

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DESEMPENHO DE GOTEJADORES USANDO EFLUENTE
DE ESGOTO TRATADO PARA IRRIGAÇÃO**

João Alberto Fischer Filho

Engenheiro Agrônomo

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DESEMPENHO DE GOTEJADORES USANDO EFLUENTE
DE ESGOTO TRATADO PARA IRRIGAÇÃO**

João Alberto Fischer Filho
Orientador: Prof. Dr. José Renato Zanini

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP,
como parte das exigências para obtenção
do título de Mestre em Agronomia (Ciência
do Solo)

2015

Fischer Filho, João Alberto
F534d Desempenho de gotejadores usando efluente de esgoto tratado
para irrigação / João Alberto Fischer Filho. -- Jaboticabal, 2015
x, 46 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015
Orientador: José Renato Zanini
Banca examinadora: Luís Fabiano Palaretti, Sérgio Nascimento
Duarte
Bibliografia

1. Água-residuária. 2. Água-economia. 3. Emissores. 4.
Entupimento-grau. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias.

CDU 628.3

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

João Alberto Fischer Filho – Brasileiro nascido em 16 de maio de 1990 na cidade de Araras, SP. Filho de João Alberto Fischer e Márcia Aparecida Cardoso da Cunha Fischer. Ingressou em agosto de 2008 no curso de Agronomia na Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira/SP. Durante o período de graduação desenvolveu trabalhos na área de Economia Rural e posteriormente na área de Hidráulica e Irrigação sob orientação do Prof. Dr. João Luís Zocoler; foi monitor em três disciplinas e desenvolveu projeto de extensão em levantamento de preços de insumos agrícolas. Em agosto de 2013 obteve o título de Engenheiro Agrônomo e em março de 2014 iniciou o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) na Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal/SP, na linha de pesquisa de Engenharia de Água e Solo, sob orientação do Prof. Dr. José Renato Zanini, desenvolvendo pesquisas com utilização de água residuária na agricultura. Em junho de 2015 foi aprovado para cursar Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) na Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal/SP.

“A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu tamanho
original.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me permite a vida, saúde e bom caráter, pela força dada em todos os momentos de necessidade e por cultivar a esperança de dias melhores.

Agradeço a minha mãe Márcia, por nunca desistir de lutar pela vida e por ser a pessoa mais guerreira e incrível que existe, e ao meu pai João, por sempre acreditarem no meu potencial, apoiarem nas minhas decisões e darem tudo o que sempre precisei.

À minha irmã Nathália por estar sempre disposta a ajudar, e minha irmã Nayara por toda amizade, e por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos.

À minha sobrinha Yasmin, obrigado por proporcionar dias felizes em nossas vidas e demonstrar amor incondicional.

À minha namorada Nadia Poloni, por ser fundamental e estar presente em todas minhas conquistas desde o início da graduação, o meu muito obrigado pelo amor, dedicação, carinho, atenção, paciência e por suportar os momentos distantes.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Renato Zanini e meu co-orientador Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri, que dispuseram de tempo precioso e paciência para me auxiliar nesta tarefa, por sua confiança, dedicação, atenção e amizade.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP) e ao funcionário João Trentin pela ajuda no experimento, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Mestrado.

Aos meus amigos de “república”, Luan Odorizzi, por me receber e me acolher no momento em que mais precisei e por ter um coração imenso, e Marcelo Odorizzi pelo apoio e por nunca me deixar desanimar, por serem bons amigos, foram a família que escolhi.

Aos amigos da FCAV/UNESP, Vinícius Oliveira, Miquéias Gomes e Geffson Dantas, pela ajuda primordial neste trabalho e troca de experiências, e pela amizade.

Aos meus fiéis e queridos amigos de Araras, Lucas Pastorello, Flávio Matos, Érick Remédio, Victória Souza, Thiago Silva, Gabriela Mafra, Matheus Marchi, Mariane Corte, Tiago e Daniela Pastorello que me ensinaram que verdadeiras

amizades continuam a crescer mesmo a longas distâncias, muito obrigado por sempre estarem presentes em minha vida.

A todas as empresas que possibilitaram a conclusão deste trabalho, doando material para fazer os experimentos e contribuírem para o desenvolvimento da pesquisa.

E a todos que em algum momento influenciaram minha vida e nunca me negaram ajuda.

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | iv |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 3 |
| 2.1 Equação característica do gotejador e coeficiente de variação de fabricação ... | 3 |
| 2.2 Reuso de água na agricultura | 5 |
| 2.3 Irrigação por gotejamento | 7 |
| 2.4 Entupimento dos gotejadores..... | 9 |
| 2.4.1 Obstruções físicas | 11 |
| 2.4.2 Obstruções químicas | 12 |
| 2.4.3 Obstruções biológicas | 13 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 14 |
| 3.1 Determinação da equação característica vazão x pressão e do coeficiente de variação de fabricação dos gotejadores em laboratório | 14 |
| 3.2 Área e instalação do experimento em campo | 16 |
| 3.3 Modelos de gotejadores | 18 |
| 3.4 Água residuária utilizada | 18 |
| 3.5 Avaliação dos gotejadores | 19 |
| 3.6 Análise estatística | 22 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 23 |
| 4.1 Equação característica vazão x pressão e coeficiente de variação de fabricação (CVf)..... | 23 |
| 4.2 Vazão relativa (Qr) | 27 |
| 4.2.1 Vazão relativa para gotejadores autocompensantes | 27 |
| 4.2.2 Vazão relativa para gotejadores não autocompensantes | 30 |
| 4.3 Coeficiente de variação de vazão (CVQ) | 32 |
| 4.3.1 Coeficiente de variação de vazão para gotejadores autocompensantes ... | 32 |
| 4.3.2 Coeficiente de variação de vazão para gotejadores não autocompensantes | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4 Grau de entupimento (GE)..... | 35 |
| 4.4.1 Grau de entupimento para gotejadores autocompensantes | 35 |
| 4.4.2 Grau de entupimento para gotejadores não autocompensantes | 37 |
| 5. CONCLUSÃO | 39 |
| 6. REFERÊNCIAS..... | 40 |

DESEMPENHO DE GOTEJADORES USANDO EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO PARA IRRIGAÇÃO

RESUMO - O uso de efluente de baixa qualidade na irrigação por gotejamento pode ocasionar variação de vazão dos emissores e comprometer a eficiência da irrigação. Objetivou-se avaliar a variação de vazão de gotejadores de um sistema de irrigação utilizando efluente de esgoto tratado (EET). Um sistema de irrigação por gotejamento com dez modelos de gotejadores foi instalado na FCAV/UNESP, com efluente originado da Estação de Tratamento de Esgoto de Jaboticabal - SP, filtrado por um filtro de disco (120 mesh). Foram realizadas sete avaliações da vazão dos gotejadores (0, 100, 200, 300, 400, 500 e 600 horas de funcionamento), operando a 100 kPa. O experimento foi montado em delineamento casualizado, com arranjo fatorial 4x7 (4 gotejadores autocompensantes, denominados como G, e 7 tempos) e 6x7 (6 gotejadores não autocompensantes, denominados como E, e 7 tempos), com 4 repetições e teste de Tukey para comparação das médias. Foram determinados a vazão relativa (Q_r), o coeficiente de variação de vazão (CVQ) e o grau de entupimento (GE). Os gotejadores estudados apresentaram de média a boa uniformidade em função do coeficiente de variação de fabricação, e os gotejadores não autocompensantes apresentaram excelente coeficiente de determinação, caracterizando-se como regime turbulento. Verificou-se que, com o funcionamento do sistema, os modelos de gotejadores autocompensantes foram pouco suscetíveis ao entupimento e os modelos não autocompensantes foram mais suscetíveis. O modelo G4 destacou-se perante os demais gotejadores autocompensantes e o modelo E1 destacou-se entre os gotejadores não autocompensantes, apresentando Q_r próximas a 100%, baixos valores de CVQ e GE. Os resultados obtidos permitem afirmar que o tempo de uso do EET afeta a vazão dos gotejadores.

Palavras-chave: água residuária, economia de água, emissores, grau de entupimento

EMITTERS PERFORMANCE USING TREATED SEWAGE EFFLUENT FOR IRRIGATION

ABSTRACT - The use of low-quality effluent in drip irrigation can cause flow variation of the emitters and compromising the efficiency of irrigation. This study aimed to evaluate the flow variation of emitters in irrigation system using treated sewage effluent (TSE). A drip irrigation system with ten types of emitters was installed at FCAV/UNESP, with the TSE coming from the Sewage Treatment plant by Jaboticabal-SP, filtered through a disc filter (120 mesh). Seven evaluations of flow rate drippers were performed (0, 100, 200, 300, 400, 500 and 600 hours of operation) operating at 100 kPa. The experimental was randomized in a factorial arrangement 4x7 (4 self compensating emitters, know as G, and 7 times) and 6x7 (6 not self compensating emitters, know as E, and 7 times) with four replications and Tukey's test to compare means. The relative flow rate (Q_r), the flow rate coefficient of variation (CVQ) and degree of blockage (GE) were determined. The drippers study showed average to good uniformity due in function of the manufacturing variation coefficient, and drippers not self compensating showed excellent coefficient of determination, characterized as turbulent flow. It was found that the model self compensating emitters were less susceptible to clogging and non self compensating models were more susceptible to clogging during system functioning. The G4 model showed better performance compared to the other models self compensating emitters and the E1 model stood out among non self compensating emitters, presenting Q_r close to 100%, low CVQ and GE values. The results obtained allow to state that the TSE usage time affects the flow of the drippers.

Key words: wastewater, water saving, emitters, clogging

1. INTRODUÇÃO

A utilização de efluente de esgoto tratado para irrigação é uma alternativa viável por fornecer água e nutrientes às plantas, além de despertar consciência mundial no melhor uso deste bem finito. Outro ponto a considerar é que a utilização de esgotos tratados constitui medida efetiva de controle da poluição da água, pois evita ou reduz o lançamento de esgotos em corpos d'água (LIMA et al., 2005).

O uso de água residuária na irrigação proporciona economia de água em função da elevada quantidade de água que é utilizada na irrigação, que constitui aproximadamente 70% do consumo hídrico mundial, além de ser fonte de fertilizantes, tendo em vista que muitas águas residuárias possuem altas concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio. Entre estes resíduos líquidos destaca-se os esgotos domésticos que são ricos em material orgânico, sendo considerado sustentável para a aplicação na agricultura, principalmente os esgotos tratados, devido à sua composição e valores nutricionais (OLIVEIRA, 2012).

