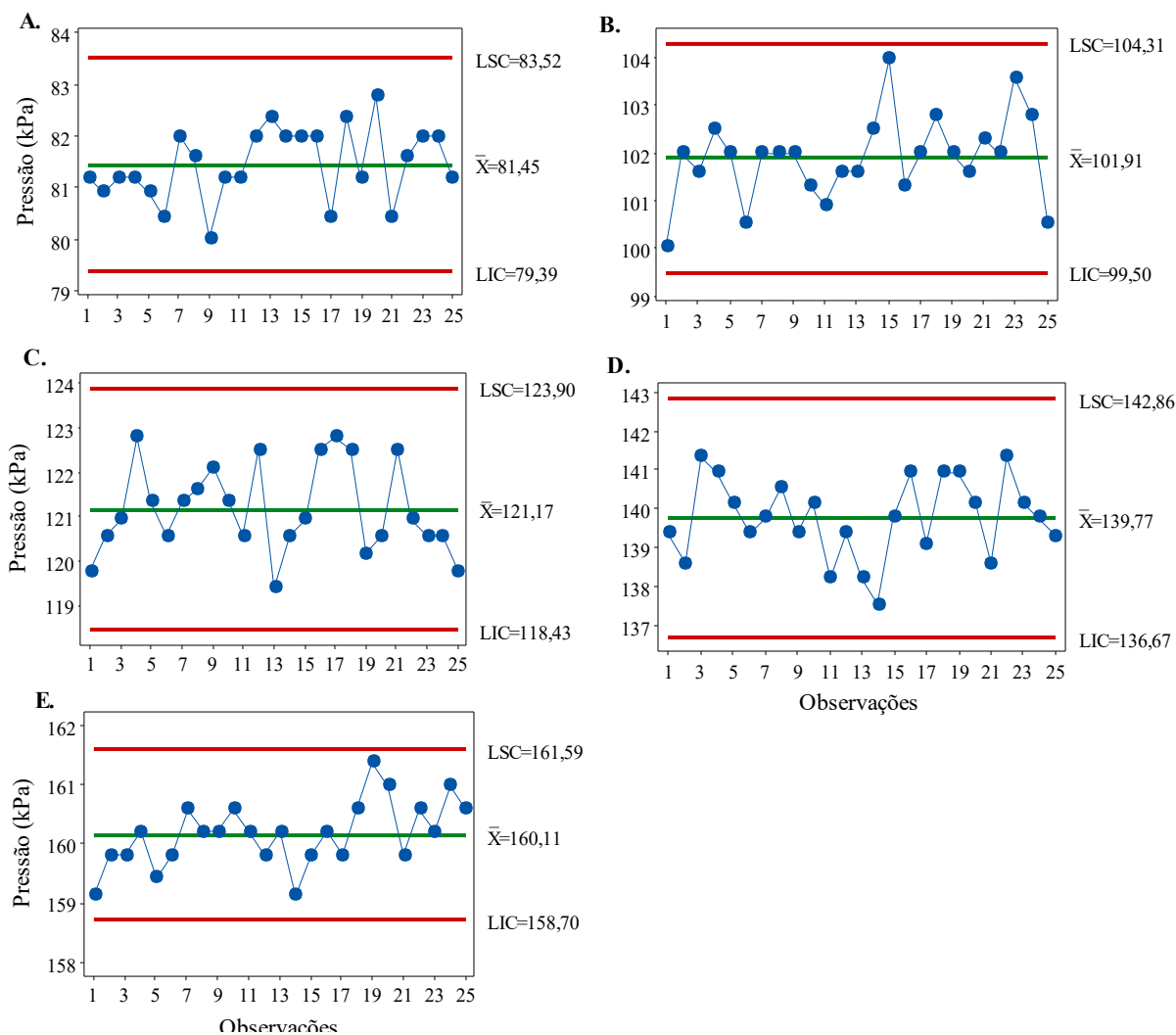
  

|     | Vazão (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) |        |        |            |         |            |      |
|-----|---|--------|--------|------------|---------|------------|------|
|     | Média                                   | Máximo | Mínimo | 1º Quartil | Mediana | 3º Quartil | CV   |
| 80  | 1,83                                    | 1,92   | 1,77   | 1,80       | 1,85    | 1,87       | 2,52 |
| 100 | 1,77                                    | 1,82   | 1,72   | 1,75       | 1,77    | 1,80       | 1,44 |
| 120 | 1,65                                    | 1,72   | 1,60   | 1,63       | 1,65    | 1,67       | 1,96 |
| 140 | 1,52                                    | 1,57   | 1,47   | 1,52       | 1,52    | 1,55       | 1,54 |
| 160 | 1,38                                    | 1,50   | 1,26   | 1,36       | 1,40    | 1,40       | 3,02 |

Pode ser observado (Tabela 2) com o aumento da pressão de funcionamento, ou seja, com maior altura manométrica, a pressão tende a ficar mais estável pela redução do CV para 0,35. Segundo Córcoles et al. (2016) o aumento da pressão do sistema de bombeamento representa melhor eficiência energética e compensa o aumento de pressão.

Para as vazões os valores extremos de 80 e 160 kPa obtiveram os maiores valores de coeficiente de variação, obtendo desta forma um intervalo de funcionamento entre 100 e 120 kPa. De forma análoga segundo Córcoles et al. (2016) vazões baixas tendem a aumentar a energia consumida pelo sistema de bombeamento.

A Figura 3 mostra os gráficos de controle de qualidade para observações individuais correspondentes a pressão de funcionamento da motobomba. Todos os valores seguiram uma distribuição normal.



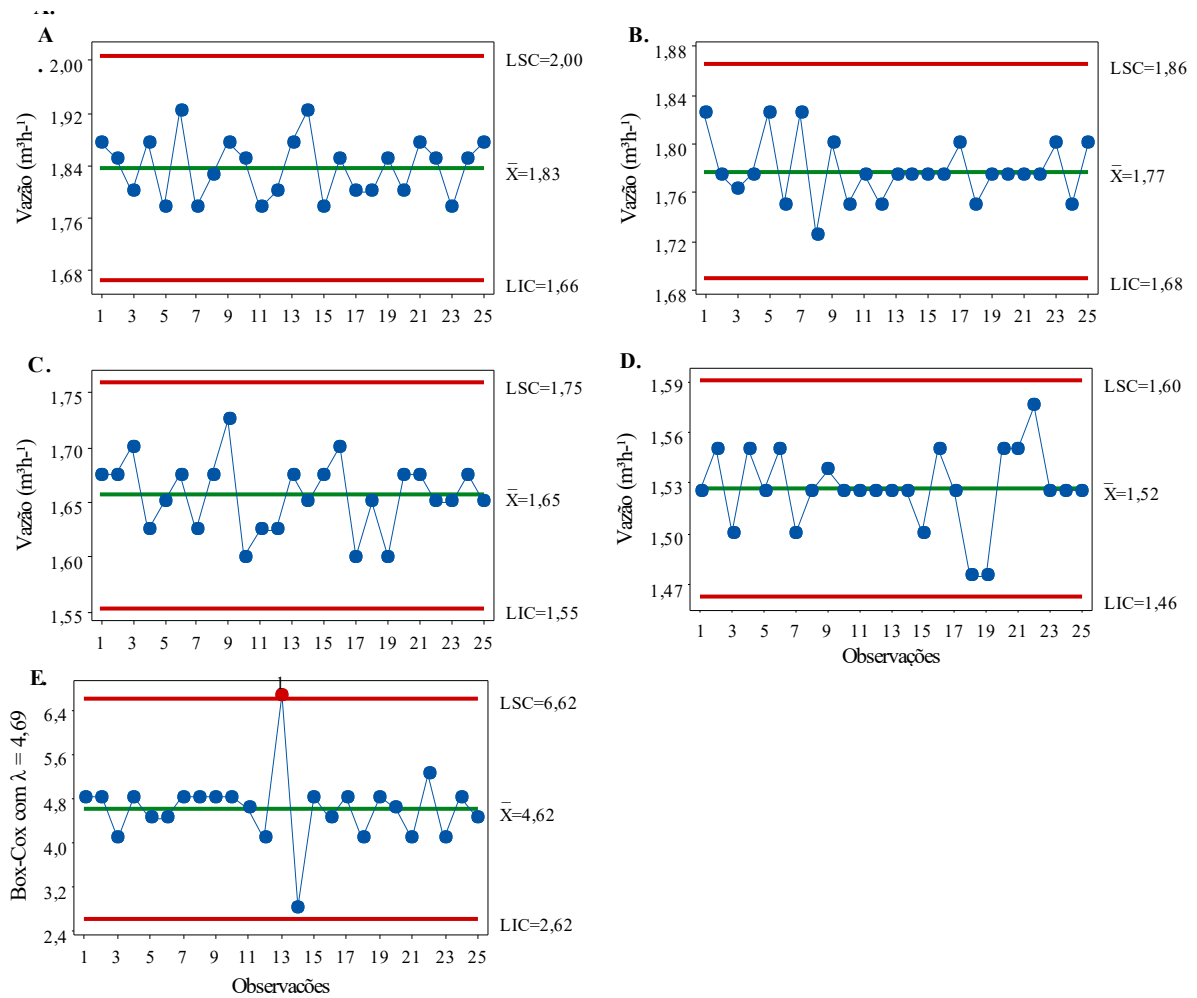
$\bar{x}$  - Pressão média (kPa), LSC – limite superior de controle, LIC – limite inferior de controle, marcadores azuis avaliações com as pressões entre LSC e LIC, marcadores vermelhos avaliações com as vazões fora do LSC e LIC.

Figura 2. Gráficos de controle estatístico para as pressões obtidas do sistema de bombeamento, pressão inicial de 80 kPa (A), 100 kPa (B), 120 kPa (C), 140 kPa (D) e 160 kPa (E)

Todos os valores observados, em cada pressão inicial, se mantiveram entre os limites de controle de qualidade, indicando que o sistema de bombeamento pode ser usado para ensaios com gotejadores.

Em uma segunda interpretação, baseado em Montgomery (2016), a pressão inicial de 160 kPa (Figura 3E) mostra uma leve tendência ascendente dos valores de pressão, indicando alguma fragilidade dos materiais ou que fatores sazonais estão interferindo no processo de bombeamento, como a temperatura (Dogan et al., 2010).

Os valores de vazão da pressão inicial de 160 kPa não seguiram uma distribuição normal e foi realizado a transformação. A Figura 4 mostra os gráficos de controle para os valores de vazão obtidos.



$\bar{x}$  - Pressão média (kPa), LSC – limite superior de controle, LIC – limite inferior de controle, marcadores azuis avaliações com as pressões entre LSC e LIC, marcadores vermelhos avaliações com as vazões fora do LSC e LIC.

Figura 3. Gráficos de controle estatístico para as vazões obtidas do sistema de bombeamento, para pressão inicial de 80 kPa (A), 100 kPa (B), 120 kPa (C), 140 kPa (D) e 160 kPa (E)

Os valores de vazão seguiram um controle estatístico de qualidade, exceto para a pressão inicial de 160 kPa (Figura 4E). Este ponto fora de controle indica um valor atípico, atribuíveis a causas de curta duração (Montgomery, 2016). Estas causas podem ser remetidas a erros de transmissão de dados, erros de medida dos equipamentos, oscilação no fornecimento de energia, obstruções temporárias e não ao processo de bombeamento. Porém, a maior altura manométrica incidiu sobre este efeito.

As vazões demonstraram alguns valores não aleatórios (Figura 4B, Figura 4D e Figura 4E) iguais e contínuos. Nestes casos, indicariam um processo fora de um controle estatístico, entretanto pode ser explicada pela resposta de amostragem adaptativa (Montgomery, 2016), como por exemplo, o intervalo de tempo da coleta de dados pode induzir este efeito.



Os padrões não aleatórios foram identificados por Souza et al. (2012) em equipamentos para monitoramento da qualidade da água, e a causa pode estar associada a vícios do instrumento de medição causando resultados iguais e contínuos como observados no monitoramento da vazões ((Figura 4B, Figura 4D e Figura 4E).

Os padrões não aleatórios observados em gráficos de controle precisam de experiência e conhecimento do processo. Segundo Nomelini et al. (2009) o reconhecimento desses padrões para que o processo esteja fora de controle estatístico, depende de uma análise de probabilidade com níveis de significância pré-estabelecidos.

A curva característica da bancada de testes (Figura 5) demonstra os requisitos de vazão e pressão que a bancada fornece para os testes em gotejadores.