O método de irrigação localizada pode ser usado para a aplicação de águas residuárias em razão da elevada uniformidade de aplicação do efluente, superior a 90%, e do baixo risco de contaminação, tanto do produto agrícola quanto de operadores no campo (BATISTA et al., 2013; DAZHUANG ET al., 2009), além de se tratar de um sistema que opera a baixas pressões e alta eficiência (PUIG-BARGUÉS et al., 2010). Um sistema de gotejamento deve prezar sempre por uma boa uniformidade de distribuição de água. A manutenção da elevada uniformidade de aplicação e distribuição de água nos sistemas de irrigação por gotejamento torna-se fundamental para uma eficiente irrigação e, conseqüentemente, melhor aproveitamento dos recursos hídricos e redução dos custos (RIBEIRO et al., 2012). Porém, pela presença de agentes físicos, químicos e biológicos no efluente de esgoto tratado, os gotejadores estão suscetíveis ao entupimento, o qual pode reduzir a uniformidade de aplicação e a vazão dos emissores prejudicando, conseqüentemente o desenvolvimento das culturas irrigadas.

Alterações no coeficiente de variação de vazão (CVQ) dos gotejadores estão relacionadas ao processo de obstrução, cujo principal responsável é a qualidade da água usada na irrigação, uma vez que o problema não afeta igualmente todos os gotejadores ao longo da linha lateral, sendo dependente também do coeficiente de

variação de fabricação (RIBEIRO; COELHO; TEIXEIRA, 2010). Sendo assim, partindo da hipótese de que o uso de água de baixa qualidade prejudica o desempenho dos emissores, o estudo do tempo de uso contínuo de água residuária, sobre diferentes modelos de gotejadores instalados em condições de campo possibilita a determinação de possíveis alterações que possam ocorrer nos gotejadores.

Dessa maneira, objetivou-se determinar em laboratório com água limpa, a equação característica vazão x pressão e coeficiente de variação de fabricação (CVf) de dez modelos de gotejadores, e avaliar o efeito do tempo de uso do efluente de esgoto tratado (EET) como água de irrigação destes gotejadores, determinando a vazão relativa, coeficiente de variação de vazão e grau de entupimento dos mesmos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Equação característica do emissor e coeficiente de variação de fabricação (CVf)

A equação geral dos emissores, também conhecida como curva característica do emissor, descreve o comportamento da vazão em função da pressão de operação (KELLER; KARMELI, 1974). Segundo os mesmos autores, a equação característica do emissor depende das características geométricas dos emissores, pressão de serviço e viscosidade do fluido. Os mesmos autores relatam que dentro de um limite de vazão o expoente “x” caracteriza o regime de fluxo do gotejamento e a relação vazão pressão.

A equação característica do emissor (Equação 1), descreve o comportamento da vazão em função da pressão de operação (KELLER; KARMELI, 1974):

$$q = k p^x \quad (1)$$

em que:

q - vazão do gotejador, L h⁻¹;

k - constante de proporcionalidade, específica para cada emissor;

p - pressão em que opera o emissor, kPa;

x - expoente que caracteriza o regime de fluxo.

Normalmente, quando o emissor apresenta regime laminar, o expoente x da equação tende a 1 caracterizando um emissor com alta sensibilidade à variação de pressão; quando o regime é turbulento o expoente “x” da equação tende a 0,5; e quando o emissor é autocompensante o expoente “x” tende a 0 (SCHIMIDT, 2014). De acordo com Azevedo (1986) e Abreu et al. (1987), quanto mais próximo de zero for o valor de “x”, menor será a sensibilidade do emissor à variação de pressão.

Keller e Bliesner (1990) utilizam o valor do coeficiente de descarga para classificar o regime de escoamento no emissor de acordo com a Figura 1.

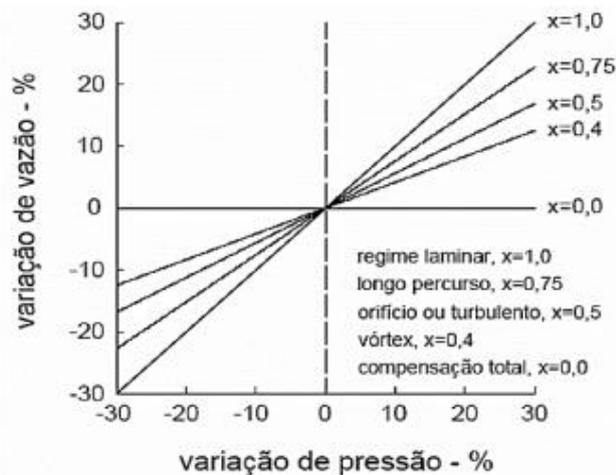


Figura 1. Classificação dos emissores de acordo com seu expoente e a variação de vazão em função da variação de pressão para cada tipo de regime de escoamento.

Segundo Pizarro Cabello (1986) um emissor perfeito teria o expoente $x = 0$ (autocompensante), os de regime laminar $x = 1$ e nos de regime turbulento $x < 1$; para Frizzone et al. (2012) o emissor perfeito deve apresentar expoente “x” igual a zero, sendo anulado o efeito da variação de pressão na vazão do emissor.

Qualquer variação na vazão dos emissores na área do projeto poderá afetar a lâmina de irrigação aplicada às plantas. O desempenho hidráulico de um emissor é determinado, dentre outros fatores, pelo coeficiente de variação de fabricação (CVf), que é uma medida de variação de fluxo causada por variabilidade no processo de fabricação (ABREU et al., 1987).

Para Von Bernuth e Solomon (1986), o ideal para um sistema de gotejamento é que todos os emissores apliquem o mesmo volume de água em um determinado tempo. Entretanto, isso não ocorre na prática, pois a vazão dos emissores é afetada pelo processo de fabricação e a variações de pressão da água.

Algumas das causas comuns de variação de fabricação são: pressão de moldagem, temperatura, variação na matéria-prima, velocidade de injeção, temperatura do molde, tempo do ciclo do processo e manutenção do molde. Qualquer mudança na temperatura, pressão e tempo de esfriamento da moldagem afeta as características do emissor; por exemplo, o tamanho, forma, peso, rugosidade das superfícies e a resistência (ANDRADE, 2005).

Para classificação dos emissores adotando o coeficiente de variação de fabricação dos gotejadores, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, em seu projeto de norma ABNT 12:02.08-022, classifica-os de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de coeficiente de variação de fabricação de emissores para gotejamento (ABNT, 1986).

| CVf (%) | Interpretação |
|-----------|--------------------------|
| Até 10 | Uniformidade Boa |
| > 10 – 20 | Uniformidade Média |
| > 20 – 30 | Uniformidade Marginal |
| > 30 | Uniformidade Inaceitável |

Foi utilizada também a classificação segundo Solomon (1979), para o comportamento dos emissores com base no CVf (Tabela 2).

Tabela 2. Classificação de coeficiente de variação de fabricação de emissores para gotejamento (SOLOMON, 1979).

| CVf (%) | Interpretação |
|-----------------|--------------------------|
| $\leq 3,00$ | Uniformidade Excelente |
| 3,00 – 7,00 | Uniformidade Média |
| > 7,00 – 10,00 | Uniformidade Baixa |
| > 10,00 – 14,00 | Uniformidade Pobre |
| > 14,00 | Uniformidade Inaceitável |

2.2 Reuso de água na agricultura

O uso consuntivo de água do setor agrícola é, no Brasil, de aproximadamente 70% do total (AUGUSTO et al., 2012). Essa demanda significativa, associada a escassez de recursos hídricos e a necessidade de fontes alternativas de nutrientes às plantas, leva a ponderar que as atividades agrícolas devem ser consideradas prioritárias em termos de reuso de efluentes tratados.

Em todo o mundo cresce a consciência da importância do uso racional dos recursos hídricos e do reuso da água, dentre os quais Santos et al. (2006) citam: a) o

reuso proporciona alívio na demanda e preservação de oferta de água para usos múltiplos; b) na reciclagem de nutrientes, proporciona economia significativa de insumos, por exemplo, fertilizantes e ração animal; c) ampliação de áreas irrigadas e a recuperação de áreas improdutivas ou degradadas; e d) redução de lançamento de esgotos em corpos receptores, contribuindo para a redução de impactos de poluição, contaminação e eutrofização.

O reuso de efluente de esgoto doméstico tratado na agricultura apresenta diversas vantagens tanto econômicas como ambientais. Em alguns países como Austrália, Arábia Saudita e Israel essa prática é comum e faz parte do planejamento e gestão dos recursos hídricos (PESCOD, 1992). De acordo com Abdellah e Ashbolt (2000), nas próximas décadas, existirá uma demanda crescente de reuso de água em várias regiões urbanas do mundo com intuito de satisfazer as pressões ambientais, econômicas e sociais, visto que em algumas comunidades específicas, em razão de seus recursos hídricos limitados, ocorre uma pressão adicional para se praticar o reuso de água.

O uso de águas residuárias para irrigação constitui opção altamente promissora e deve aumentar significativamente nos próximos anos no Brasil. As principais justificativas apontadas pelos pesquisadores são as dificuldades na busca por fontes alternativas de águas para irrigação, custo elevado de fertilizantes, custo elevado de sistemas de tratamento de efluentes e reconhecimento do valor da atividade pelos órgãos gestores de recursos hídricos. Esse reuso vem sendo estudado e recomendado por diversos pesquisadores tais como, Batista et al. (2013) e Coelho et al. (2014), em todo o mundo como alternativa viável para atender as necessidades hídricas e, em grande parte, nutricionais das plantas e como forma de proteção ambiental. Entretanto, para que se torne uma prática viável, é necessário aperfeiçoar as técnicas de tratamento, aplicação e manejo de águas residuárias (HESPANHOL, 2003).

Para Montes et al. (2006), a atividade é atraente, pois preserva os recursos hídricos, e ainda age como uma fonte de nutrientes as culturas. Blum (2002) cita que para que se tenha qualidade, o reuso deve seguir alguns critérios como: não acarretar prejuízos ambientais, não causar riscos sanitários a população, e a água deve atender as exigências relativas ao uso a que ela se destina.

De acordo com Hespanhol (2003), o uso de efluentes na agricultura teve aumento devido aos seguintes fatores: a) dificuldade de encontrar outras fontes alternativas de água para agricultura; b) elevado custo no tratamento das águas residuárias e o não reaproveitamento, sendo completamente descartado aos recursos hídricos; c) aceitação sociocultural do reuso agrícola. O autor ainda relata que há incentivos governamentais para que tenha a institucionalização do reuso, e cita diretrizes fundamentais para o uso de efluentes urbanos em irrigação, tendo em vista os aspectos legais para sua utilização. Diretrizes estas: estabelecimento de um status legal para os esgotos, e a delimitação de um regime legal para a sua utilização. E garantir os direitos dos usuários, principalmente com relação ao acesso e apropriação dos esgotos, incluindo a regulamentação pública de seus usos.

Efluentes adequadamente tratados podem ser utilizados para aplicação em: a) culturas de alimentos não processados comercialmente: irrigação superficial de qualquer cultura alimentícia, incluindo aquelas consumidas cruas; b) culturas de alimentos processados comercialmente: irrigação superficial de pomares e vinhas; c) culturas não alimentícias: pastos, forragens, fibras e grãos.

Ao invés de contaminar os recursos hídricos superficiais e subterrâneos com os nutrientes presentes nos efluentes de esgoto, o uso deste produto na irrigação poderá suprir as necessidades hídricas e também as necessidades nutricionais dos cultivos. Embora já se tenha realizado estudos importantes sobre o tema, há necessidade de estudos adicionais para estabelecer técnicas e equipamentos de irrigação, principalmente no sistema localizado onde há uso de emissores de baixa vazão e com pequenos orifícios de saída de água, com o mínimo de impacto ambiental, sanitário e econômico.

2.3 Irrigação por gotejamento

A irrigação por gotejamento é caracterizada pelo fornecimento de água de forma frequente e lenta por meio de emissores, localizados em pontos selecionados ao longo das linhas laterais de distribuição de água (HOWELL et al., 1983). Tem como objetivo melhorar a produção agrícola através de fornecimento adequado de água e nutrientes diretamente no sistema radicular das plantas (AIROLDI, 2007). São caracterizados como peças conectadas às linhas laterais, capazes de dissipar a

pressão disponível na linha lateral e aplicar a água em vazões pequenas. A vazão dos mesmos, em geral, varia entre 1 a 20 L h⁻¹, aplicada gota a gota, sob pressões de serviço geralmente de 10 m de coluna d'água (m c. a.) (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2006) a introdução do método de irrigação por gotejamento não deve ser considerada somente como uma nova técnica para suprir água às culturas, mas sim, como uma filosofia em termos de aplicação de água, fazendo parte integrante de um conjunto de técnicas agrícolas nos cultivos, sob condições controladas de umidade do solo, adubação, salinidade, fitossanidade e variedades selecionadas, de modo a obter efeitos significativos na produção por área e por água consumida e qualidade do produto. Para Souza et al. (2005), a grande vantagem do sistema de irrigação localizada deve-se a forma de aplicação, próxima ao sistema radicular das plantas e favorecendo a economia de água e o aumento na produção.

A adoção de práticas e de sistemas de irrigação inadequados e de baixa eficiência pode ocasionar impactos ambientais negativos nos solos e nos recursos hídricos que, posteriormente, poderão refletir em conflitos no uso da água. Diante disso, tem-se observado, ao longo dos anos, uma tendência crescente na adoção de sistemas localizados, pois além da facilidade de utilização dos equipamentos e da resposta das culturas a esses sistemas, possibilitam maior economia de água, energia e mão de obra.

Segundo Scaloppi (1986), os sistemas de irrigação localizada se caracterizam por economia de água, pelo grande potencial de automação, pequena utilização de mão de obra, suscetibilidade a entupimentos, utilização em condições de solos pedregosos e topografia acidentada, aplicação de produtos químicos em solução na água de irrigação. A irrigação por gotejamento apresenta como vantagens, além, da economia de água e energia, a possibilidade de automação e fertirrigação (SOUSA et al., 2011).

De acordo com Najafi, Tabatabaei e Asgari (2010), no caso de aplicação de efluentes que possuem substâncias nocivas à saúde humana, os sistemas de irrigação por gotejamento também apresentam a vantagem de minimizar o contato direto da água contaminada com o agricultor e com o produto agrícola comercializado.

Como desvantagens, os sistemas que operam com águas residuárias apresentam suscetibilidade ao entupimento dos gotejadores. Nesse caso, a água utilizada na irrigação por gotejamento exige algum tratamento para assegurar que a operação do sistema seja satisfatória. Vale ressaltar, ainda, que em comparação com a irrigação de superfície e por aspersão, a utilização da irrigação por gotejamento é mais indicada em relação à aplicação de águas residuárias para a agricultura, por ocasionar baixo risco de contaminação microbiana do ar, solo e plantas (AYERS; WESTCOT, 1994).

2.4 Entupimento dos gotejadores

A presença de grande variedade de microrganismos nas águas residuárias que podem se aglomerar a partículas minerais ou orgânicas em suspensão, além da composição química da água, com elementos, tais como ferro e sódio, que pode ocasionar obstrução de gotejadores. O entupimento dos emissores é um grave problema associado ao gotejamento, pois prejudica a uniformidade de aplicação de água, e a limpeza ou substituição dos emissores entupidos é onerosa (NAKAYAMA; BUCKS, 1991).

Para a não ocorrência de entupimento nos emissores ou mesmo a sua minimização são sugeridas diversas técnicas na literatura, sendo mais usuais a filtragem e a cloração. Capra e Scicolone (2007) afirmam, ainda, que devem ser adotadas medidas especiais de manejo e os componentes dos sistemas de irrigação por gotejamento devem ser cuidadosamente selecionados quando se utiliza água residuária na irrigação.

Para Cunha et al. (2013) em um sistema de irrigação por gotejamento a uniformidade de aplicação de água está relacionada a fatores hidráulicos e à qualidade dos gotejadores, além da qualidade da água e uso da fertirrigação com sais que podem ocasionar o entupimento dos emissores, contribuindo também para a desuniformidade de aplicação.

Na maioria dos estudos com águas residuárias, o entupimento tem efeito direto na redução de vazão dos gotejadores. Tajrishy, Hills e Tchobanoglous (1994) constataram a formação de biofilme resultante de mucilagens bacterianas e sólidos suspensos em gotejadores aplicando efluente de esgoto doméstico secundário. Já

Taylor et al. (1995) verificaram que 90% dos gotejadores apresentaram entupimento com biofilme devido à aplicação de esgoto doméstico tratado, formado pela matéria orgânica em decomposição e pelos microrganismos.

Estudos mostram que os emissores possuem diferentes potenciais ao entupimento de acordo com a qualidade da água e das características técnicas de construção (arquitetura do labirinto). Devido aos potenciais benefícios do uso de efluentes na irrigação por gotejamento, técnicas para proteger e reduzir entupimento de emissores tem sido estudadas por diferentes pesquisadores (entre eles, ORON et al., 1979; RAVINA et al., 1992; BARROS et al., 2009, BATISTA et al., 2012).

Trabalhando com água residuária de suinocultura, Batista et al. (2013) verificaram que as características sólidos suspensos, ferro total e população bacteriana representaram risco severo de entupimento de gotejadores e que as porcentagens de entupimento dos gotejadores podem ser menores em função do menor tempo de funcionamento do equipamento para aplicação da água residuária de suinocultura.

Utilizando esgoto sanitário tratado Rav-Acha et al. (1995) verificaram com apenas 60 horas de funcionamento, diminuição de 68% da vazão nominal do emissor. Batista et al. (2012) também verificaram redução na vazão de gotejadores utilizando efluente de esgoto doméstico tratado preliminar, primário e secundário de 62, 22 e 61%, respectivamente.

São conhecidos três tipos de processos de obstrução, o físico, que está relacionado a sedimentação de partículas que vêm em suspensão na água, o químico, que está relacionado com a precipitação de substâncias diluídas na água e o biológico, que está associado ao desenvolvimento de microrganismos no interior das instalações (PIZARRO, 1996). A combinação dos fatores físicos, químicos e biológicos consiste na principal causa de obstrução de gotejadores utilizados na aplicação de águas residuárias. Na prática, esta obstrução pode apresentar diversas causas, entre elas, a sedimentação de material orgânico, o crescimento de bactérias, e a oxidação de ferro, valores elevados de pH do efluente podem acelerar o crescimento de biofilme e obstrução de emissores e linhas de irrigação (NAKAYAMA; BUCKS, 1991).

Em virtude das diversas causas que podem provocar a obstrução dos gotejadores reduzindo a eficiência do sistema de irrigação localizada, além da

interferência de algumas variáveis, tais como, a temperatura que afeta o desenvolvimento de microrganismos, torna-se difícil quantificar os agentes possíveis de obstrução. Entretanto, Ayers e Westcot (1985) propuseram uma classificação de qualidade da água para determinar o risco de obstrução dos emissores (Tabela 3).

Tabela 3. Classificação da qualidade da água relacionada a seu potencial de entupimento em gotejadores.

| | Problemas | Unidade | Grau de restrição de uso | | |
|-----------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|----------|
| | | | Nenhuma | Ligeira a moderada | Severa |
| Físico | Sólidos em suspensão | mg L ⁻¹ | < 50 | 50 – 100 | > 100 |
| | pH | mg L ⁻¹ | < 7,0 | 7,0 – 8,0 | > 8,0 |
| | Sólidos solúveis | mg L ⁻¹ | < 500 | 500 – 2.000 | > 2.000 |
| Químico | Manganês | mg L ⁻¹ | < 0,1 | 0,1 – 1,5 | > 1,5 |
| | Ferro | mg L ⁻¹ | < 0,1 | 0,1 – 1,5 | > 1,5 |
| | Ác. Sulfídrico | mg L ⁻¹ | < 0,5 | 0,5 – 2,0 | > 2,0 |
| Biológico | Pop. bactérias | Nº máx. mL ⁻¹ | < 10.000 | 10.000 – 50.000 | > 50.000 |

O entupimento de gotejadores prejudica o funcionamento geral do sistema de irrigação afetando suas características de operação e exigindo manutenções mais frequentes. Comumente, a obstrução diminui a uniformidade de aplicação de efluente de sistemas de irrigação localizada (LIU; HUANG, 2009), além de provocar aumento no coeficiente de variação de vazão (CARARO et al., 2006).

2.4.1 Obstruções físicas

A obstrução física é causada pela sedimentação de partículas em suspensão na água (PIZARRO, 1996). Essas partículas são: areia, silte, argila, plásticos e materiais orgânicos. Entretanto, qualquer partícula maior que o orifício de saída do emissor pode causar entupimento como, por exemplo: pedaços de cano, fitas adesivas, solo.

A velocidade de fluxo da água em sistema de gotejamento diminui no final das linhas laterais, facilitando o acúmulo de sedimentos. Teixeira (2006) verificou que o entupimento dos emissores foi mais evidenciado nos finais das linhas laterais.

O entupimento por partículas físicas pode ser evitado por meio dos sistemas de filtragem, atuando com uma barreira física para partículas em suspensão.

2.4.2 Obstruções químicas

Os precipitados químicos podem ser produzidos quando as condições iniciais da água são modificadas como pH, temperatura, sólidos dissolvidos totais e, sobretudo ao final de cada irrigação, pois ocorre evaporação da água nos emissores, assim aumenta a concentração de sais dissolvidos que se precipitam quando superam o limite de solubilidade (PIZARRO, 1996). Em águas com presença de ferro (na forma ferrosa), quando em contato com o oxigênio, oxida-se e forma um precipitado (VERMEIREN; JOBLING, 1994).

Ao estudarem a influência da qualidade da água no entupimento de sistemas de irrigação localizada, Franco e Hernandez (2009) encontraram valores com maiores médias de pH entre 7,5 e 7,3, que indicam risco moderado de entupimento.