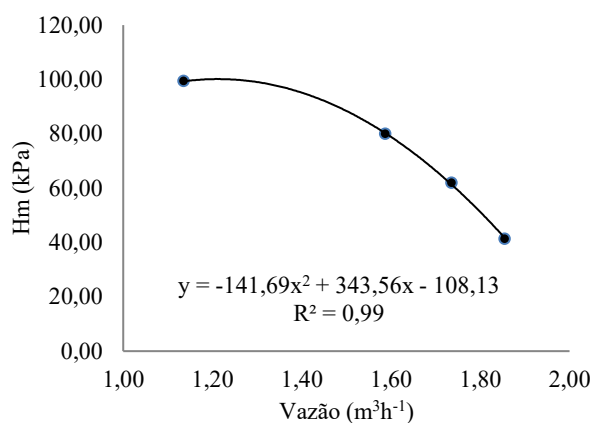
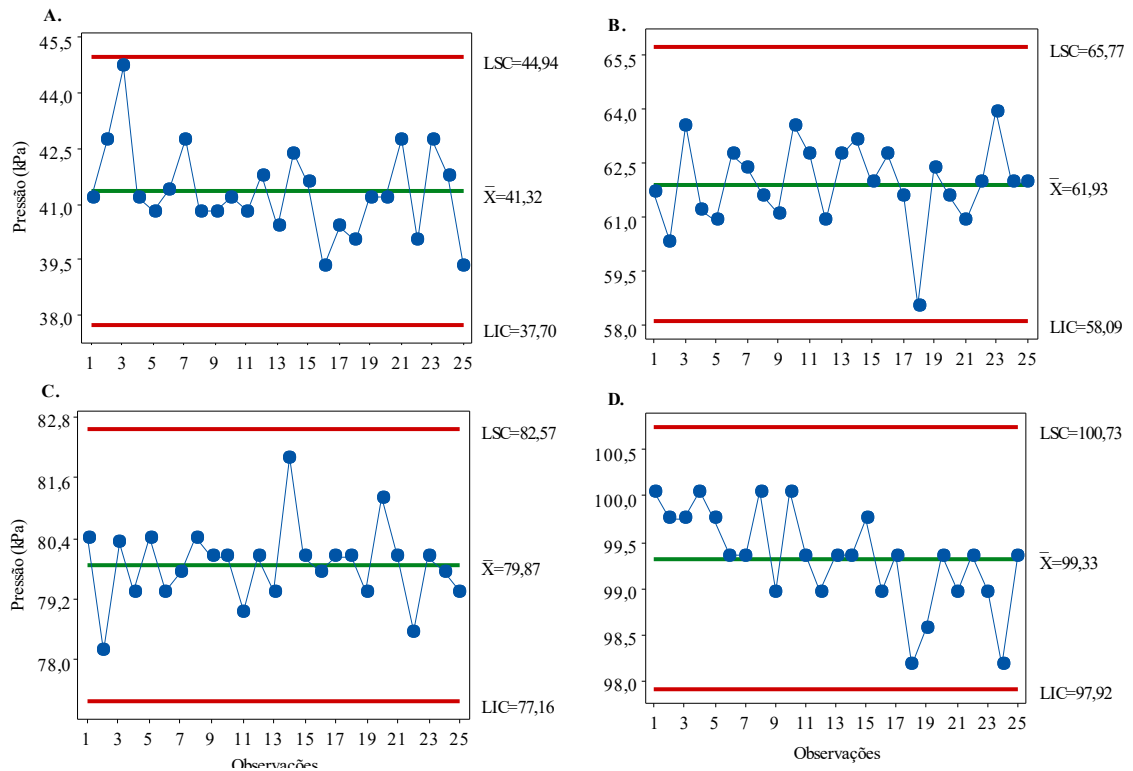


Figura 4. Curva característica de funcionamento da bancada de testes

As características demonstradas na curva indicam os limites de linhas laterais, vazão dos gotejadores e range de pressão que a bancada consegue fornecer para os ensaios. Os valores obtidos de pressão pelo sistema de bombeamento (Tabela 2) e os indicados na curva, demonstram que as perdas de carga localizada da bancada, devido aos inúmeros equipamentos de medição, diminuiriam a capacidade de pressão e vazão.

A Figura 6 mostra os gráficos de controle para a pressão da bancada (ponto de coleta 2). Todas as observações estão entre os limites de controle indicando que a bancada de testes pode ser utilizada para ensaios com tubo gotejadores.



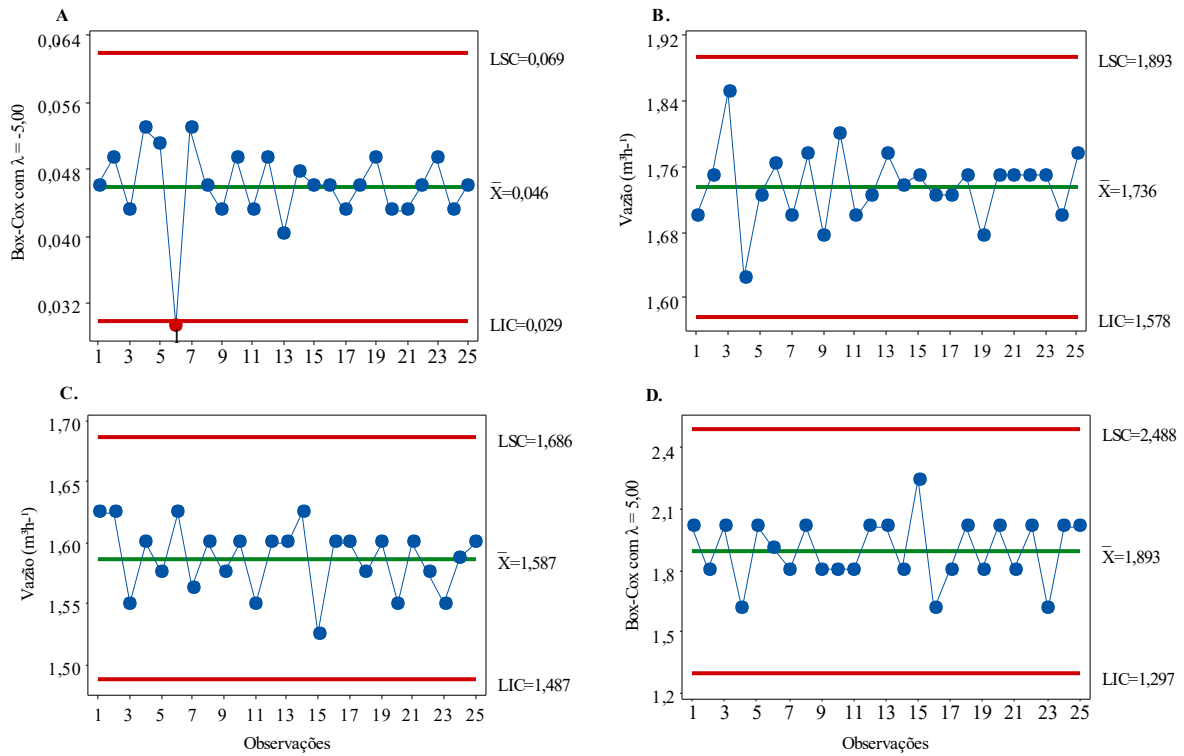
$\bar{x}$  - Pressão média (kPa), LSC – limite superior de controle, LIC – limite inferior de controle, marcadores azuis avaliações com as pressões entre LSC e LIC, marcadores vermelhos avaliações com as vazões fora do LSC e LIC.

Figura 5. Gráficos de controle de qualidade para as pressões obtidas na bancada de testes; pressão inicial de 40 kPa (A), 60 kPa (B), 80 kPa (C) e 100 kPa (D)

Para a pressão inicial de funcionamento da bancada de 100 kPa (Figura 6 D) o gráfico de controle demonstrou uma leve tendência descendente, o que indica problemas sazonais como a temperatura ou desgaste de equipamentos e materiais.

A temperatura Segundo Rocha et al. (2017) a temperatura entre os limites designados pela ABNT/NBR ISO 9261:2006, não alteram de forma significativa vazões de gotejadores. Desta forma, para a maior pressão inicial da bancada de 100 kPa (Figura 6D) existe uma leve tendência, assim como para a maior pressão para o sistema de bombeamento 160 kPa (Figura 3E), portanto, conclui que houve desgaste ou falha dos equipamentos.

A Figura 7 mostra os gráficos de controle para as vazões da bancada de testes para as diferentes pressões iniciais de funcionamento. Para as pressões iniciais de 40 e 100 kPa as vazões não seguiram uma distribuição e foi necessário a transformação dos dados.



$\bar{x}$  - Pressão média (kPa), LSC – limite superior de controle, LIC – limite inferior de controle, marcadores azuis avaliações com as pressões entre LSC e LIC, marcadores vermelhos avaliações com as vazões fora do LSC e LIC.

Figura 6. Gráficos de controle de qualidade para as vazões obtidas na bancada de testes; pressão inicial de 40 kPa (A), 60 kPa (B), 80 kPa (C) e 100 kPa (D)

Para a pressão inicial de 40 kPa (Figura 7A) uma observação de vazão está fora do limite de controle. De forma análoga a vazão do sistema de bombeamento para 160 kPa (Figura 4E), este ponto não interfere no sistema de bancada por ser uma observação atípica, de uma causa de curta duração.

As demais vazões da bancada seguem um controle estatístico de qualidade. Portanto, a utilização da bancada nesses intervalos são recomendados.

Os ensaios com sistemas de irrigação por gotejamento, além de acatar os requisitos indicados pela ABNT/NBR ISO 9261:2006, podem ter observações fora dos limites de controle ou dados não aleatórios que indicam variações no sistema, com isto a estatística de controle de qualidade pode identificar estas instabilidades e proporcionar a procura por causas, melhorando as condições dos ensaios.

## CONCLUSÃO

1- O sistema de bombeamento obteve os valores de vazão e pressão entre os limites de controle de qualidade e sem observações não aleatórias para as pressões iniciais de 80 e 120 kPa.

- 2- A utilização desta bancada de testes para avaliações de gotejadores pode ser utilizada nas pressões iniciais de 60 e 80 kPa, valores que não obtiveram pontos fora de controle e mantiveram a aleatoriedade.
- 3- O sistema de irrigação instalado com funcionamento de 80 kPa se manteve com coeficiente de uniformidade de distribuição, emissão e de variação entre os limites recomendados.
- 4- Os gráficos de controle de qualidade indicaram variabilidade nas variáveis de pressão e vazão da bancada de testes. Para ensaios com gotejadores devem ser eliminadas estas causas de variação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubos emissores – Especificações e métodos de ensaio. São Paulo, p. 9, 2006.

ANDRADE, Maurício Guy de et al. Uniformity microsprinkler irrigation system using statistical quality control. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 47, n. 4, p.1-7, 2017.

ASABE STANDARDS. Evaluation of irrigation furrows, ASAE EP 419.1 FEB 1993 (R2008).

CÓRCOLES, Juan I.; TARJUELO, José M.; MORENO, Miguel A.. Methodology to improve pumping station management of on-demand irrigation networks. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 144, p.94-104, abr. 2016.

COSTA, Danniely O. et al. Biological treatment of drippers clogged by the use of treated domestic wastewater. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 20, n. 7, p.595-599, jul. 2016.

DOGAN, E.; KIRNAK, H.. Water temperature and system pressure effect on drip lateral properties. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 28, n. 5, p.407-419, 23 dez. 2009.

FOLLADOR, Franciele Aní Caovilla et al. Controle de qualidade da água medido através de cartas de controle de shewhart, cusum e mmep. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 3, p.183-197, 2012.

FRIGO, Jiam Pires et al. Comparação entre gráficos de controle de shewhart, cusum e mmep no processo de irrigação por aspersão convencional. **Irriga**, [s.l.], v. 1, n. 01, p.56-70, 28 nov. 2016.

FRIGO, Jiam Pires et al. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-PR. **Irriga**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.318-327, 11 jul. 2013.

JIANG, Shufang; KANG, Yaohu. Evaluation of Microirrigation Uniformity on Laterals Considering Field Slopes. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, [s.l.], v. 136, n. 6, p.429-434, jun. 2010.

JOHN L. MERRIAM, JACK KELLER, Utah State University. Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University, 1978, 271p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design. S.1: Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133 p.

Montgomery C. D. Introdução ao controle estatístico de qualidade. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 549p.

NIU, Wenquan; LIU, Lu; CHEN, Xue. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 31, n. 4, p.545-555, 14 mar. 2012.

NOMELINI, Quintiliano Siqueira Schroden; FERREIRA, Eric Batista; OLIVEIRA, Marcelo Silva de. Estudos dos padrões de não aleatoriedade dos gráficos de controle de Shewhart: um enfoque probabilístico. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 16, n. 3, p.414-421, 2009.

ROCHA, Hermes S. da et al. Dripper testing: Application of statistical quality control for measurement system analysis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 9, p.587-593, set. 2017.

SOLOMON, Ken. Manufacturing Variation of Trickle Emitters. **Transactions Of The Asae**, [s.l.], v. 22, n. 5, p.1034-1038, 1979.

SOUZA, Lucas de Paula Ferreira; CAMPOS, Cláudio Milton Montenegro. Evaluation of turbidity measuring instruments using statistical process control. **Ciência e Agrotecnologia**, [s.l.], v. 36, n. 4, p.424-430, ago. 2012.

SOUZA, Lucas de Paula Ferreira; CAMPOS, Cláudio Milton Montenegro. Evaluation of turbidity measuring instruments using statistical process control. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 4, p.424-430, 2012.

SZEKUT, Flavio, Daniel et al. Biofouling and performance of labyrinth-type emitters in drip irrigation with treated domestic sewage. **African Journal Of Agricultural Research**, [s.l.], v. 11, n. 39, p.3839-3846, 29 set. 2016.

TEIXEIRA, Marconi Batista. Tratamento para desentupimento de gotejadores convencionais. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p.235-248, 2008.

### **CAPÍTULO 3: DESEMPENHO HIDRÁULICO DE GOTEJADORES COM DIFERENTES ÁGUAS E DECLIVIDADES DA LINHA LATERAL**

**Resumo:** A pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho hidráulico de gotejadores com diferentes águas e declividades das linhas laterais. O experimento foi realizado em bancada de testes e consistiu em delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas; primeiro fator com quatro tipos de água, representando as parcelas: água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro de aves; segundo fator declividades da linha lateral, constituindo as subparcelas: em aclave, em nível e declive. A estatística experimental constituiu de análise de variância com posterior desdobramento da interação e teste Tukey a 5% de probabilidade para comparação das médias das vazões dos gotejadores. Foi realizada a estatística de controle de qualidade por meio dos gráficos de controle de Shewart  $\bar{x}$  com interpretações baseadas nos limites de controle superior e inferior, além do reconhecimento de padrões não aleatórios. Águas com qualidade inferior modificaram as vazões dos gotejadores testados independente da variação de pressão interna causada pela declividade da linha lateral. A água com fertilizante ( $300 \text{ mg L}^{-1}$ ) obteve as melhores condições de qualidade de irrigação temporal verificadas pelos gráficos de controle. A irrigação com efluente de abatedouro de aves obteve as mesmas vazões em qualquer declividade da linha lateral. O efluente de fecularia obteve as menores vazões entre todas as águas.

Palavras-chave: fertirrigação, gráfico de controle de shewart, águas residuárias

## INTRODUÇÃO

A crescente utilização da água para a produção de alimento, aliada à necessidade hídrica dos centros urbanos e exigências ambientais rigorosas, indica uma obrigatoriedade da melhoria da eficiência dos sistemas de irrigação (Christofidis, 2013).

Uma das alternativas para este aumento da eficiência na agricultura irrigada é o reaproveitamento na irrigação de águas com características físico-químicas, muitas vezes, de qualidade inferior, como as águas residuárias (Alobaidy et al., 2010).

A utilização de águas residuárias, águas com fertilizantes, ou águas que sofrem variação em sua qualidade fora dos limites aceitáveis, interfere nas condições hidráulicas dos emissores. Segundo Clark et al. (2007) entre os principais fatores que influenciam na distribuição de água correta estão a forma da área e a quantidade e qualidade da água.

Para áreas onduladas existe variabilidade na pressão interna da linha lateral que altera a vazão (Marcuzzo & Wendland, 2011). Além disto, linhas laterais em declive podem obter comprimentos maiores devido à maior pressão de entrada (Khemaies et al., 2013).

Para avaliações em sistemas por gotejamento se utiliza valores de vazão, independente da declividade das linhas laterais em aclave ou declive (Jiang & Kang, 2010). Com a utilização de água com qualidade inferior, além do monitoramento convencional, utiliza-se a estatística de controle de qualidade (Hermes et al., 2013; Juchen et al., 2013). Esta estatística verifica valores de vazões fora de controle estatístico, além de padrões não aleatórios, como as tendências (Montgomery, 2016).

Ante o exposto, objetivou-se nesta pesquisa avaliar a utilização de água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro de aves para irrigação por gotejamento em sistemas com linhas laterais com declividades em aclave, declive e em nível.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Desenvolvimento de Protótipos da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, coordenadas geográficas 24° 56' 26" S e 53° 33' 32" O, no período de 01/07/2017 a 01/09/2017. O clima para a região é subtropical Cfa segundo a classificação de Köppen; altitude de 781 m; precipitação pluviométrica média de 1822 mm.

Para os experimentos foi construída uma bancada de testes de irrigação por gotejamento de 5 m de comprimento, por meio de um dispositivo de roldanas poderia realizar a volta da

linha lateral obtendo laterais com 10 m; largura de 1,55 m com espaço necessário para quatro linhas laterais; calhas para retorno da água; motobomba de 0,5 CV,  $1,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  em 100 kPa (ANEXO 1 catálogo do fabricante); constituída por perfis de aço com dispositivo de roldanas e cabos de sustentação para alteração da declividade da linha lateral. A Figura 1 mostra o desenho da bancada em perspectiva cônica.

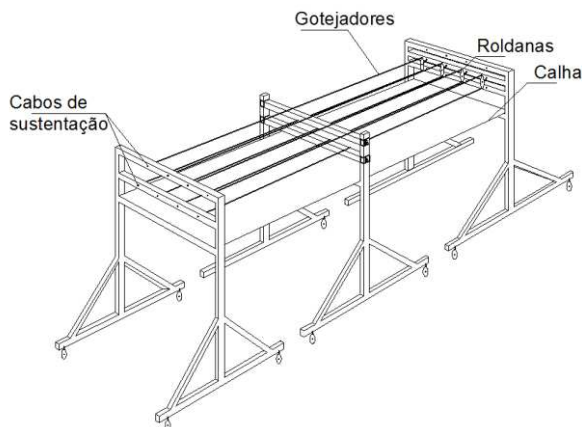


Figura 1. Desenho ilustrativo da bancada de testes utilizada

Os gotejadores testados foram da marca IRRITEC®, modelo P1, utilizados em irrigações superficiais e subsuperficial, consistindo em emissores do tipo labirinto de fluxo turbulento, espaçados a cada 0,50 m e acoplados à parede do tubo mediante mecanismo contra aspiração de detrito (ANEXO catálogo do fabricante).

O gotejador possui diâmetro nominal de 16,00 mm, pressão máxima de trabalho de 80 kPa, coeficiente de proporcionalidade da equação do emissor (K) 1,26 e expoente de descarga (x) 0,48.

O cabeçal para controle de fluxo das linhas laterais possuía: filtro de disco de 120 mesh como recomendado pelo fabricante dos gotejadores, da marca IRRITEC® modelo FLD; controlador de pressão da marca BERMAD® modelo 0075 PRVy; hidrômetro ultrassônico do modelo Hydros da marca DIEHL METERING®; manômetro digital da marca INSTRUTEMP®, Modelo 8215 (100 mca) calibrado pelo laboratório de metrologia do SENAI-PR (Serviço de aprendizagem industrial).

O experimento foi instalado em blocos casualizados com parcelas subdivididas em dois fatores, sendo o fator principal o tipo de água, representando as parcelas: água limpa (de abastecimento público), água com fertilizantes nitrogenados a uma concentração de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  de N, efluente de fecularia, efluente de abatedouro de aves. A declividade da linha lateral como fator secundário, constituindo as subparcelas: em declive (2% de declividade); em nível



(0%); e em aclave (2% de declividade). Foram realizadas 25 repetições a fim de abranger a estatística de controle.

Cada água era condicionadas em recipientes plásticos de 80 L e no momento dos testes era bombeada de um reservatório de 100 L até à bancada, sendo posteriormente retornada por calhas ao reservatório.

A água limpa era de abastecimento público do laboratório. Para a água com fertilizantes foi usada uréia (44% de N), que foi pesada e realizada a mistura correspondente a 300 mg L<sup>-1</sup> de N, valor entre 200 e 400 mg L<sup>-1</sup> indicados como limites para sistemas de gotejamento (Borges & Coelho, 2009).

O efluente de abatedouro de aves utilizado recebeu os seguintes tratamentos: tratamento de peneiras rotativas, tanque equalizador e flotor físico-químico, passando por duas lagoas anaeróbias, reator aerado e decantadores secundários; por último, ficando armazenado em lagoas facultativas onde foi realizada a coleta para o experimento.

O efluente de fecularia foi gerado pela extração do amido e lavagem das raízes da mandioca. Teve tratamento por um biodigestor anaeróbio do tipo lagoa coberta, e posteriormente era destinado a lagoas facultativas onde foi realizada a coleta.

Todas as águas foram submetidas à análise físico-química no dia do experimento seguindo a metodologia APHA (2012).

A variável resposta analisada foi à vazão média dos gotejadores para cada tratamento. A vazão de cada gotejador foi obtida através da coleta dos volumes de água por copos coletores por um tempo de 3 min; em gotejadores escolhidos no sistema segundo a metodologia de Keller & Karmelli (1975). A pressão de funcionamento foi regulada em 80 kPa.

Para a construção e interpretação dos gráficos de controle para  $\bar{x}$  foi utilizada metodologia descrita por Montgomery (2016). Os gráficos de controle possuem três linhas: a central que indica a média dos valores observados; a do limite de controle inferior (LIC), Eq.1; e a do limite superior de controle (LSC), Eq. 2.

$$LIC = \bar{x} - A_2 \bar{R} \quad (1)$$

$$LSC = \bar{x} + A_2 \bar{R} \quad (2)$$

Em que:

$\bar{x}$  - Média do processo;

$A_2$  - Constante que depende do número de amostra e da amplitude relativa; e,

$\bar{R}$  - Amplitude médias das amostras.

O critério básico para um processo em controle estatístico de qualidade são os pontos estarem plotados entre os limites de controle de qualidade. Outros critérios complementares tornam a interpretação do gráfico mais sensível, além de indicar mais rapidamente um efeito de variabilidade.

Entre os critérios complementares destaca-se a incidência de sequências de pontos (no mínimo oito pontos contínuos), tendências ascendentes e descendentes, deslocamento no nível do processo, padrões cíclicos, pontos plotados próximo aos limites de controle e agrupamento em torno da linha principal.

Para as análises das vazões na estatística experimental foi realizada ANOVA, com posterior desdobramentos dos graus de liberdade, e comparação de médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Foram confeccionados os gráficos de controle de qualidade para médias Shewart  $\bar{x}$ . Foi utilizado o software Minitab 16.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados em relação à qualidade das águas utilizadas nas irrigações. Segundo Holanda et al. (2016) os valores de pH e potássio do efluente de fecularia e somente potássio para o efluente de abatedouro estão acima dos limites indicados para utilização na irrigação, considerando as características do solo e de produção. Para sistemas localizados que possuem potencial de entupimento, Nakayama (1986) classifica os valores de alguns parâmetros de qualidade em baixo, moderado e severo risco de obstrução ou de restrição ao uso.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos analisados para a água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro

| Parâmetros   | Resultados |                        |                       |                        |
|--|------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
|  | Água Limpa | Água com Fertilizantes | Efluente de Fecularia | Efluente de Abatedouro |
| Condutividade Elétrica (dS m <sup>-1</sup> )       | 0,19       | 0,18                   | 0,63                  | 0,87                   |
| pH   | 8,57*      | 8,50*                  | 8,70*                 | 7,60                   |
| Alcalinidade de Carbonatos (mg L <sup>-1</sup> )   | 0,10       | 0,00                   | 0,10                  | 0,10                   |
| Alcalinidade de Bicarbonatos (mg L <sup>-1</sup> ) | 41,90      | 67,50                  | 364,40                | 257,40                 |
| Cloretos (mg L <sup>-1</sup> )                     | 14,20      | 12,40                  | 14,20                 | 10,60                  |
| Ferro Total (mg L <sup>-1</sup> )                  | 0,26       | 0,31                   | 2,81*                 | 1,48                   |
| Manganês (mg L <sup>-1</sup> )                     | 0,03       | 0,02                   | 0,19                  | 0,08                   |
| Sólidos Totais Dissolvidos (mg L <sup>-1</sup> )   | 60,00      | 80,00                  | 380,00                | 520,00                 |
| Sólidos em Suspensão (mg L <sup>-1</sup> )         | 20,00      | 40,00                  | 140,00*               | 200,00*                |
| Cálcio (mg L <sup>-1</sup> )                       | 8,01       | 15,20                  | 17,60                 | 12,40                  |
| Magnésio (mg L <sup>-1</sup> )                     | 6,31       | 7,29                   | 18,40                 | 9,47                   |
| Dureza Total (mg L <sup>-1</sup> )                 | 46,00      | 68,00                  | 120,00                | 70,00                  |
| Potássio (mg L <sup>-1</sup> )                     | 2,00       | 2,00                   | 88,00                 | 20,00                  |
| Sódio (mg L <sup>-1</sup> )                        | 13,00      | 23,00                  | 29,00                 | 123,00                 |

\* Valores com alta restrição ao uso em sistemas de irrigação localizada

Grande parte dos sólidos suspensos é retida no sistema de filtragem, porém para obstrução dos gotejadores é verificada a interferência tanto do tamanho das partículas como de sua concentração (Niu et al., 2013).

Nas águas utilizadas são verificados valores de pH a cima dos considerados com severo risco de obstrução. Valores de pH acima de 7,2 favorecem a precipitação de elementos como o cálcio e o magnésio em filtros, tubulação e nos emissores, contribuindo para o entupimento (Nakawama et al., 2007), como também reações com ferro e manganês.

A análise descritiva (Tabela 2) mostra as características de vazão e os limites de controle de qualidade.

Tabela 2. Análise descritiva das vazões e os limites de controle para água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro de aves para declividades da linha lateral em aclave, em nível e em declive

| Declividade da linha lateral | Tipo de Água           | Vazões (L h <sup>-1</sup> ) |       |       |         |               |                                   |                                   |
|------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------|-------|---------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                              |                        | Média                       | Mín   | Máx   | Mediana | Desvio Padrão | Limite inferior de controle (LIC) | Limite superior de controle (LSC) |
| Aclave                       | Água limpa             | 3,446                       | 3,397 | 3,495 | 3,445   | 0,022         | 3,405                             | 3,492                             |
|                              | Água com fertilizantes | 3,437                       | 3,413 | 3,448 | 3,439   | 0,009         | 3,418                             | 3,459                             |
|                              | Água de fecularia      | 3,376                       | 3,319 | 3,396 | 3,379   | 0,015         | 3,356                             | 3,400                             |
|                              | Água de abatedouro     | 3,460                       | 3,405 | 3,531 | 3,448   | 0,039         | 3,440                             | 3,484                             |
| Nível                        | Água limpa             | 3,447                       | 3,422 | 3,470 | 3,449   | 0,015         | 3,424                             | 3,472                             |
|                              | Água com fertilizantes | 3,452                       | 3,422 | 3,475 | 3,454   | 0,011         | 3,432                             | 3,475                             |
|                              | Água de fecularia      | 3,377                       | 3,335 | 3,400 | 3,382   | 0,015         | 3,364                             | 3,396                             |
|                              | Água de abatedouro     | 3,455                       | 3,386 | 3,510 | 3,454   | 0,038         | 3,408                             | 3,501                             |
| Declive                      | Água limpa             | 3,476                       | 3,445 | 3,501 | 3,476   | 0,014         | 3,448                             | 3,509                             |
|                              | Água com fertilizantes | 3,436                       | 3,401 | 3,453 | 3,437   | 0,011         | 3,405                             | 3,496                             |
|                              | Água de fecularia      | 3,421                       | 3,405 | 3,436 | 3,419   | 0,009         | 3,404                             | 3,439                             |
|                              | Água de abatedouro     | 3,455                       | 3,386 | 3,510 | 3,454   | 0,038         | 3,430                             | 3,472                             |

A menor vazão registrada e a menor média foram com efluente de fecularia para as linhas laterais em aclave. Em contrapartida as vazões do efluente de abatedouro de aves foram as maiores em aclave, desta forma observa-se que a declividade da linha lateral proporciona diferentes vazões de acordo com a qualidade de água utilizada.