O ferro precipitado pode sair pelo emissor, ou ainda ficar retido por filamentos de bactérias, formando assim uma massa gelatinosa que obstrui a passagem da água (TEIXEIRA, 2006). Bucks, Nakayama e Gilbert (1979) estabeleceram que, para ser utilizada sem restrição na irrigação, a água deve apresentar concentração de ferro menor que $0,1 \text{ mg L}^{-1}$, pois águas com elevados teores de ferro em sistemas de irrigação por gotejamento possuem risco de entupimento dos emissores. Também segundo esses autores, águas com teor de ferro maior que $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ apresentaram alta suscetibilidade de entupimento.

Segundo Coelho et al. (2014) a utilização de água com elevado teor de ferro em sistemas de irrigação por gotejamento tem proporcionado sérios problemas de obstrução dos emissores. Assim, torna-se imprescindível o desenvolvimento de pesquisas que possam trazer soluções práticas para serem implantadas em campo.

2.4.3 Obstruções biológicas

Os constituintes biológicos da água, mesmo sendo menores que o orifício do gotejador podem causar entupimento dos gotejadores, pois se combinam com partículas de silte e argila formando aglomerados e também podem causar precipitação de manganês, ferro e enxofre (PITTS; HAMAN; SMAJSTRALA, 1990). Segundo Teixeira (2006), a interação dos microrganismos com a água de irrigação que contem ferro e H₂S, pode ocasionar o desenvolvimento desses microrganismos no interior das tubulações, promovendo o entupimento dos emissores.

Pizarro (1996) relata que a presença de algas provoca problemas inclusive nos filtros, ficando acumuladas, dificultando a passagem da água. Capra e Scicolone (2004) concluíram que a formação de biofilmes no interior das tubulações é resultante de interações de mucilagens bacterianas e sólidos suspensos, causando o entupimento dos emissores.

Teixeira (2006) cita que entupimentos causados por bactérias que oxidam o ferro são de difícil controle, assim o rápido crescimento das bactérias e a precipitação do ferro cria um material volumoso que pode entupir um sistema de irrigação por gotejamento em semanas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Determinação da equação característica vazão x pressão e coeficiente de variação de fabricação (CVF) dos gotejadores em laboratório

Visando caracterizar os gotejadores utilizados no experimento, foi realizado ensaio em laboratório para determinação da equação característica vazão x pressão e coeficiente de variação de fabricação (CVF).

As avaliações foram realizadas numa bancada de ensaios para tubos gotejadores no Setor de Plasticultura do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP (Figura 2A e 2B).



Figura 2. (A) Bancada de ensaio de vazão dos tubos gotejadores e (B) coletores no sistema em operação.

Para realização destes testes, seguindo as recomendações específicas na Norma ISO 9261 da ABNT (2006), foram utilizados 25 emissores de cada modelo de gotejador, obtidos aleatoriamente. Os emissores tiveram suas vazões determinadas nas pressões de 60, 80, 100, 120 e 140 kPa. Para a pressurização da bancada de testes foi instalada uma bomba com potência de 1 cv, monofásica, 220 volts, com

vazão máxima de $3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e pressão máxima de 500 kPa, suprida por um reservatório de nível constante de água com capacidade de 250 L.

A água foi filtrada em um filtro de discos (120 mesh) localizado na entrada da tubulação de PVC que continha os gotejadores. Para a leitura das pressões foi utilizado um manômetro tipo Bourdon e um manômetro de coluna de mercúrio para aferição das pressões, localizados próximos a entrada da tubulação de PVC. O controle da pressão na entrada dos gotejadores foi realizado utilizando uma válvula reguladora de pressão manual (registro de agulha).

Para determinação da vazão foram conectados os emissores na linha de alimentação e sob cada um deles foi colocado um coletor para captar a água. O mesmo procedimento foi repetido para todos os gotejadores. O tempo de coleta foi de três minutos. Em seguida, os coletores com a água coletada foram pesados em balança eletrônica, com precisão de 0,1 g. A massa de água foi transformada em volume (Equação 2).

$$q = \frac{m}{100 t d} 60 \quad (2)$$

em que:

q – vazão do gotejador, L h^{-1} ;

m – massa da água coletada, g;

t – tempo de coleta, minutos;

d – densidade da água utilizada no ensaio, g cm^{-3} .

A equação característica foi determinada a partir da Equação 1. O coeficiente de variação de fabricação que é a relação entre o desvio padrão e a média das vazões dos emissores amostrados (Equação 3).

$$\text{CVf} = \frac{S}{q_m} 100 \quad (3)$$

em que:

CVf – coeficiente de variação de vazão, %;

S – desvio-padrão da amostra, L h^{-1} ;

q_m – vazão média da amostra, L h^{-1} .

Para classificação dos emissores em relação ao coeficiente de variação de fabricação dos gotejadores, foi adotado os critérios sugeridos pela ABNT (1986) e Solomon (1979), Tabelas 1 e 2, respectivamente.

3.2 Área e instalação do experimento em campo

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal (FCAV-UNESP), localizada no município de Jaboticabal-SP (coordenadas geográficas 21° 14' 41,9" S e 48° 16' 25,2" O). A Estação de Tratamento de Esgoto "Dr. Adelson Taroco", de onde foi coletado o efluente de esgoto tratado (EET) para utilização no experimento, localiza-se a cerca de 1,5 km da área experimental (Figura 3).



Figura 3. Área experimental e ponto de captação do EET.

Em condições apropriadas e semelhantes a uma unidade operacional de irrigação localizada (Figura 4), foi instalado um experimento de campo com dez modelos de gotejadores (4 modelos autocompensantes e 6 modelos não compensantes) em nível com perda de carga desprezível, nos quais foi utilizado efluente de esgoto tratado (EET) para irrigação. Ressalta-se que para a remoção dos sólidos presentes na água residuária, foi utilizado um filtro de disco de 130 micra (120

mesh) da marca Azud®, o qual foi instalado na tubulação de derivação que abastecia as linhas laterais, o filtro de disco foi limpado diariamente.



Figura 4. Disposição dos gotejadores na área do experimento.

O efluente de esgoto após ser pressurizado da Estação de Esgoto até a área do experimento, ele era armazenado em duas caixas d'água de 10.000 L, onde posteriormente era utilizado no experimento. Na ligação entre as caixas e as bombas, foram utilizadas mangueiras de polietileno. A pressurização do EET foi realizada por uma moto bomba centrífuga de 0,5 cv. As linhas laterais, com os respectivos cavaletes estavam localizadas a 5 m dos reservatórios que armazenavam o EET após ser bombeado da Estação de Tratamento de Esgoto para a área experimental.

O experimento foi composto por 10 linhas laterais (LL) com comprimento variável de acordo com o espaçamento entre os emissores de cada gotejador, e espaçamento entre as linhas laterais de 0,5 m. No final das linhas laterais foram instaladas válvulas de final de linha para promover a limpeza das linhas quando o sistema era despressurizado.

3.3 Modelos de gotejadores

Os gotejadores utilizados no experimento e suas principais características técnicas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Principais características técnicas dos tubos emissores avaliados.

| Fabricante | Modelo | Dispositivo de compensação* | Espaçamento | Diâmetro do tubo | Vazão nominal |
|------------|----------|-----------------------------|-------------|------------------|----------------------|
| | | | (m) | (mm) | (L h ⁻¹) |
| NaanJain | Top Drip | AC | 0,30 | 16 | 1,70 |
| NaanJain | NaanPC | AC | 0,75 | 16 | 2,50 |
| Drip-Plan | Vardit | AC | 0,50 | 18 | 2,10 |
| NaanJain | Amnon | AC | 0,50 | 17 | 1,60 |
| Drip-Plan | Drip-Tec | NC | 0,50 | 17 | 2,30 |
| Petroisa | Durázio | NC | 0,30 | 16 | 1,70 |
| Irritec | P1 | NC | 0,25 | 16 | 1,50 |
| Chapin | Chapin | NC | 0,30 | 16 | 1,24 |
| Petroisa | Tiquira | NC | 0,30 | 16 | 2,00 |
| Netafim | Dripline | NC | 0,75 | 17 | 2,00 |

*AC = Autocompensante; NC = Não autocompensante

Com o objetivo de evitar possíveis especulações comerciais, positivas ou negativas, os gotejadores utilizados neste experimento foram codificados, uma vez que os ensaios conduzidos não são normatizados. Nos resultados apresentados, os códigos dos modelos dos gotejadores não possuem nenhuma relação com a sequência dos emissores citados.

3.4 Água residuária utilizada

A água residuária utilizada no experimento, denominada de EET, foi bombeada da Estação de Tratamento de Esgoto até o local do experimento por meio de uma motobomba a diesel ao longo de 1,5 km. Na estação de tratamento, o esgoto passa pelas seguintes fases:

- Fase Preliminar: remoção dos resíduos sólidos através de gradeamento mecânico.
- Fase Primária: remoção da carga orgânica em que as bactérias realizam a digestão anaeróbica (livre de oxigênio).
- Fase Secundária (pós-tratamento): as lagoas facultativas finalizam o processo e removem os organismos coliformes

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das análises químicas e de coliformes totais para o efluente testado.

Tabela 5. Valores médios das análises químicas e coliformes totais do EET utilizado no experimento, realizadas em 2014 e 2015.

| Parâmetro | Unidade | Valores |
|-----------------------------|----------------------------|---------|
| pH | - | 7,1 |
| Condutividade elétrica | $\mu\text{S cm}^{-1}$ | 455,0 |
| Nitrogênio total | mg L^{-1} | 53,0 |
| Ferro total | mg L^{-1} | 0,52 |
| Potássio | mg L^{-1} | 19,9 |
| Demanda química de oxigênio | mg L^{-1} | 225,0 |
| Cálcio | mg L^{-1} | 15,3 |
| Magnésio | mg L^{-1} | 6,0 |
| Resíduos sedimentáveis | mg L^{-1} | 0,2 |
| Óleos e Graxas | mg L^{-1} | 93,0 |
| Sulfato | mg L^{-1} | 23,6 |
| Manganês | mg L^{-1} | 0,1 |
| Zinco | mg L^{-1} | 0,3 |
| Sódio | mg L^{-1} | 58,3 |
| Coliformes totais | NMP (100 mL)^{-1} | 47.433 |

3.5 Avaliação dos gotejadores

A primeira avaliação foi realizada com água limpa e ocorreu após a montagem do experimento, com tempo igual à zero. Foram realizados mais seis testes de vazão nos mesmos gotejadores, previamente identificados, a cada 100 horas. Foram avaliados 16 emissores por linha lateral (LL), sendo que quatro emissores

caracterizavam as repetições, no caso quatro repetições por LL. Durante o teste a pressão no início da LL foi mantida a 100 kPa com o auxílio de regulador de pressão, dois manômetros de Bourdon e um manômetro de mercúrio para aferição. O sistema foi acionado 6 horas por dia de segunda a sexta-feira, totalizando, no final do experimento, tempo de uso dos gotejadores de 600 horas e 140 dias de uso dos emissores, entre 11 de setembro de 2014 e 13 de abril de 2015.