As maiores variações de vazão foram para o efluente de abatedouro para as três declividades. Além disto, obteve-se a maior vazão entre todos os tratamentos, na declividade em aclave.

Para verificar a relação entre as águas e a declividade da linha lateral foi realizada a análise de variância que indicou interação entre os tratamentos (Tabela 3). Desta forma, existe influência do tipo de água associado à declividade da linha lateral na vazão média dos

gotejadores. Com isto, foi realizado o desdobramento dos graus de liberdade da interação e comparação das médias (Tabela 4).

Tabela 3. Análise de variância para o tipo de água e declividade da linha lateral

| Causa da variação            | GL  | SQ     | QM     | F       |
|------------------------------|-----|--------|--------|---------|
| Bloco                        | 24  | 0,0148 | 0,0006 | 2,700*  |
| Tipo de água                 | 3   | 0,2080 | 0,0693 | 303,30* |
| Resíduo                      | 72  | 0,0165 | 0,0002 |         |
| Declividade da linha lateral | 2   | 0,0124 | 0,0062 | 15,338* |
| Interação                    | 6   | 0,0367 | 0,0061 | 15,092* |
| Resíduo                      | 192 | 0,0778 | 0,0004 |         |
| Total                        | 299 | 0,3662 |        |         |

\* Significativos a 5% de probabilidade, teste F

Tabela 4. Desdobramentos da interação e comparação de médias para a declividade da linha lateral e os tipos de água

| Tipo de água           | Declividade da linha lateral |          |          |
|------------------------|------------------------------|----------|----------|
|                        | Aclive                       | Nível    | Declive  |
| Água Limpa             | 3,446 ABb                    | 3,447 Ab | 3,476 Aa |
| Água com Fertilizante  | 3,437 Bb                     | 3,452 Aa | 3,436 Cb |
| Efluente de Fecularia  | 3,376 Cb                     | 3,377 Bb | 3,421 Da |
| Efluente de Abatedouro | 3,459 Aa                     | 3,455 Aa | 3,450 Ba |

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade

A comparação de médias indicou que a água limpa obteve diferença estatística com os maiores valores de vazão média em declive. A variação de pressão interna existente pela alteração da declividade da linha lateral alterou as vazões dos gotejadores. Segundo Clark et al. (2007) a pressão em uma linha lateral em declive tende a diminuir até atingir um valor mínimo e depois aumenta devido ao ganho pela depressão do terreno.

A vazão média dos gotejadores com fertilizantes nitrogenados obteve maiores valores para as linhas laterais em nível. Isto indica que a variação de pressão na linha lateral não alterou a vazão média dos gotejadores. Para Klein et al. (2015) a concentração de fertilizantes NPK não é preponderante para valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen e de coeficiente de variação para fertirrigações.

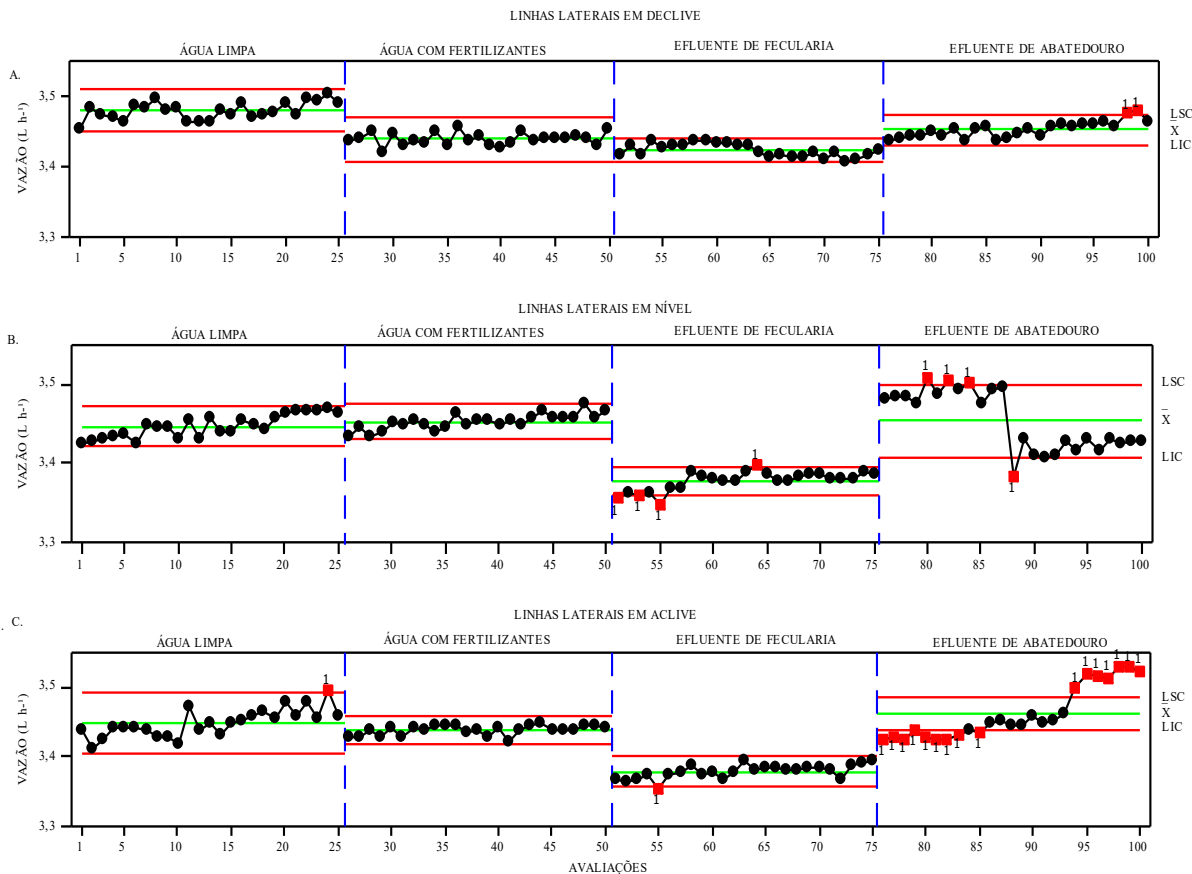
A irrigação com efluente de fecularia obteve as menores médias de vazão; isto indica que as características de qualidade do efluente de fecularia, como o pH, ferro total e sólidos suspensos (Tabela 1), exercem maior influência sobre a vazão dos emissores. Porém, Hermes et al. (2014) obtiveram coeficientes de uniformidade de Christiansen a cima de 90%.

Na irrigação com efluente de abatedouro de aves não houve diferença significativa nas vazões dos gotejadores entre as declividades da linha lateral. Isto indica que as variações de

pressão geradas pela declividade da linha lateral não alteraram significativamente a vazão dos gotejadores para este tipo de água.

Para as linhas laterais em nível, obteve-se diferença estatística entre o efluente de fecularia e as demais águas testadas, o que reforça a influência das características de qualidade deste tipo de água na vazão dos gotejadores.

O monitoramento realizado pelo gráfico de controle de qualidade (Figura 2) mostra a variabilidade existente entre os tipos de água e a declividade da linha lateral em um contexto temporal. Segundo Gove et al. (2013) as decisões do gráfico são rápidas e transparentes, podendo obter tomada de decisões e retirar particularidades do processo de gerenciamento ambiental.



$\bar{x}$  - vazão média (L h<sup>-1</sup>), LSC – limite superior de controle, LIC – limite inferior de controle, marcadores pretos avaliações com as vazões entre LSC e LIC, marcadores vermelhos avaliações com as vazões fora do LSC e LIC.

Figura 2. Gráficos de controle de qualidade das vazões dos gotejadores submetidos a irrigação com água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro de aves para as linhas laterais com declividades em declive (A), em nível

As vazões médias da água limpa permaneceram entre os limites de controle com as linhas laterais com declividades em declive (Figura 2A) e em nível (Figura 2B). Porém para

declividade em nível foi identificada uma tendência dos dados indicando um movimento contínuo ascendente. Segundo Montgomery (2016) tendências nos gráficos de controle de qualidade sugerem um desgaste ou deterioração dos componentes do sistema ou que fatores sazonais estão interferindo no processo.

Desta forma, as linhas laterais posicionadas em declive para água limpa, com as características físico-químicas observadas, indicam melhores condições de funcionamento. Em unidades operacionais em aclave e em nível deve-se realizar monitoramento com periodicidade por se tratar de declividades com menores características de controle de qualidade.

A qualidade do processo de irrigação com água com fertilizantes se manteve entre os limites de controle. Na declividade em nível (Figura 2B) houve uma sequência com oito pontos a cima da linha central, indicando perda de qualidade no processo. Porém, entre as águas testadas, a com fertilizantes obteve as melhores condições de irrigação.

A menor variabilidade das vazões médias o com uso de água com fertilizantes vista nos gráficos de controle, pode ser explicada pelo uso de polímeros que revestem as partículas da ureia. Estes polímeros solúveis em água reduz o atrito e proporcionam menores perdas de carga na tubulação (Al-Yarri et al., 2009).

Na irrigação com efluente de fecularia observam-se vazões médias entre os limites de controle apenas para a declividade da linha lateral em declive (Figura 2A). Todavia, são observadas sequências acima e abaixo da linha central, sugerindo que o processo não está sob controle de qualidade. Hermes et al. (2013) testaram efluente de fecularia e também obtiveram valores fora de controle estatístico para o coeficiente de variação da vazão dos emissores.

A irrigação com efluente de fecularia obteve, além das menores vazões médias (Tabela 1), nenhum processo adequado segundo os conceitos de controle de qualidade. Para sua utilização devem ser realizadas manutenções e limpezas com alta frequência. Uma das formas de manejo do sistema de gotejamento utilizando águas reutilizáveis é limpeza periódica (Li et al. 2015).

A irrigação com efluente de abatedouro de aves não obteve qualidade no processo em qualquer declividade da linha lateral. Ainda, podem ser identificadas tendências para as declividades em declive (Figura 2A) e em aclave (Figura 2C). Para a declividade em nível (Figura 2B) pode ser observado um deslocamento do processo na vazão média, o que pode sugerir mudanças ou variações ocorridas pela água ou pelos gotejadores.

A estatística de controle de qualidade por meio dos gráficos é uma ferramenta eficaz (Follador et al., 2012), que possibilita a identificação de problemas em gotejadores submetidos à irrigação com água de qualidade inferior (Silva et al., 2016). Além de mostrar o melhor layout do sistema (Andrade et al. 2017) e indicar melhores momentos de irrigar (Frigo et al. 2013).

A construção dos gráficos de controle permite indicar em uma primeira etapa, pontos que estão fora do controle estatístico de qualidade. Em uma segunda etapa, por meio do reconhecimento de alguns padrões não aleatórios, identifica-se a falta de controle além de realizar uma interpretação mais clara e objetiva das variabilidades do sistema.

## CONCLUSÃO

1. Água com qualidade inferior interfere nas vazões dos gotejadores independente da variação de pressão proporcionada pela declividade da linha lateral.
2. Água com fertilizantes nitrogenados ( $300 \text{ mg L}^{-1}$  de N) proporciona as melhores condições de controle de qualidade entre todas as águas testadas.
3. Efluente de abatedouro de aves não proporciona variação nas vazões dos gotejadores para linhas laterais em nível, aplane (2%) e em declive (2%).
4. O efluente de fecularia proporcionou as menores vazões para qualquer declividade da linha lateral em relação às demais águas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALOBADY, Abdul Hameed M. Jawad et al. Evaluation of Treated Municipal Wastewater Quality for Irrigation. **Journal Of Environmental Protection**, [s.l.], v. 01, n. 03, p.216-225, 2010.

AL-YAARI, M. et al. Effect of drag reducing polymers on oil–water flow in a horizontal pipe. **International Journal Of Multiphase Flow**, [s.l.], v. 35, n. 6, p.516-524, jun. 2009.

ANDRADE, Maurício Guy de et al. Uniformity microsprinkler irrigation system using statistical quality control. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 47, n. 4, p.1-7, 2017.

APHA - American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22.ed. Washington DC: APHA, 2012. 1496p.

BORGES, A. L.; COELHO, E. F. Fertirrigação em fruteiras tropicais. 2.ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009. 179p.

CHRISTOFIDIS, Demetrios. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 1, n. , p.115-127, 2013.

CLARK, G. A. et al. General system design principles. In: Lamm F. R.; Ayars, J. E.; Nakayama, F. S. Microirrigation for crop production: Design, operation, and management. Amsterdam: Elsevier, 2007. Cap 5, p. 161-220.

FOLLADOR, Franciele Aní Caovilla et al. Controle de qualidade da água medido através de cartas de controle de shewhart, cusum e mmep. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 3, p.183-197, 2012.

FRIGO, Jiam Pires et al. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-PR. **Irriga**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.318-327, 11 jul. 2013.

GOVE, Aaron D. et al. Control charts for improved decisions in environmental management: a case study of catchment water supply in south-west Western Australia. **Ecological Management & Restoration**, [s.l.], v. 14, n. 2, p.127-134, maio 2013.

HERMES, Eliane et al. Irrigation with wastewater from cassava processing with different concentrations of suspended solids. **Journal Of Food, Agriculture And Environment**, v. 12, n. 1, p.487-490, 2014.

HERMES, Eliane et al. Quality control in irrigation and fertigation with cassava processing wastewater into drip system. **Journal Of Food Agriculture And Environment**, v. 11, n. 2, p.841-845, 2013.

HOLANDA, J. S.; AMORIM, J. R. A.; FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, A. C.; SÁ, F. V. S. Qualidade da água para irrigação. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. da S.; Lacerda, C. F. de; Gomes Filho, E. (ed.). Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.4, p.35-50.

JIANG, Shufang; KANG, Yaohu. Evaluation of Microirrigation Uniformity on Laterals Considering Field Slopes. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, [s.l.], v. 136, n. 6, p.429-434, jun. 2010.

JUCHEN, Carlos Roberto; SUSZEK, Floriano Luiz; BOAS, Marcio Antonio Vilas. Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais. **Irriga**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.243-256, 11 jul. 2013.

KHEMAIES, Zayani et al. Design of Nonzero Uniformly Sloping Laterals in Trickle Irrigation Systems. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, [s.l.], v. 139, n. 5, p.419-425, maio 2013.



KLEIN, Márcio Roberto et al. Fertigation quality with drip irrigation system in grape orchard by using the process capability index. **Journal Of Food, Agriculture & Environment**, Helsinki, v. 13, n. 2, p.179-183, abr. 2015.

LI, Yunkai et al. Effects of lateral flushing on emitter clogging and biofilm components in drip irrigation systems with reclaimed water. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 33, n. 3, p.235-245, 19 fev. 2015.

MARCUZZO, Francisco F. N.; WENDLAND, Edson. Distribuição de pressão em rede de irrigação localizada otimizada por algoritmos genéticos. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 31, n. 3, p.497-505, jun. 2011.

MONTGOMERY C. D. Introdução ao controle estatístico de qualidade. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 549p.

NAKAYAMA, F. S. Water treatment. In: Nakayama, F. S.; Bucks, D. A. Trickle irrigation for crop production. Amsterdam: Elsevier, 1986. Cap.3.2, p.164-187.

NAKAYAMA, F. S.; BOMAN, B. J.; PITTS, D. Maintenance. In: Lamm, F. R.; Ayars, J. E. and Nakayama, F. S. In: Lamm F. R.; Ayars J. E.; Nakayama, F. S. Microirrigation for crop production: Design, operation, and management. Amsterdam: Elsevier, 2007. Cap.11, p.389-430.

NIU, Wenquan; LIU, Lu; CHEN, Xue. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 31, n. 4, p.545-555, 14 mar. 2012

SILVA, Patricia Ferreira da Silva et al. Statistical process control in self compensating emitters using water at different saline concentrations. **African Journal Of Agricultural Research**, [s.l.], v. 11, n. 30, p.2736-2743, 28 jul. 2016.

## **CAPÍTULO 4: CONTROLE DE QUALIDADE MULTIVARIADO APLICADO NO DESEMPENHO HIDRÁULICO DE LINHAS LATERAIS GOTEJADORAS**

**Resumo:** O grande volume de dados obtidos pelos sistemas automatizados de monitoramento na agricultura irrigada precisa de formas mais sofisticadas para análises e interpretação. Esta pesquisa tem como objetivo o monitoramento multivariado por meio da estatística de controle de qualidade, em linhas laterais gotejadoras posicionadas em aclive (2%), nível (0%) e declive (2%), submetidas a irrigação com efluente de fecularia, efluente de abatedouro de aves, água com fertilizantes nitrogenados e água limpa de abastecimento. Para cada tratamento foi calculado o coeficiente de uniformidade de distribuição e a variação da taxa de descarga em 25 avaliações. Com estes dados foi calculada a estatística de controle de qualidade multivariado  $T^2$  Hotelling. Para as observações com valores fora do limite foi realizado a decomposição pelo teste F. Todas as águas obtiveram observações fora do limite controle, indicando a capacidade da estatística  $T^2$  Hotelling em identificar pequenas oscilações no processo de irrigação por gotejamento. A estatística  $T^2$  Hotelling identifica a capacidade do sistema modificar a vazão média dos gotejadores uniformemente, sem alterar diminuir a uniformidade de aplicação. A utilização de água de abatedouro em aclive (2%) obteve o maior número de pontos fora do limite de controle de qualidade. A declividade da linha gotejadora interfere na qualidade do processo independente da qualidade da água utilizada.

Palavras-Chave:  $T^2$  Hotelling, uniformidade de aplicação, efluente de fecularia, efluente de abatedouro, fertirrigação

## INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada está em pleno desenvolvimento tecnológico. A ascensão dos sensores, formas de monitoramento automatizadas e a geração de dados volumosos criaram a demanda para interpretar e gerenciar estas informações. Uma das ferramentas de auxílio para este tipo de monitoramento de processos é a estatística de controle de qualidade (Montgomery, 2016).

Na irrigação por gotejamento essa estatística permite um monitoramento do desempenho hidráulico de forma mais ampla, ao longo de um período de irrigação, ou seja, de forma temporal. Hermes et al. (2013) indicaram que a metodologia de controle de qualidade é adequada para avaliar a qualidade da irrigação.

A irrigação possui inúmeras variáveis interferindo no processo de distribuição de água, como a temperatura, pressão de funcionamento, qualidade da água utilizada, formas e tipos de gotejadores, topografia da área e configuração do sistema. Nestes casos com muitas variáveis, segundo Henning et al. (2012) a aplicação dos gráficos de controle multivariados melhora ainda mais o processo, por se tratar de um monitoramento que controla simultaneamente várias características.

Para o monitoramento das características de distribuição de água usualmente são utilizados coeficientes de uniformidade como o de distribuição (CUD) (Merriam & Keller, 1978) e a variação da taxa de descarga (Dra) utilizado por Zhou et al. (2013). Estes indicadores podem ser usados para a estatística de controle multivariado, por se tratar de variáveis de do processo.

Um dos gráficos usados pelo controle multivariado é o  $T^2$  de Hotelling, ele é capaz de identificar quando o processo está fora de controle ou mostra uma tendência de saída dos limites, porém há a necessidade do uso adequado da metodologia (Zamarrón et al, 2012). Para isto as variáveis devem ser obtidas simultaneamente e serem correlacionadas.

Tendo em vista as características apresentadas, a pesquisa tem como objetivo identificar a qualidade do processo de irrigação por meio da ferramenta estatística de controle multivariado, monitorando a uniformidade de aplicação e a variação da vazão de gotejadores, submetidos ao uso de diferentes águas. As águas utilizadas foram o efluente de fecularia, efluente de abatedouro de aves, água com fertilizantes nitrogenados e água limpa de abastecimento, em três declividades da linha lateral, aclave (2%), declive (2%) e em nível (0%).

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Desenvolvimento de Protótipos da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, coordenadas geográficas 24° 56' 26" S e 53° 33' 32" O, no período de 01/07/2017 a 01/09/2017. O clima para a região é subtropical Cfa segundo a classificação de Köppen; altitude de 781 m; precipitação pluviométrica média de 1822 mm.

Para os experimentos foi construída uma bancada de testes de irrigação por gotejamento de 5 m de comprimento; por meio de um dispositivo de roldanas poderia realizar a volta da linha lateral obtendo laterais com 10 m; largura de 1,55 m para alocar quatro linhas laterais; calhas para retorno da água; reservatório de 100 L; motobomba de 0,5 CV, 1,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> em 100 kPa (ANEXO 1 catálogo do fabricante); constituída por perfis de aço com dispositivo de roldanas e cabos de sustentação para alteração da declividade da linha lateral. A Figura 1 mostra o desenho da bancada em perspectiva cônica.

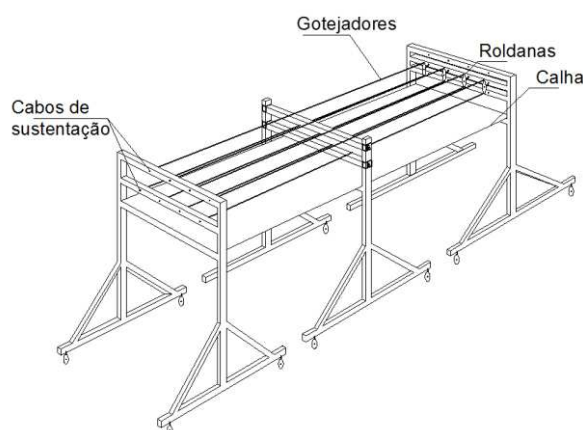


Figura 1. Desenho ilustrativo da bancada de testes utilizada

Os gotejadores testados foram da marca IRRITEC®, modelo P1, utilizados em irrigações superficial e subsuperficial, consistindo em emissores do tipo labirinto de fluxo turbulento, espaçados a cada 0,50 m e acoplados à parede do tubo mediante mecanismo contra aspiração de detrito (ANEXO catálogo do fabricante).

O tubo com gotejadores possuía diâmetro nominal de 16,00 mm, pressão máxima de trabalho de 80 kPa, coeficiente de proporcionalidade da equação do emissor (K) 1,26 e expoente de descarga (x) 0,48.

O cabeçal para controle de fluxo das linhas laterais possuía: filtro de disco de 120 mesh como recomendado pelo fabricante dos gotejadores, da marca IRRITEC® modelo FLD; controlador de pressão da marca BERMAD® modelo 0075 PRVy; hidrômetro ultrassônico do modelo Hydros da marca DIEHL METERING®; manômetro digital da marca

INSTRUTEMP®, Modelo 8215 (100 mca) calibrado pelo laboratório de metrologia do SENAI-PR (Serviço de aprendizagem industrial).

O experimento foi instalado em blocos casualizados com parcelas subdivididas em dois fatores, sendo o fator principal o tipo de água, representando as parcelas: água limpa (de abastecimento público), água com fertilizantes nitrogenados a uma concentração de 300 mg L<sup>-1</sup> de N, efluente de fecularia, efluente de abatedouro de aves. A declividade da linha lateral como fator secundário, constituindo as subparcelas: em declive (2% de declividade); em nível (0%); e em aclive (2% de declividade). Foram realizadas 25 repetições a fim de abranger a estatística de controle de qualidade.

A água limpa era de abastecimento público do laboratório. Para a água com fertilizantes foi usada uréia (44% de N), que foi pesada e realizada a mistura no reservatório com água limpa correspondente a 300 mg L<sup>-1</sup> de N, valor entre 200 e 400 mg L<sup>-1</sup> indicados como limites para sistemas de gotejamento (Borges & Coelho, 2009).

O efluente de abatedouro de aves utilizado recebeu os seguintes tratamentos: tratamento de peneiras rotativas, tanque equalizador e flotor físico-químico, passando por duas lagoas anaeróbias, reator aerado e decantadores secundários; por último, ficando armazenado em lagoas facultativas onde foi realizada a coleta para o experimento.

O efluente de fecularia foi gerado pela extração do amido e lavagem das raízes da mandioca. Teve tratamento por um biodigestor anaeróbio do tipo lagoa coberta, e posteriormente era destinado a lagoas facultativas onde foi realizada a coleta.

Todas as águas foram submetidas à análise físico-química no dia do experimento seguindo a metodologia APHA (2012).

Para cada declividade e tipo de água foi realizado amostragens das vazões em pontos escolhidos no sistema segundo a metodologia de Keller & Karmelli (1975), indicando 16 gotejadores para a avaliação. As vazões foram obtidas por meio da coleta do volume de água em cada ponto selecionado por 3 min. Foram realizadas 25 repetições com a pressão de serviço dos gotejadores nominal de 80 kPa.

Com os valores de vazão do sistema foi calculado o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) Eq. 1 (Merriam & Keller, 1978) e a variação da taxa de descarga (Dra) utilizado por Zhou et al. (2013) Eq. 2.

$$CUD = \frac{q_{25\%}}{q} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

CUD – Coeficiente de uniformidade de distribuição, %;

$q_{25\%}$  - Vazão média dos 25% menores valores, Lh<sup>-1</sup>; e,

$\bar{q}$  - Vazão média dos gotejadores, Lh<sup>-1</sup>.

$$Dra = 100 \left( \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{nq_{\text{novo}}} \right) \quad (2)$$

Em que:

Dra - Variação da taxa de descarga, %;

$q_i$  - Vazão do emissor testado, L h<sup>-1</sup>;

$q_{\text{novo}}$  - Vazão dos emissor novo, L h<sup>-1</sup>; e,

n - número de emissores testados.

O gráfico usado para a estatística de controle multivariada para observações individuais foi o T<sup>2</sup> de Hotelling, seguindo a metodologia de Montgomery (2016); em que utiliza duas variáveis ou mais simultaneamente para verificar as características de qualidade do processo.