Nas avaliações foram utilizados coletores dispostos abaixo dos gotejadores que coletavam o EET dos emissores (Figura 5A). Cada gotejador era isolado por barbantes para que fosse coletada corretamente a vazão do único emissor avaliado (Figura 5B).



Figura 5. (A) Ensaio de vazão nos tubos gotejadores e (B) detalhe do coletor.

O tempo de coleta era de quatro minutos. Em seguida o líquido coletado foi pesado em balança eletrônica e, posteriormente, a massa transformada em litros por hora, adotando a massa específica do EET igual a 1 g cm^{-3} (Equação 2).

Para avaliação do desempenho dos gotejadores, foram calculados a vazão relativa (Q_r) a partir da Equação 4, o coeficiente de variação de vazão (CVQ), partindo-se da Equação 3 e grau de entupimento (GE) de acordo com a Equação 5, descritas a seguir.

$$Q_r = \frac{Q_a}{Q_i} 100 \quad (4)$$

em que:

Q_r – vazão relativa, %;

Q_a – vazão atual, L h⁻¹;

Q_i – vazão no início do experimento, L h⁻¹.

O coeficiente de variação de vazão (CVQ) pode ser calculado por meio da Equação 3, o que diferencia é que para caracterização dos emissores esta equação são para amostras novas retiradas da bobina. O CVQ é um índice estatístico que informa a variação da vazão para uma determinada amostra de gotejadores. É decorrente do projeto do gotejador, material utilizado em sua fabricação, da qualidade com que o gotejador é fabricado e das condições de uso durante a irrigação (KELLER; BLIESNER, 1990).

$$GE = \left(1 - \frac{Q_a}{Q_i} \right) 100 \quad (5)$$

em que:

GE – grau de entupimento, %.

Quando o valor do grau de entupimento (GE) for maior que 95% o gotejador será considerado como entupido. Quando GE = 0, não houve variação da vazão e o valor de GE menor que zero demonstra que houve aumento da vazão.

Como não há norma para caracterizar a suscetibilidade ao entupimento do gotejador, foi adotado ao término do experimento o critério sugerido por Barros et al. (2009) (Tabela 6) como análise principal da sensibilidade de emissores ao entupimento utilizando EET.

Tabela 6. Critério da análise de sensibilidade dos emissores à redução de vazão pelo uso de EET. Adaptado de Barros et al. (2009).

| Não Sensíveis | Sensíveis | Muito Sensíveis |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|
| $\Delta Q_r < 10\%$ e $CVQ < 5,5\%$ | ΔQ_r 10 a 20% e CVQ 5,5 a 15% | $\Delta Q_r > 20\%$ e $CVQ > 15\%$ |

ΔQ_r – variação de vazão relativa (%); CVQ – coeficiente de variação de vazão (%). Nos casos em que a ΔQ_r e o CVQ não se enquadrarem no mesmo grupo, escolher o grupo baseado nos valores mais altos de CVQ ou de ΔQ_r .

Como não consta em bibliografia um índice que expresse a severidade do grau de entupimento de um gotejador, foi adotado o índice sugerido por Morata et al. (2014) como análise do grau de entupimento, apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Severidade do grau de entupimento nos gotejadores. Morata et al. (2014).

| GE (%) | Classificação |
|--------------|-----------------|
| ≤ 0 | Sem entupimento |
| $> 0 - 10$ | Baixo |
| $> 10 - 40$ | Médio |
| $> 40 - 90$ | Alto |
| $> 90 - 100$ | Muito Alto |

3.6 Análise estatística

Para facilitar a discussão dos dados, foram analisados os gotejadores autocompensantes separadamente dos não compensantes. O experimento foi montado em delineamento casualizado, com arranjo fatorial 4x7 (4 modelos de gotejadores autocompensantes e 7 tempos) e 6x7 (6 modelos de gotejadores não compensantes e 7 tempos) e teste de Tukey para comparação das médias, com quatro repetições para comparação de médias das vazões relativas dos gotejadores. As análises estatísticas foram feitas por meio do programa computacional Assistat versão 7.7.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Equação característica vazão x pressão e coeficiente de variação de fabricação (CVf)

São apresentados na Tabela 8 os valores médios da vazão e os coeficientes de variação de fabricação. Vale ressaltar que apenas o modelo Tiquira apresentou-se com CVf superior a 7% que é o limite máximo permitido pela norma ISO 9261:2004, e com uniformidade média (ABNT, 1986) e baixa segundo Solomon (1979).

Tabela 8. Valores de vazão média, coeficiente de variação de fabricação e classificação da uniformidade pela ABNT (1986) e Solomon (1979) nos gotejadores.

| Modelo | Vazão média | CVf | Classificação da Uniformidade | |
|------------|-------------------|-------|-------------------------------|-----------|
| | L h ⁻¹ | % | ABNT | Solomon |
| Top Drip* | 1,70 | 2,57 | Boa | Excelente |
| NaanPC* | 2,72 | 3,53 | Boa | Média |
| Vardit* | 2,18 | 4,59 | Boa | Média |
| NaanAmnon* | 1,58 | 1,98 | Boa | Excelente |
| Drip-Tech | 2,19 | 1,30 | Boa | Excelente |
| Durázio | 1,28 | 3,61 | Boa | Média |
| Irritec P1 | 1,44 | 2,65 | Boa | Excelente |
| Chapin | 1,44 | 2,37 | Boa | Excelente |
| Tiquira | 1,96 | 10,00 | Média | Baixa |
| Dripline | 1,89 | 3,97 | Boa | Média |

*AC = Autocompensante

Os modelos de gotejadores Drip-Tech, Top Drip, Irritec P1, Chapin e NaanAmnon, apresentaram boa uniformidade (ABNT, 1986) e excelente (SOLOMON, 1979), destacando-se com valores inferiores a 3% do CVf, podendo ser considerados de ótima qualidade do ponto de vista do processo de fabricação. Já os gotejadores Durázio, NaanPC, Vardit e Dripline, apesar de terem sido classificados como boa uniformidade pela ABNT, caracterizaram-se como média uniformidade, segundo Solomon, por apresentarem CVf entre 3 e 7%.

O CVf é uma medida estatística que avalia o processo de fabricação dos emissores, sendo utilizada também para avaliar a variação de fluxo do emissor ao

longo de uma linha lateral de irrigação localizada (HOLANDA FILHO et al., 2001). Portanto, os valores baixos de CVf, demonstram a pouca variação de vazão que ocorre nos emissores devido a processo de fabricação.

Corroborando com os resultados deste experimento, Garcia (2006) ao realizar avaliação técnica de 11 tubos gotejadores comercializados no Brasil: Petro Drip, Golden Drip, Chapin, Queen Gil, Aqua Traxx, Tiran, Amanco Drip e Twin Plus (não compensantes) e NaanPc, Ram e Amanco Drip PC (autocompensantes), seguindo a norma ISO 9261:2004, verificou que para todos os tubos gotejadores estudados os valores de CVf apresentaram-se inferiores a 7% (limite máximo considerado pela norma) variando entre 0,9% para o modelo Ram e 5,6% para o modelo Golden Drip, e todos foram classificados como uniformidade boa. Já Schmidt (2014), avaliando o efeito da espessura da parede no desempenho de quatro tubos gotejadores (Tiquira, Manári, Amandi e Jurussu), verificou que apenas um modelo estudado apresentou CVf superior a 7% (limite da norma) e foi classificado com média uniformidade.

Com os valores de vazão em função da pressão de entrada, foram determinadas as equações características vazão x pressão e o coeficiente de determinação (R^2) na Tabela 9.

Tabela 9. Equações características vazão x pressão e coeficientes de determinação (R^2) obtidos para os modelos de gotejadores.

| Modelo | Equação $q = k p^x$ | R^2 |
|------------|--------------------------|-------|
| Top Drip* | $q = 1,9733 p^{-0,0330}$ | 0,85 |
| NaanPC* | $q = 2,8940 p^{-0,0140}$ | 0,52 |
| Vardit* | $q = 3,9816 p^{-0,1330}$ | 0,96 |
| NaanAmnon* | $q = 1,8399 p^{-0,0340}$ | 0,78 |
| Drip-Tech | $q = 0,2293 p^{0,4919}$ | 0,99 |
| Durázio | $q = 0,1474 p^{0,4722}$ | 0,99 |
| Irritec P1 | $q = 0,1340 p^{0,5174}$ | 0,99 |
| Chapin | $q = 0,2257 p^{0,4041}$ | 0,98 |
| Tiquira | $q = 0,1267 p^{0,5964}$ | 0,99 |
| Dripline | $q = 0,2177 p^{0,4714}$ | 0,99 |

*AC = Autocompensante

Para os gotejadores não autocompensantes considera-se que o valor do expoente do emissor “x” é maior que 0,2, pela norma ISO 9261:2004, o que se pode observar na Tabela 12. Verifica-se que os valores de “x” variaram entre 0,404 e 0,596 (Figura 6), caracterizando-se com regime de escoamento turbulento (KELLER; KARPELLI, 1974), por estarem próximos a 0,5. Os valores do expoente “x” próximos a 0,5 também indicam que as mudanças na vazão se relacionam com a raiz quadrada da pressão, conseqüentemente, uma variação na pressão da ordem de 20% permite que a vazão dos emissores varie em torno de $\pm 10\%$.