Para o diagnóstico do controle estatístico multivariado é necessário calcular a estatística T<sup>2</sup> Eq. 4 para cada amostragem. O valor T<sup>2</sup> plotado no gráfico representa de um vetor observação em relação ao vetor média do processo.

$$T^2 = (X - \bar{X})' S^{-1} (X - \bar{X}) \quad (4)$$

Em que:

$\bar{X}$  - Vetor das médias do processo.

S<sup>-1</sup> - Matriz inversa da covariância do processo; e.

X - Valor obtido por observação

O limite superior de qualidade para esta estatística pode ser calculado por meio da Eq. 5.

O limite inferior de controle é considerado zero.

$$LSC = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{\alpha, p, mn-m-p+1} \quad (5)$$

Em que:

LSC - Limite superior de controle.

P - Número de variáveis.

m - Número de observações.

n - Tamanho da amostra; e.

$F_{\alpha, p, mn-m-p+1}$  - Percentil da distribuição F com p e mn-m-p+1 graus de liberdade.

Em pontos fora do controle estatístico de qualidade multivariado é necessário realizar decomposição da estatística  $T^2$  Hotelling, a fim de descobrir a variável que colabora para o processo não estar em controle de qualidade. Para isto foi utilizado o teste F para verificar a significância das observações.

Os dados foram tabulados em planilha e posteriormente encaminhados ao software Minitab 17 para a análise das variáveis e confecção dos gráficos de controle.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físico-químicas das águas utilizadas (Tabela 1) mostra alta restrição ao uso pelos sistemas de irrigação por gotejamento para o pH, ferro total e sólidos em suspensão.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos analisados para a água limpa, água com fertilizantes, efluente de fecularia e efluente de abatedouro

| Parâmetros   | Resultados |                        |                       |                        |
|--|------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
|  | Água Limpa | Água com Fertilizantes | Efluente de Fecularia | Efluente de Abatedouro |
| Condutividade Elétrica (dS m <sup>-1</sup> )       | 0,19       | 0,18                   | 0,63                  | 0,87                   |
| pH   | 8,57*      | 8,50*                  | 8,70*                 | 7,60                   |
| Alcalinidade de Carbonatos (mg L <sup>-1</sup> )   | 0,10       | 0,00                   | 0,10                  | 0,10                   |
| Alcalinidade de Bicarbonatos (mg L <sup>-1</sup> ) | 41,90      | 67,50                  | 364,40                | 257,40                 |
| Cloretos (mg L <sup>-1</sup> )                     | 14,20      | 12,40                  | 14,20                 | 10,60                  |
| Ferro Total (mg L <sup>-1</sup> )                  | 0,26       | 0,31                   | 2,81*                 | 1,48                   |
| Manganês (mg L <sup>-1</sup> )                     | 0,03       | 0,02                   | 0,19                  | 0,08                   |
| Sólidos Totais Dissolvidos (mg L <sup>-1</sup> )   | 60,00      | 80,00                  | 380,00                | 520,00                 |
| Sólidos em Suspensão (mg L <sup>-1</sup> )         | 20,00      | 40,00                  | 140,00*               | 200,00*                |
| Cálcio (mg L <sup>-1</sup> )                       | 8,01       | 15,20                  | 17,60                 | 12,40                  |
| Magnésio (mg L <sup>-1</sup> )                     | 6,31       | 7,29                   | 18,40                 | 9,47                   |
| Dureza Total (mg L <sup>-1</sup> )                 | 46,00      | 68,00                  | 120,00                | 70,00                  |
| Potássio (mg L <sup>-1</sup> )                     | 2,00       | 2,00                   | 88,00                 | 20,00                  |
| Sódio (mg L <sup>-1</sup> )                        | 13,00      | 23,00                  | 29,00                 | 123,00                 |

\* Valores com alta restrição ao uso em sistemas de irrigação localizada, Nakayama (1986)

Os valores de pH com alta restrição ao uso indicam alto potencial de precipitação de alguns elementos como cálcio e o magnésio, além de reações com o ferro e o manganês (Nakawama et al., 2007). O ferro afeta a distribuição dos gotejadores em longo prazo, no decorrer do tempo de funcionamento (Carvalho et al., 2015).

Os sólidos em suspensão podem causar entupimento físico nos gotejadores, além de favorecer o crescimento microbiano e formação de biofilme, quando utilizado águas de reaproveitamento (Oliver et al., 2014).

O efluente de fecularia obteve o maior número de parâmetros de qualidade de água com valores em alto risco de obstrução. Em comparação com os valores obtidos por Hermes et al. (2013), o efluente testado nesta pesquisa possuiu valores mais elevados.

A Tabela 2 mostra a estatística descritiva dos valores médios, máximo e mínimos obtidos de vazão, e o desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de uniformidade de distribuição, variação da taxa de descarga.

Tabela 2. Estatística descritiva para os valores de vazão, coeficiente de variação (CV), coeficiente de distribuição (CUD) e variação da taxa de descarga (Dra)

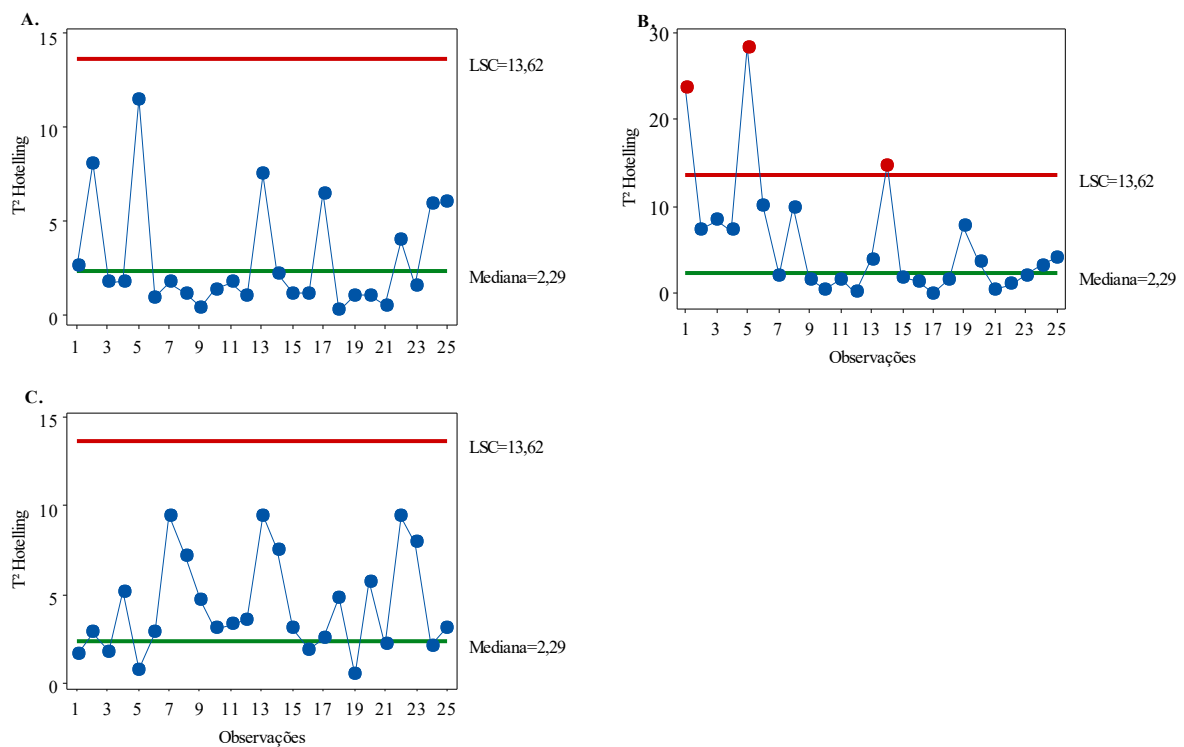
| Declividade | Tipo de Água           | Vazões (L h <sup>-1</sup> ) |      |      |         |       | Desvio Padrão | CV (%) | CUD (%) | Dra (%) |
|-------------|------------------------|-----------------------------|------|------|---------|-------|---------------|--------|---------|---------|
|             |                        | Média                       | Mín  | Máx  | Mediana |       |               |        |         |         |
| Active      | Água limpa             | 3,45                        | 3,40 | 3,50 | 3,45    | 0,022 | 0,64          | 98,80  | 101,51  |         |
|             | Água com fertilizantes | 3,44                        | 3,41 | 3,45 | 3,44    | 0,009 | 0,25          | 98,64  | 100,76  |         |
|             | Efluente de fecularia  | 3,38                        | 3,32 | 3,40 | 3,38    | 0,015 | 0,45          | 98,57  | 101,79  |         |
|             | Efluente de Abatedouro | 3,46                        | 3,41 | 3,53 | 3,45    | 0,039 | 1,13          | 98,79  | 101,68  |         |
| Nível       | Água limpa             | 3,45                        | 3,42 | 3,47 | 3,45    | 0,015 | 0,44          | 99,07  | 100,75  |         |
|             | Água com fertilizantes | 3,45                        | 3,42 | 3,48 | 3,45    | 0,011 | 0,32          | 99,03  | 100,91  |         |
|             | Efluente de fecularia  | 3,38                        | 3,34 | 3,40 | 3,38    | 0,015 | 0,43          | 98,55  | 101,79  |         |
|             | Efluente de Abatedouro | 3,46                        | 3,39 | 3,51 | 3,45    | 0,038 | 1,09          | 98,93  | 99,34   |         |
| Declive     | Água limpa             | 3,48                        | 3,45 | 3,50 | 3,48    | 0,014 | 0,39          | 99,05  | 100,96  |         |
|             | Água com fertilizantes | 3,44                        | 3,40 | 3,45 | 3,44    | 0,011 | 0,33          | 98,88  | 101,06  |         |
|             | Efluente de fecularia  | 3,42                        | 3,41 | 3,44 | 3,42    | 0,009 | 0,28          | 98,48  | 100,07  |         |
|             | Efluente de Abatedouro | 3,46                        | 3,39 | 3,51 | 3,45    | 0,038 | 1,09          | 99,03  | 100,32  |         |

Os valores da taxa de descarga passaram o valor de 100, indicando que as vazões foram maiores que a primeira avaliação do sistema novo. Este fato pode ser explicado pela mudança no regime de fluxo de água no gotejador alterando o seu funcionamento. Ocasionalmente pela qualidade da água, como Resende et al. (2000) obtiveram aumento na vazão de gotejadores no tempo de funcionamento testando entupimento de ordem biológica; ou pela própria trabalhabilidade do gotejador, pelo seu mecanismo autolimpante contra aspiração de detrito.

A variação da taxa de descarga e o coeficiente de uniformidade se ajustam de forma linear quando utilizado água de reaproveitamento (Pei et al., 2014), indicando a correlação entre as duas variáveis. Portanto, é possível a utilização do controle multivariado.

A Figura 2 mostra o gráfico de controle de qualidade multivariado, com a estatística de T<sup>2</sup> - Hotelling calculado a partir dos valores de coeficiente de uniformidade de distribuição e a variação da taxa de descarga para o efluente de fecularia nas três declividades.





LSC – limite superior de controle, marcadores azuis observações com Dra e CUD em controle de qualidade multivariado, marcadores vermelhos observações com pelo menos uma variável fora de controle estatístico

Figura 2. Gráficos de controle de qualidade multivariado com efluente de fecularia para Active (A), Nível (B) e Declive (C)

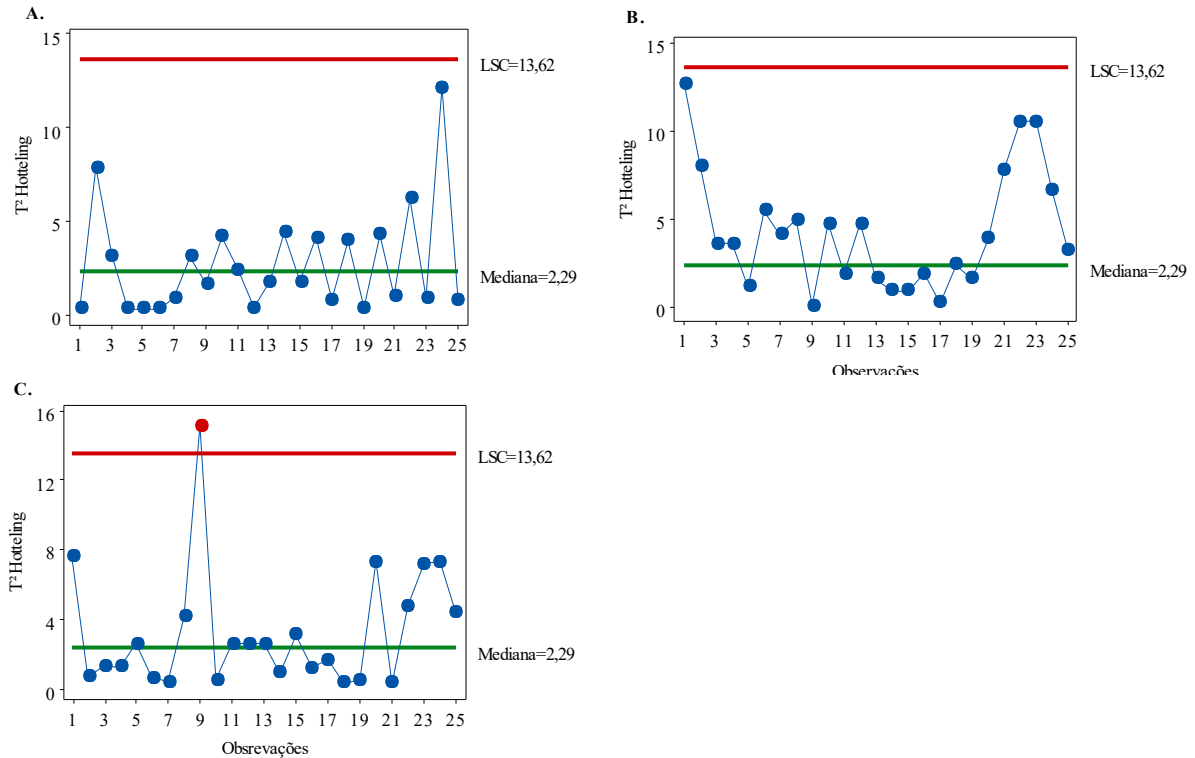
Para os valores de CUD e Dra foi observado a falta de controle estatístico de qualidade para as linhas laterais gotejadoras em nível (Figura 2 B). Os três pontos fora do limite superior de controle indicam que o CUD ou Dra não seguem uma aleatoriedade nos dados, indicando a incidência de fontes de variabilidade no processo de irrigação.

A decomposição por meio da distribuição F (APÊNDICE A) indicou que a observação 1 e 5 (Figura 2B) tanto o CUD (98,88 e 98,17%) como o Dra (101,13 e 100,94%) influenciaram para a perda de qualidade. Desta forma, pode-se verificar que variabilidade das vazões identificada pelo CUD foi ocasionada pelo aumento ou redução do Dra, impulsionando os pontos para fora de um controle de qualidade.

A observação 14 (Figura 2B) foi influenciada pela Dra (102,41%), identificando a ocorrência de uma mudança uniforme nas vazões dos gotejadores não identificados pelo CUD, ou seja, neste ponto ocorreu uma variação na vazão média em todos os gotejadores uniformemente. De acordo com Dantas et al. (2014) ocorre a redução das vazões dos gotejadores ao longo do tempo uniforme, em todos os tratamentos testados, portanto, manteve os coeficientes de uniformidade altos. Neste caso teve o aumento da vazão dos gotejadores.

As primeiras horas de funcionamento de um sistema com águas de reutilização tem uma pequena variação na linearidade da Dra com coeficientes de uniformidade em 5% (Pei et al., 2014). Portanto, a falta de controle pode ser atribuído a uma causa de variação, como o Dra.

A Figura 3 mostra os gráficos de controle multivariado para a água limpa. A utilização de água de boa qualidade permite verificar o funcionamento do sistema em relação às características de fabricação dos emissores.



LSC – limite superior de controle, marcadores azuis observações com Dra e CUD em controle de qualidade multivariado, marcadores vermelhos observações com pelo menos uma variável fora de controle estatístico

Figura 3. Gráficos de controle de qualidade multivariado para água limpa em gotejadores em Active (A), Nível (B) e Declive (C)

A estatística  $T^2$  Hotelling identificou o não controle de qualidade para a água limpa em declive. A falta de controle foi influenciada pelo aumento da pressão interna pela declividade da linha lateral.

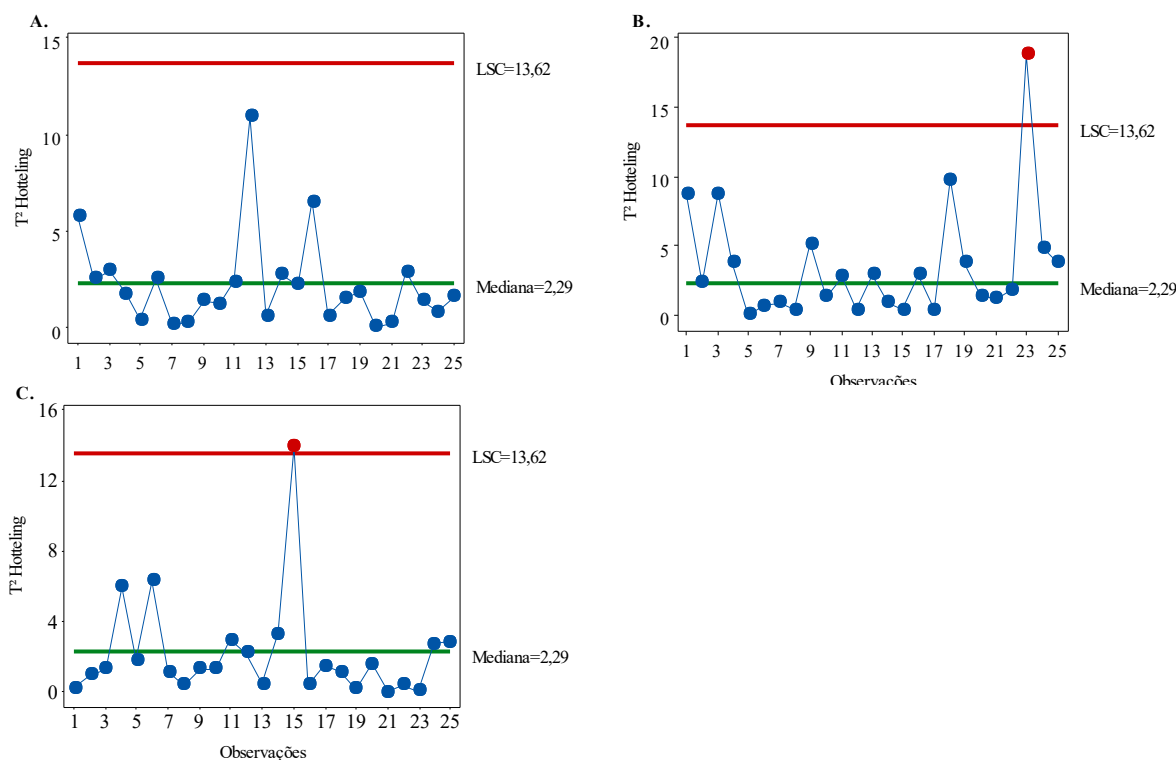
A decomposição dos valores obtidos na observação 9 (Figura 3C) identificou que o CUD (98,63%) teve efeito significativo na qualidade do processo. Logo, a uniformidade do sistema alterou a qualidade sem modificar a vazão média observada pela Dra.

A redução do coeficiente de uniformidade ocorre em água limpa e é dependente do tipo de gotejador; um dos fatores é a alcalinidade elevada, propiciando a precipitação de elementos químicos (Liu & Huang, 2009), porém isto é evidente com maiores tempos de funcionamento.

A classificação do sistema segundo a ASABE (2008) para uniformidade de distribuição, classifica o sistema como excelente para todas as avaliações em todas as declividades (Tabela 2). Porém pode ser observado que desde as primeiras horas de funcionamento, durante os ensaios, há falhas de qualidade no processo de irrigação. Portanto, esta estatística configura como uma forma ampla e eficaz de monitoramento de qualidade (Montgomery, 2016) temporal e não apenas espacial.

A falta de um controle de qualidade para a utilização de água limpa em declive (Figura 3C) mostra a influencia do posicionamento da linha lateral em relação à qualidade do processo. Sendo que para as linhas laterais em aclave (Figura 3A) e em nível (Figura 3B) não foi detectado falta de controle estatístico. Segundo Ella, Reyes e Yoder, (2009) a declividade interfere a uniformidade de distribuição de forma linear.

A Figura 4 mostra os gráficos de controle multivariado para a água com fertilizantes para as três declividades testadas. A utilização de fertilizantes na água de irrigação pode favorecer o entupimento dos gotejadores quando colocados em concentrações elevadas ou aplicados de forma incorreta (Borges & Coelho, 2009).



LSC – limite superior de controle, marcadores azuis observações com Dra e CUD em controle de qualidade multivariado, marcadores vermelhos observações com pelo menos uma variável fora de controle estatístico

Figura 4. Gráficos de controle de qualidade multivariado para água com fertilizantes em gotejadores em Aclave (A), Nível (B) e Declive (C)

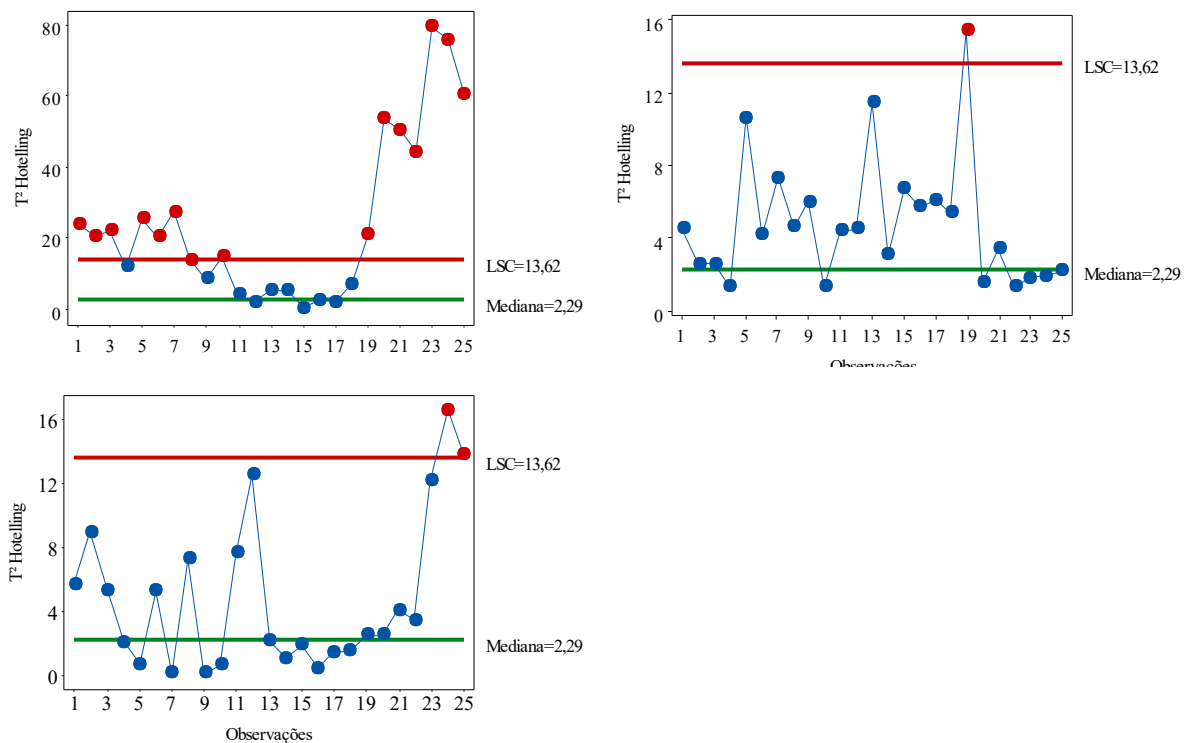
Para a aplicação de fertilizantes em linhas gotejadoras niveladas a observação 23 (Figura 4B) e em declive na observação 15, foi identificado o não controle estatístico. Decompondo os valores destes dois pontos verificou-se efeito significativo para o CUD (98,50%) e a Dra (100,74%) na perda de qualidade. Isto sugere que a variabilidade das vazões médias interferiu no processo.

Utilizando a fertirrigação Cunha et al. (2014) verificaram que os fertilizantes proporcionaram um aumento na amplitude dos valores de vazão e que originou a perda de uniformidade de aplicação. Além disto, houve um decréscimo na vazão dos gotejadores.

A uniformidade de aplicação utilizando fertilizantes é alterada devido principalmente a pressão de funcionamento do sistema (Klein et al. 2015), ao tipo de fertilizante utilizado (Borssoi et al. 2012) e até mesmo ao manejo sucessivo aplicado (Almeida et al. 2013).

Em aclave (Figura 4A) o layout do sistema proporcionou, para a mesma água, um controle de qualidade. Segundo Tang et al. (2018) há interação significativa entre o layout do sistema e a concentração de fertilizantes para o efeito no CUD.

A Figura 5 mostra os gráficos de controle de qualidade multivariado para a aplicação de efluente de abatedouro de aves.



LSC – limite superior de controle, marcadores azuis observações com Dra e CUD em controle de qualidade multivariado, marcadores vermelhos observações com pelo menos uma variável fora de controle estatístico

Figura 5. Gráficos de controle de qualidade multivariado efluente de abatedouro de aves em gotejadores em Aclave (A), Nível (B) e Declive (C)

A utilização de efluente de abatedouro de aves em aclive indica que fontes de variabilidade incidindo sobre a irrigação. Neste caso, sugere a não utilização desta água em aclive.

A falta de controle de qualidade em todas as declividades evidencia a atuação da qualidade da água utilizada sob o desempenho hidráulico dos gotejadores.

O efluente de abatedouro de aves foi o que proporcionou o maior número de observações fora do controle estatístico multivariado. Para as linhas gotejadoras em aclive (Figura 5A) as observações 1, 2, 3, 6, 10, 19, 20, 21 e 22 foram influenciadas pela Dra, indicando a alteração uniforme da vazão média. Para as observações 5, 7, 13, 24 e 25 o CUD e Dra interferiram na qualidade do processo.

A alteração da Dra foi ocasionada pelo aumento da vazão dos gotejadores. Este aumento também foi percebido por Busato & Soares (2010) com águas de qualidade inferior. Resende et al. (2000) observaram nas primeiras horas um aumento da vazão de gotejadores, posteriormente a 480 h de funcionamento, a vazão reduziu.

Para a aplicação em nível a observação 19 obteve influência do CUD (99,34%) para a perda de controle estatístico. Em declive a observação 24 teve influencia da Dra (101,9%) e para 25 ambas variáveis interferiram para a falta de controle (CUD de 98,74% e Dra de 100,69%).