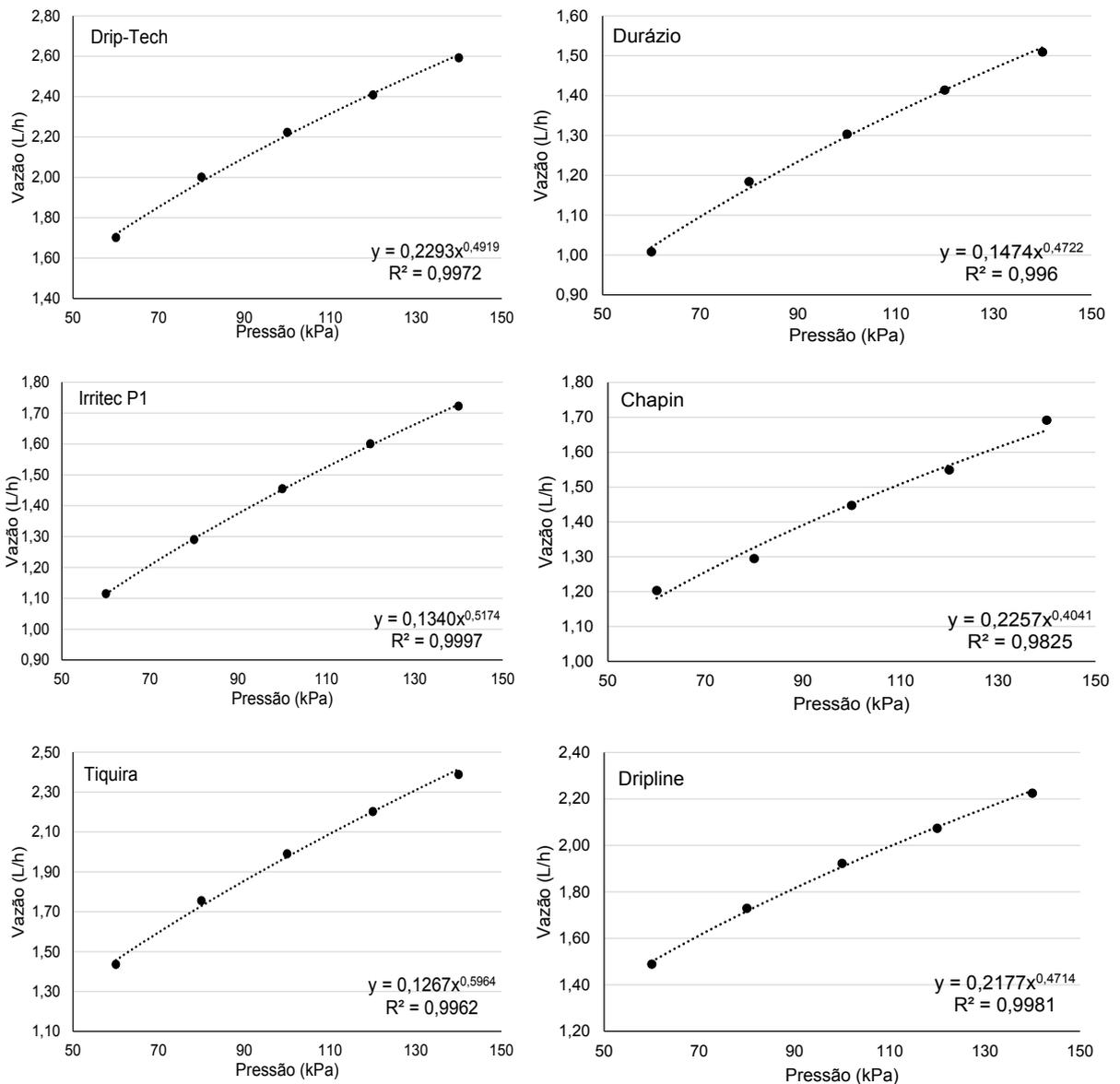


Figura 6. Valores da vazão (Q) em função das pressões obtidas para os gotejadores não autocompensantes.

Segundo Lopez (1997), o coeficiente de determinação serve como ferramenta útil para comprovar o ajuste da equação. Valores próximos de 1 indicam bom ajuste, como ocorreu para os modelos de gotejadores não autocompensantes, que apresentaram valores de R^2 próximos a 0,99, ou seja, 99% da variação da vazão é devido a relação que existe entre vazão e pressão, e 1% se deve ao erro experimental.

Já para os gotejadores autocompensantes o valor do expoente “x” deve ser próximo a 0, pela norma ISO 9261:2004, o que se pode observar na Figura 7, quando os valores de “x” variaram entre -0,133 e -0,014.

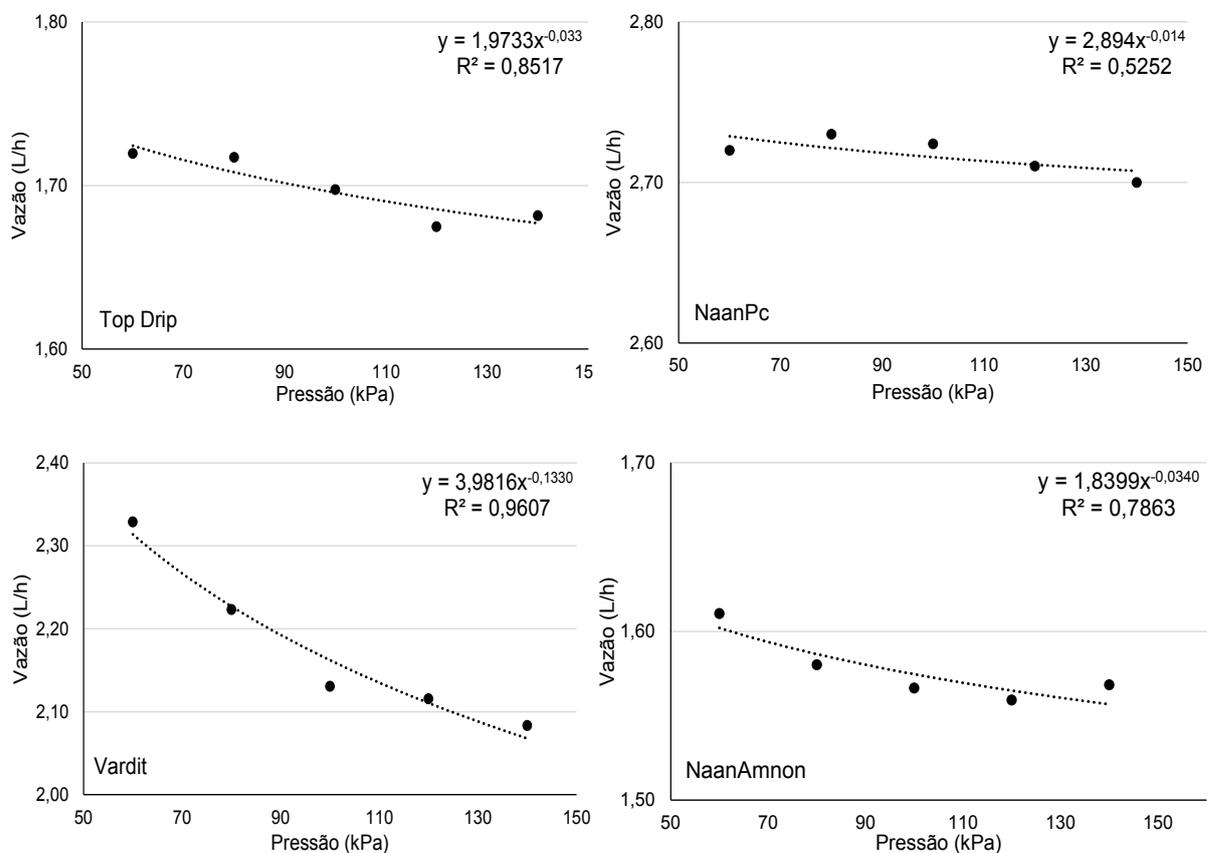


Figura 7. Valores da vazão (Q) em função das pressões obtidas para os gotejadores autocompensantes.

O ajuste mediante uma função exponencial é deficiente, resultando baixos valores do coeficiente de determinação (LOPEZ et al., 1997). Podendo ser observado para os modelos NaanPC e NaanAmnon, que apresentaram R^2 de 0,52 e 0,78, respectivamente. Entretanto, os modelos de gotejadores autocompensantes TopDrip

e, principalmente Vardit, apresentaram altos valores do coeficiente de determinação, que foram de 0,85 e 0,96, respectivamente, comprovando ótimo ajuste da equação.

4.2 Vazão relativa

4.2.1 Vazão relativa para gotejadores autocompensantes

A variação da vazão relativa (Q_r) dos quatro modelos de gotejadores autocompensantes em função do tempo mostra que houve efeito do modelo de gotejador na vazão relativa, e esta variou de maneira diferente para os gotejadores estudados, como era esperado, ou seja, há gotejadores mais suscetíveis na alteração da vazão utilizando EET. Cabe observar que na maior parte de funcionamento a Q_r foi superior a 100%, ou seja, ocorreu aumento da vazão (Figura 8).

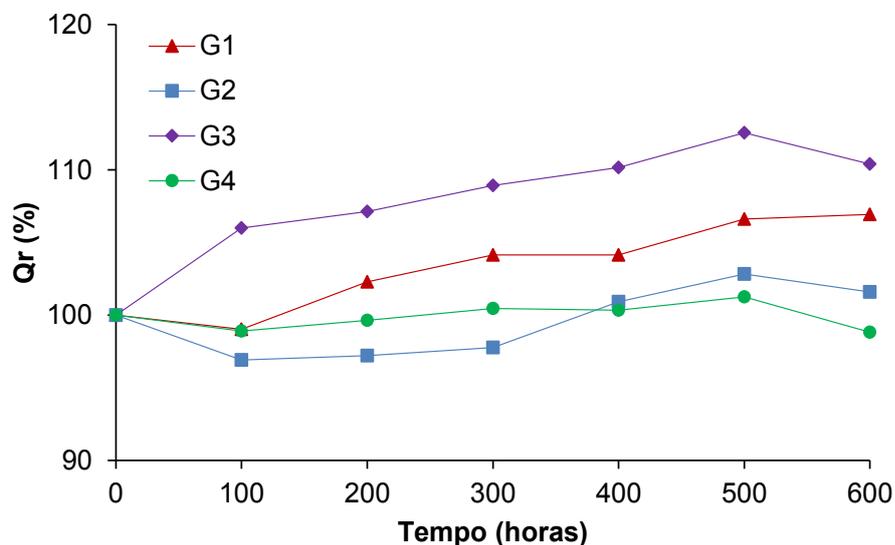


Figura 8. Vazão relativa (Q_r) de quatro modelos de gotejadores autocompensantes utilizando EET como água de irrigação em função do tempo de uso.

O gotejador G4 foi o que apresentou em todos os testes a Q_r mais próximo de 100%, ou seja, com menor alteração da vazão, porém foi o único que apresentou ligeira redução na vazão final em 600 horas (98,81%), ressalta-se que esta leve redução pode ter ocorrido devido ao fato deste gotejador apresentar baixa vazão relativa, quando comparado aos demais. O gotejador G2 apresentou vazão relativa mantendo-se também sempre próximo a 100% durante o período estudado, entretanto ao final do teste apresentou aumento na Q_r , passando para 101,60%. Entre os gotejadores estudados, os modelos G1 e G3 caracterizaram-se com maior variação

de vazão no decorrer do funcionamento, apresentando, maior incremento em suas Qr, sendo respectivamente, 105,93 e 110,40%, ao final do experimento.

Por apresentarem diferentes vazões relativas, foi aplicada análise de variância e teste de comparação de médias (Tukey) visando quantificar o efeito do tempo de funcionamento nos gotejadores autocompensantes estudados (Tabela 10).

Tabela 10. Análise de variância e teste de Tukey dos valores médios da vazão relativa (Qr) para os quatro gotejadores autocompensantes utilizando EET.

| Fator | Vazão relativa – Qr (%) |
|---------------|-------------------------|
| Teste F | |
| G | 67,66** |
| T | 12,57** |
| G x T | 2,82** |
| Gotejador (G) | |
| G1 | 103,30 b |
| G2 | 99,60 c |
| G3 | 107,88 a |
| G4 | 99,92 c |
| Tempo (T) | |
| 0 | 100,00 e |
| 100 | 100,20 de |
| 200 | 101,57 cde |
| 300 | 102,83 bcd |
| 400 | 103,89 abc |
| 500 | 105,81 a |
| 600 | 104,44 ab |
| CV (%) | 2,41 |

*: significativo (P<0,05); **: significativo (P<0,01); CV: coeficiente de variação.