A estatística  $T^2$  Hotelling é eficaz e detecta pequenas variações que deixam o processo fora de controle estatístico, porém a sua interpretação é complexa e exige tempo para implementação em determinados processos (Henning et al. 2014).

Apesar das uniformidades altas e o aumento das vazões médias pode ser observado que em determinadas águas e declividade da linha lateral, obteve pontos fora do controle estatístico de qualidade. Indicando a atuação de fontes de variabilidade que podem mais atuantes no futuro.

Para a irrigação este trabalho é pioneiro na utilização desta ferramenta. É necessário mais pesquisas a fim de aprimorar e adaptar a ferramenta a sistemas por gotejamento e suas novas tecnologias.

## CONCLUSÃO

1. Todas as águas obtiveram observações fora do limite controle, indicando a capacidade da estatística  $T^2$  Hotelling em identificar pequenas variações no processo de irrigação por gotejamento.

2. A estatística  $T^2$  Hotteling aplicado no desempenho hidráulico da irrigação por gotejamento identifica a capacidade do sistema modificar a vazão médias dos gotejadores uniformemente.

3. A utilização de água de abatedouro em aclave (2%) obteve o maior número pontos fora do limite de controle de qualidade.

4. A declividade da linha gotejadora interfere na qualidade do processo independente da qualidade da água utilizada.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Ceres Duarte Guedes Cabral de et al. Susceptibilidade ao entupimento de microtubos gotejadores sob fertirrigação. **Irriga**, [s.l.], v. 18, n. 3, p.454-470, 8 out. 2013.

APHA - American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22.ed. Washington DC: APHA, 2012. 1496p.

ASABE STANDARDS. Evaluation of irrigation furrows, ASAE EP 419.1 FEB 1993 (R2008).

BORGES, A. L.; COELHO, E. F. Fertirrigação em fruteiras tropicais. 2.ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009. 179p.

BORSSOI, Adilson L. et al. Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 32, n. 4, p.718-726, ago. 2012.

BUSATO, C. C. M.; SOARES, A. A. Desempenho de gotejadores, utilizando água de baixa qualidade química e biológica. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 26, n. 5, set/out, 2010.

CARVALHO, Lilian Cristina Castro de et al. Desempenho de gotejadores autocompensantes submetidos a soluções concentradas de ferro e carga orgânica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], v. 9, n. 6, p.366-375, 22 dez. 2015.

CUNHA, Fernando Nobre et al. Coeficientes de uniformidade em sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], v. 8, n. 6, p.444-454, 7 nov. 2014.

DANTAS, Daniel da Costa et al. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando efluente doméstico. **Irriga**, Botucatu, Edição especial, p.179-189, 2014.

ELLA, V. B.; REYES, M. R.; YODER, R.. Effect of Hydraulic Head and Slope on Water Distribution Uniformity of a Low-Cost Drip Irrigation System. **Applied Engineering In Agriculture**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.349-356, 2009.

HENNING, Elisa et al. Application of hotelling's T<sup>2</sup> control chart for a machining process of the inside diameter of a steel cylinder. **Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, [s.l.], v. 9, n. 2, p.155-168, 5 jul. 2014.

HENNING, Elisa et al. Gráficos de controle multivariados: um estudo de caso no setor metalomecânico. **P&d em Engenharia de Produção**, Itajubá, v. 10, n. 2, p.143-156, 2012.

HERMES, Eliane et al. Quality control in irrigation and fertigation with cassava processing wastewater into drip system. **Journal Of Food Agriculture And Environment**, v. 11, n. 2, p.841-845, 2013.

JOHN L. MERRIAM, JACK KELLER, Utah State University. Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University, 1978, 271p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design. Glendora, California: Rain bird sprinkler manufacturing corp, 1975. 133p.

KLEIN, Márcio Roberto et al. Fertigation quality with drip irrigation system in grape orchard by using the process capability index. **Journal Of Food, Agriculture & Environment**, Helsinki, Finland, v. 13, n. 2, p.179-183, abr, 2015.

LIU, Haijun; HUANG, Guanhua. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 5, p.745-756, maio 2009.

MONTGOMERY C. D. Introdução ao controle estatístico de qualidade. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 549p.

NAKAYAMA, F. S. Water treatment. In: Nakayama, F. S.; Bucks, D. A. Trickle irrigation for crop production. Amsterdam: Elsevier, 1986. Cap.3.2, p.164-187.

NAKAYAMA, F. S.; BOMAN, B. J.; PITTS, D. Maintenance. In: Lamm, F. R.; Ayars, J. E. and Nakayama, F. S. In: Lamm F. R.; Ayars J. E.; Nakayama, F. S. Microirrigation for crop production: Design, operation, and management. Amsterdam: Elsevier, 2007. Cap.11, p.389-430.

OLIVER, M.m.h.; HEWA, G.a.; PEZZANITI, D.. Bio-fouling of subsurface type drip emitters applying reclaimed water under medium soil thermal variation. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 133, p.12-23, fev. 2014.

PEI, Yiting et al. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 32, n. 2, p.141-157, 12 nov. 2013.

RESENDE, Ronaldo Souza; COELHO, Rubens Duarte; PIEDADE, Sônia Maria de Stéfano. Suscetibilidade de gotejadores ao entupimento de causa biológica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 4, n. 3, p.368-375, dez. 2000.

TANG, Pan et al. Effect of manifold layout and fertilizer solution concentration on fertilization and flushing times and uniformity of drip irrigation systems. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 200, p.71-79, mar. 2018.

ZAMARRÓN, Aida Magdalena Contreras; PRADO, Eduardo Marroquín; LUIS, Federico Zertuche. Monitoreo y Control de un Proceso Normal Multivariado. **Consciência Tecnológica**, México, v. 43, p.29-35, jan. 2012.

ZHOU, Bo et al. Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 31, n. 6, p.1251-1263, 19 fev. 2013.



## APÊNDICE A – DECOMPOSIÇÃO PELA DISTRIBUIÇÃO F

Decomposição das observações para o efluente de fecularia em nível

| Observação | Variável | P      |
|------------|----------|--------|
| 1          | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | 0,0003 |
| 5          | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | 0,0076 |
| 14         | Dra      | 0,0004 |
|            | CUD      | ns     |

Decomposição das observações para água em declive

| Observação | Variável | P      |
|------------|----------|--------|
| 9          | Dra      | ns     |
|            | CUD      | 0,0000 |

Decomposição das observações para o fertilizante em nível

| Observação | Variável | P      |
|------------|----------|--------|
| 23         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | 0,0019 |

Decomposição das observações para o fertilizante em declive

| Observação | Variável | P      |
|------------|----------|--------|
| 15         | Dra      | 0,0213 |
|            | CUD      | 0,0000 |

Decomposição das observações para o efluente de abatedouro em nível

| Observação | Variável | P      |
|------------|----------|--------|
| 19         | Dra      | ns     |
|            | CUD      | 0,0000 |

Decomposição das observações para o efluente de abatedouro em declive

| Observação | Variável | P      |
|------------|----------|--------|
| 24         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 25         | Dra      | 0,0006 |
|            | CUD      | 0,0002 |

Decomposição das observações para o efluente de abatedouro em aclave

| Observação | Variável | P      |
|------------|----------|--------|
| 1          | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 2          | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 3          | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 5          | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | 0,0018 |
| 6          | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 7          | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | 0,0287 |
| 8          | Dra      | 0,0001 |
|            | CUD      | ns     |
| 10         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 19         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 20         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 21         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 22         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | ns     |
| 23         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | 0,0139 |
| 24         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | 0,0036 |
| 25         | Dra      | 0,0000 |
|            | CUD      | 0,0000 |

# ANEXO I

## Catálogo da motobomba



MOTOBOMBA PERIFÉRICA
APm

**APLICAÇÕES GERAIS**  
Abastecimento doméstico e pequenos prédios. Sistema de pressurização e irrigação. Ideal para aplicações em que é necessário bombear fluido em grandes alturas.

• **Vantagens:**  
Bomba de baixo custo e de amplas aplicações.





**Motobomba**

- Conexão 1" BSP (sucção e recalque)
- Corpo em ferro fundido
- Tratamento antiferrugem
- Rotor periférico em bronze
- Ponta do eixo em inox AISI 304
- Temperatura do líquido: máx. +60°C
- Sucção máxima: 8 metros
- Selo mecânico em grafite cerâmica buna

**Motor**

- Rolamento especial
- Protetor térmico
- Classe de isolamento: F
- Classe de proteção: IPX4
- Temperatura ambiente: máx. +40°C

**Voltagem:** Bivolt e Monovolt









Antitrapamento e rotor em bronze Bivolt com seletor de voltagem

**Informações técnicas**

| Modelo | Potência |     | H (m.c.a)                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | P. máx       | Diâmetro do selo |
|--------|----------|-----|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|------------------|
|        | Kw       | HP  |                           | 5   | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  | 45  | 50  | 55  | 60  | 65  | 70  |              |                  |
| APm37  | 0,37     | 0,5 | Vazão (m <sup>3</sup> /h) | 2,1 | 1,8 | 1,5 | 1,2 | 0,9 | 0,6 | 0,3 |     |     |     |     |     |     | 40  | APm37 - 12mm |                  |
| APm75  | 0,75     | 1,0 |                           | 3,0 | 2,7 | 2,4 | 2,1 | 1,9 | 1,7 | 1,5 | 1,3 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 75           | APm75 - 12mm     |

Obs.: Necessário a instalação da válvula de retenção para o funcionamento da motobomba no caso da mesma não trabalhar afogada<sup>1</sup>.

## ANEXO II

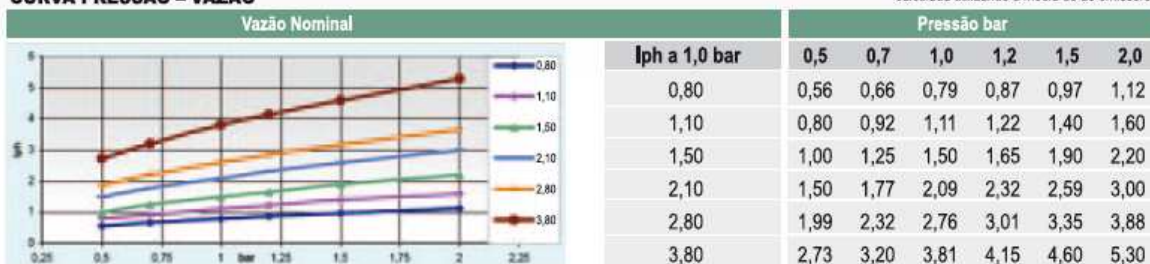
### Catálogo do gotejador

#### CARACTERÍSTICA DO GOTEJADOR

| Vazão Nominal<br>lph a 1,0 bar<br>(14,5 psi) | Filtro de entrada |    | Filtro<br>Recomendado | Equação de fluxo |      | Cor do<br>Gotejador |
|--|-------------------|----|-----------------------|------------------|------|---------------------|
|  | área              | Nº |                       | K                | X    |                     |
| 0,80   | 6,4               | 20 | 155 mesh              | 0,25             | 0,50 |                     |
| 1,10   | 5,8               | 8  | 155 mesh              | 0,37             | 0,48 |                     |
| 1,50   | 5,8               | 8  | 155 mesh              | 0,46             | 0,52 |                     |
| 2,10   | 7,5               | 8  | 120 mesh              | 0,68             | 0,52 |                     |
| 2,80   | 7,5               | 8  | 120 mesh              | 0,93             | 0,48 |                     |
| 3,80   | 8,1               | 8  | 120 mesh              | 1,26             | 0,48 |                     |

#### CURVA PRESSÃO – VAZÃO

calculada utilizando a média de 25 emissores



#### PRESSÃO DE TRABALHO: 1 BAR

| Modelo            | S (%) | E.U. (%) | Espaçamento ( cm) |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-------|----------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                   |       |          | 20                | 30  | 40  | 50  | 60  | 75  | 100 |
| 16 mm<br>3,80 lph | 2     | 95       | 27                | 31  | 34  | 37  | 38  | 40  | 42  |
|                   |       | 90       | 57                | 71  | 82  | 91  | 99  | 109 | 122 |
|                   |       | 85       | 72                | 90  | 104 | 116 | 127 | 141 | 159 |
|                   | 0     | 95       | 36                | 46  | 55  | 64  | 72  | 83  | 99  |
|                   |       | 90       | 65                | 85  | 102 | 117 | 131 | 151 | 182 |
|                   |       | 85       | 81                | 104 | 125 | 145 | 162 | 187 | 225 |
|                   | -2    | 95       | 43                | 60  | 72  | 87  | 97  | 66  | 66  |
|                   |       | 90       | 72                | 97  | 117 | 139 | 156 | 182 | 225 |
|                   |       | 85       | 88                | 118 | 143 | 168 | 190 | 221 | 272 |

S= Inclinação

Os valores apresentados nas tabelas são calculadas usando a equação KELLER - KARMELI 1975

$$E.U. = 100 \left( 1 - 1,27 \frac{CV}{\sqrt{n}} \right) \frac{Q_{min}}{Q_{med}}$$

CV = coeficiente de variação tecnológica  
n = número de gotejador por planta  
Q<sub>min</sub> = Vazão mínima  
Q<sub>med</sub> = Vazão média

Para uma melhor uniformidade de vazão por gotejador, se recomenda o uso de valores E.U. maiores ou iguais a 90%

## FOTOS

Bancada de testes



Manômetro Digital



Hidrômetro Ultrassônico



Roldanas de retorno



## Alteração da declividade



## Bombeamento