A comparação de médias mostrou que ocorreram diferenças estatisticamente significativas entre os modelos de gotejadores autocompensantes avaliados em 600 horas de funcionamento (Tabela 10). Os melhores desempenhos foram obtidos para os modelos G2 e G4, que não se diferiram entre si e obtiveram vazões relativas mais próximas a 100%. A Qr do G3 diferiu estatisticamente dos demais gotejadores. Esse

modelo apresentou maior Qr entre os quatros modelos estudados, aumentando, em média, 7,88% sua vazão, caracterizando assim, inferioridade na distribuição do efluente de esgoto tratado. O gotejador G1 obteve variação média de 3,30% de sua vazão, tendo a Qr desse modelo também diferido estatisticamente dos demais.

Em relação ao efeito do tempo de uso do efluente nos gotejadores, observa-se que ocorreu aumento significativo na vazão dos gotejadores após 300 h de uso do EET, ou seja, até esse tempo, a vazão dos emissores manteve-se estatisticamente semelhante. As vazões dos emissores se assemelharam entre 400 e 600 h, ressaltando-se que o pico de maior vazão ocorreu a 500 h e redução em 600 h de funcionamento, assemelhando-se a 300 h.

Corroborando com os resultados, Carvalho et al. (2014) ao avaliarem a suscetibilidade de diferentes tubos gotejadores ao entupimento por aplicação de ferro solúvel, carga orgânica (fitoplâncton/algas) e sólidos em suspensão, verificaram que dois modelos de gotejadores apresentaram aumento de suas vazões relativas devido a um desequilíbrio na membrana de compensação. Este desequilíbrio pode ter ocorrido através da deposição de partículas físicas entre a membrana, ou ainda, a quantidade de elementos químicos no efluente que podem danificar a membrana.

Por apresentar significância, foi realizado o desdobramento da interação modelo de gotejador x tempo (Tabela 11).

Tabela 11. Desdobramento da interação gotejador x tempo para vazão relativa dos quatro modelos de gotejadores submetidos a uso de EET como água de irrigação.

| Got. | Tempo | | | | | | |
|------|---------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| G1 | 100 aB | 99,02 bB | 102,30 bAB | 104,14 bAB | 104,14 bAB | 106,62 bA | 105,93 aA |
| G2 | 100 aAB | 96,90 bB | 97,20 cB | 97,77 cAB | 100,92 bAB | 102,83 bcA | 101,60 bAB |
| G3 | 100 aC | 105,99 aB | 107,14 aB | 108,93 aAB | 110,16 aAB | 112,55 aA | 110,40 aAB |
| G4 | 100 aA | 98,90 bA | 99,64 bcA | 100,46 bcA | 100,35 bA | 101,26 cA | 98,82 bA |

Letras minúsculas iguais, na coluna, e letras maiúsculas iguais, na linha, não diferem entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Observa-se que o gotejador G4 foi o único modelo que não apresentou diferença significativa de sua vazão relativa no decorrer do tempo, sendo que esta vazão sempre esteve próxima a 100% (Tabela 11). Já o gotejador G3 foi aquele que

apresentou maior variação de Qr em 600 horas de funcionamento. Este aumento na vazão caracterizado pelo gotejador G3 pode ocasionar má distribuição do efluente na linha e ainda a aplicação de taxas superiores das que estão previstas, de água residuária, podendo ocasionar problemas como a contaminação do lençol freático ou ainda superdosagem de nitrogênio e água para cultura que pode vir a ser irrigada com o efluente de esgoto tratado.

4.2.2 Vazão relativa para gotejadores não autocompensantes

A variação da vazão relativa (Qr) dos seis modelos de gotejadores não autocompensantes em função do tempo, mostra que ocorreu redução da Qr em cinco modelos dos gotejadores estudados ao final do experimento em 600 h (Figura 9). Com menor valor destaca-se o modelo E4 que apresentou Qr inferior a 90% ao final de 600 h de funcionamento.

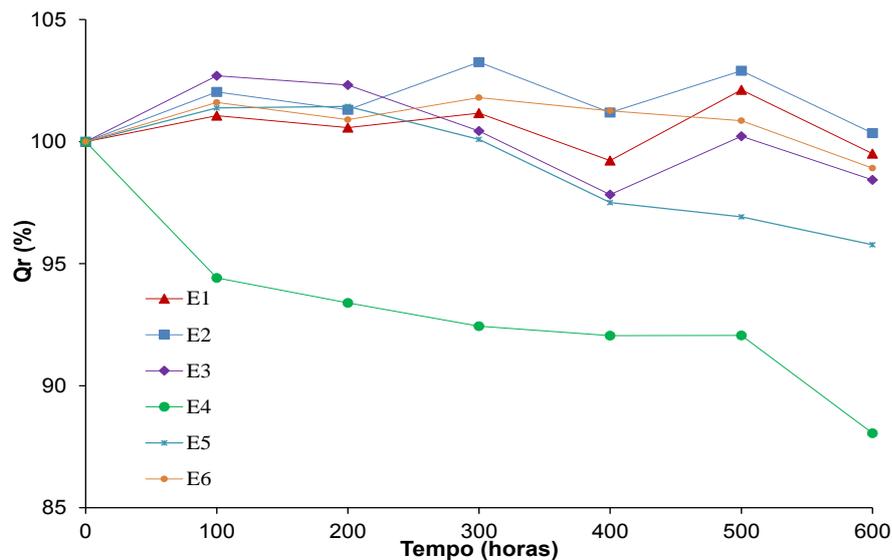


Figura 9. Vazão relativa (Qr) de seis modelos de gotejadores não autocompensantes utilizando EET como água de irrigação em função do tempo de uso.

O gotejador E2 manteve sua vazão praticamente constante durante o período de estudo, e o seu valor final foi o único que apresentou ligeiro aumento na vazão (100,35%). Os gotejadores E1, E3 e E6 apesar de suas vazões terem variado pouco durante o experimento, apresentaram redução em sua Qr, encerrado às 600 h com 99,51, 98,44 e 98,91%, respectivamente. O gotejador E5 apresentou redução em sua vazão durante o tempo de funcionamento, porém esta redução não ocorreu de forma

intensa, apresentando Qr de 95,78% em 600 h. Já o gotejador E4 foi o qual apresentou maior efeito negativo do uso de EET na vazão entre os gotejadores não autocompensantes estudados, ocasionando, Qr de 88,05% ao final do experimento.

De acordo com o critério de sensibilidade dos emissores à redução de vazão (Tabela 6), verifica-se que apenas o gotejador E4 apresentou variação da Qr superior a 10%, caracterizando-se como sensível a redução de vazão.

Foi aplicada análise de variância e teste de comparação de médias (Tukey) visando quantificar o efeito do tempo de funcionamento nos gotejadores não autocompensantes estudados (Tabela 12).

Tabela 12. Análise de variância e teste de Tukey dos valores médios da vazão relativa (Qr) para os seis gotejadores não autocompensantes utilizando EET.

| Fator | Vazão relativa – Qr (%) |
|---------------|-------------------------|
| Teste F | |
| E | 29,89** |
| T | 4,59** |
| E x T | 1,34 ^{NS} |
| Gotejador (E) | |
| E1 | 100,52 ab |
| E2 | 101,58 a |
| E3 | 100,28 ab |
| E4 | 93,20 c |
| E5 | 99,02 b |
| E6 | 100,76 ab |
| Tempo (T) | |
| 0 | 100,00 a |
| 100 | 100,53 a |
| 200 | 99,98 a |
| 300 | 99,86 a |
| 400 | 98,18 ab |
| 500 | 99,18 ab |
| 600 | 96,84 b |
| CV (%) | 2,99 |

^{NS}: não significativo ($P > 0,05$); **: significativo ($P < 0,01$); CV: coeficiente de variação.

A comparação de médias mostrou que ocorreram diferenças estatisticamente significativas entre os modelos de gotejadores não autocompensantes avaliados em 600 horas de funcionamento (Tabela 12). Apresentaram melhores desempenho, os modelos E1, E2, E3 e E6, que não se diferiram e obtiveram vazões relativas próximas a 100%. O gotejador E5 diferiu estatisticamente dos demais gotejadores com uma Qr média de 99,02%. E, por fim, o gotejador E4 foi o qual apresentou menor Qr média entre os gotejadores não autocompensantes, durante as 600 h de funcionamento, com redução média de sua vazão de 6,80%, este gotejador caracteriza-se com baixa vazão nominal, o que pode ter contribuído para maior redução da Qr média

Em relação ao efeito do tempo de uso de efluente nos gotejadores, observa-se que não ocorreu efeito significativo na vazão dos gotejadores de 0 h a 300 h de uso do EET. Ressalta-se que os valores médios em 400 e 500 h não apresentaram diferenças estatísticas significativas, e que em 600 h de uso, a vazão dos gotejadores se diferiram estatisticamente, ou seja, ocorreu redução da vazão média dos gotejadores não autocompensantes a partir deste tempo de uso. Estudando o entupimento de gotejadores utilizando água com alto teor de cálcio e magnésio, Mélo (2007) observou que a vazão relativa foi e 87,05% a 95,94% após 360 h.

Utilizando a classificação de qualidade da água (Tabela 3) proposta por Nakayama e Bucks (1986) para determinar o risco de obstrução dos emissores, verifica-se que com a análise química do EET (Tabela 5) pode-se encontrar restrição de ligeira a moderada no uso do efluente, devido aos valores de pH e ferro, o que pode ter ocasionado a redução da vazão em alguns gotejadores não autocompensantes, prejudicando a sua eficiência.

4.3 Coeficiente de variação de vazão (CVQ)

4.3.1 Coeficiente de variação de vazão para gotejadores autocompensantes

Ocorreu aumento do CVQ em todos modelos de gotejadores estudados, quando comparado o início e o final do experimento (Figura 10). Essa variação ocorreu de forma e intensidade diferentes para cada modelo, destacando-se o modelo G1 como aquele que ocorreu a menor variação do CVQ no final do período de 600 horas. No tempo de 600 h o modelo G1 apresentou CVQ de 2,19% seguido do gotejador G4, com 4,86%, o qual teve como característica dois picos de elevação, a 400 e 600 horas

de funcionamento, nos demais tempos sempre esteve próximo ao modelo G1, em torno de 2,00%.

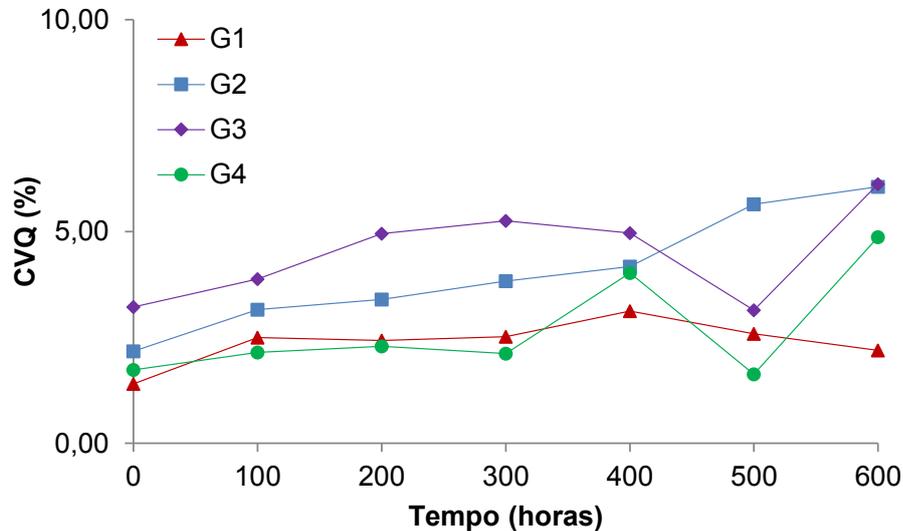


Figura 10. Coeficiente de variação de vazão (CVQ) de quatro modelos de gotejadores autocompensantes utilizando EET como água de irrigação em função do tempo de uso.

Os gotejadores G2 e G3 apresentaram no final do experimento CVQ de 6,05 e 6,12%, respectivamente. De acordo com a norma NBR ISO 9261 (ABNT, 2006) pode-se inferir que os quatro modelos de gotejadores avaliados neste trabalho podem ser considerados de ótima qualidade do ponto de vista do processo de fabricação.

Estudando o efeito do efluente de esgoto em seis modelos de gotejadores, Li, Chen e Li (2009) observaram que há gotejadores mais suscetíveis ao entupimento, principalmente os que possuem menor área do orifício e maior CVQ.

De acordo com o critério de sensibilidade dos emissores à redução de vazão (Tabela 6), proposto por Barros et al. (2009), o gotejador G2 caracteriza-se como sensível a partir de 500 horas de funcionamento, já o gotejador G3 a partir de 600 horas de funcionamento, ou seja, até 400 horas não apresentaram sensibilidade a redução da vazão. Ainda baseado na Tabela 6, verifica-se que apenas o gotejador G3 apresentou variação da Q_r superior a 10% e o CVQ superior a 5,50%, caracterizando-se como sensível a redução de vazão. Apesar de não apresentar elevada variação da Q_r , o gotejador G2 apresentou CVQ de 6,05% no final do experimento, ou seja,

também classificado como sensível. De maneira diferente, os gotejadores G1 e G4, não são considerados sensíveis à redução de vazão até o tempo estudado, em vista que, apresentaram CVQ inferiores a 5,5% em todas as avaliações, e encerraram o experimento em 600 horas com 2,19 e 4,86%, respectivamente,

Resultados semelhantes foram obtidos por Batista et al. (2012) que ao avaliarem um sistema de irrigação por gotejamento, com três modelos de emissores, aplicando água residuária de suinocultura tratada, verificaram que não ocorreram diferenças em duas subunidades (modelos) em relação ao CVQ ao longo do tempo. Porém, concluíram, também, que os gotejadores de maior vazão e menor comprimento de labirinto são menos suscetíveis ao entupimento, o que não se assemelhou ao ensaio deste trabalho, em vista que, os gotejadores com menores vazões apresentaram menores CVQ.

4.3.2 Coeficiente de variação de vazão para gotejadores não autocompensantes

Ocorreu aumento do CVQ em cinco modelos de gotejadores não autocompensantes, entretanto, com intensidades diferentes (Figura 11). Apenas o gotejador E2 apresentou menor CVQ no final do experimento (5,24%) quando comparado com o início do experimento (6,12%).

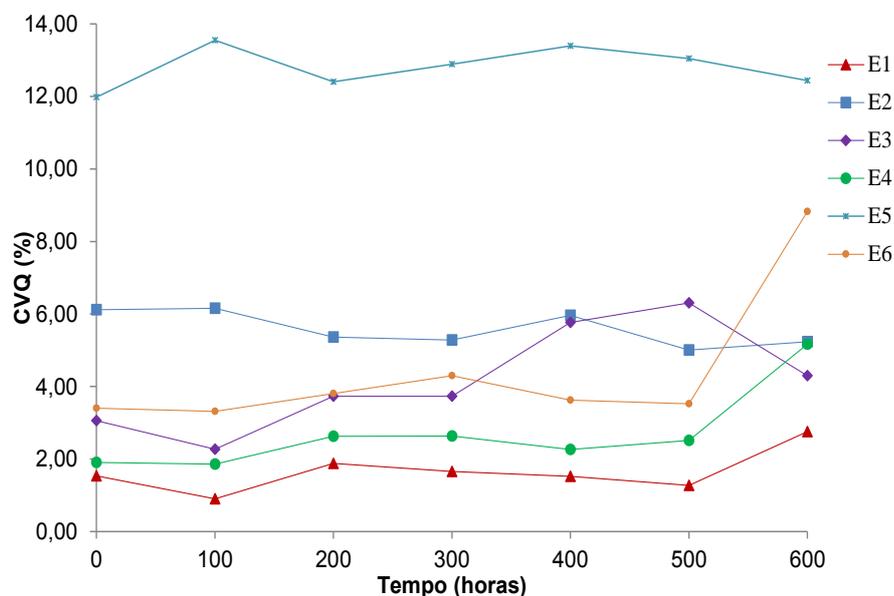


Figura 11. Coeficiente de variação de vazão (CVQ) de seis modelos de gotejadores não autocompensantes utilizando EET como água de irrigação em função do tempo de uso.

O gotejador E5 apresentou CVQ superior a 12% em todas as avaliações realizadas, encerrando em 600 h com 12,44%. A partir da norma ABNT ISO 9261:2006 verifica-se que o gotejador E5 apresentou valores superiores a 7% (limite máximo considerado pela norma), sendo caracterizado como média qualidade no ponto de vista de fabricação. Já, o gotejador E6 apresentou valor superior a 7% apenas na avaliação de 600 h, quando obteve CVQ de 8,83%, portanto o uso do EET afeta a variação de vazão entre os emissores a partir de 600 h de uso.

De acordo com o critério de sensibilidade dos emissores à redução de vazão (Tabela 3), proposto por Barros et al. (2009), o gotejador E5 caracteriza-se como sensível durante todo o período estudado, já o gotejador E6 a partir de 600 h de funcionamento apresenta sensibilidade a redução da vazão.

O gotejador E1 destacou-se com o menor CVQ em todas as avaliações realizadas, encerrando o experimento com 2,76%. O gotejador E2 sempre apresentou valores entre 5 e 6%, porém em 600 h não caracterizou como sensível a redução de vazão. Os gotejadores E3 e E4, apesar de sempre apresentarem valores inferiores a 5,5% (limite máximo segundo Barros et al., 2009), apresentaram aumento gradativo de seus CVQ com o aumento das horas de funcionamento, encerrando o experimento com 5,24 e 4,30%, respectivamente. Portanto, esses gotejadores são caracterizados com ótima qualidade do processo de fabricação, segundo a norma ISO 9261:2004, por apresentarem valores inferiores a 7%.

4.4 Grau de entupimento (GE)

4.4.1 Grau de entupimento para gotejadores autocompensantes

São apresentados na Figura 12 os graus de entupimento (GE) dos gotejadores em função do tempo de funcionamento. Para valores positivos ocorreram reduções na vazão dos emissores, e para valores negativos ocorreram aumento.

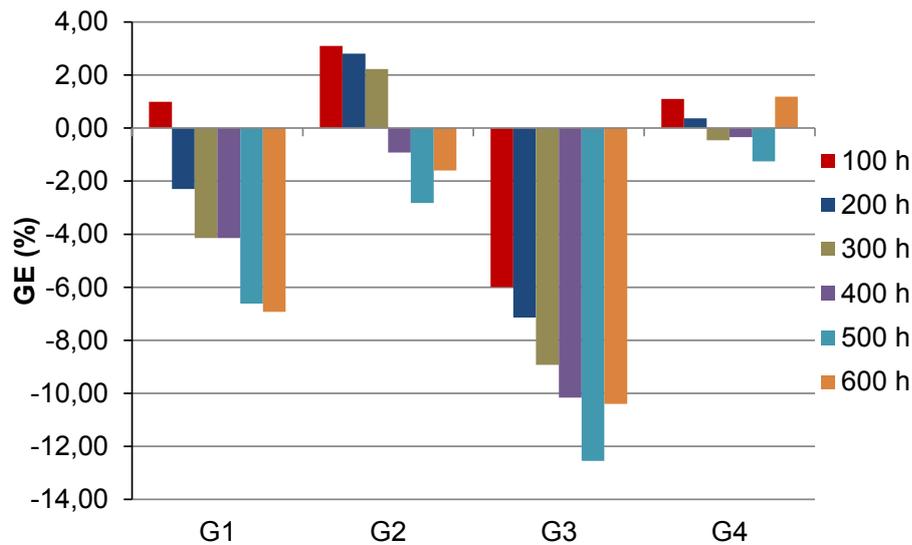


Figura 12. Grau de entupimento (GE) de quatro modelos de gotejadores autocompensantes utilizando EET como água de irrigação em função do tempo de uso.

O efeito do uso do efluente de esgoto tratado afeta a vazão dos emissores, sendo que em três deles (G1, G2 e G3) ocorreram aumento das vazões dos gotejadores e apenas no gotejador G4 ocorreu redução na vazão (Figura 12). Utilizando o índice proposto por Morata et al. (2014) verifica-se que apenas o gotejador G4 apresenta baixa severidade ao entupimento.

Nos reservatórios de águas residuárias desenvolve-se grande variedade de fitoplânctons e zooplânctons, algas e bactérias, que podem se aglomerar com partículas sólidas em suspensão na água e ainda com mucilagens resultantes das atividades microbiológicas de outros organismos (CAPRA; SCICOLONE, 2007), ocasionando problemas na vazão dos tubos gotejadores. Provavelmente a presença de sólidos, substâncias químicas (como ferro e sódio) e microrganismos podem ter interferido na membrana de compensação dos gotejadores e, conseqüentemente, ocasionado alteração na sua vazão. Segundo Ravina et al. (1992), todos os gotejadores são vulneráveis a obstrução pelo crescimento biológico, pois, geralmente possuem passagens estreitas e aberturas pequenas, que variam de 0,5 a 1,5 mm.

Ao estudarem o desempenho de gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água, Ribeiro et al. (2012) verificaram que os modelos de gotejadores autocompensantes apresentaram desempenho variável quanto à suscetibilidade ao

entupimento, desde modelos com excelente desempenho a modelos de baixo desempenho (redução de vazão inaceitável ou imprópria para sistemas de irrigação). Tal variação operacional dos emissores está correlacionada com a arquitetura de cada gotejador: comprimento, formato e dimensões. Portanto, o efeito das características de cada modelo, a presença de substâncias químicas e o favorecimento da ocorrência de formação do biofilme pode justificar os efeitos do uso do EET nos gotejadores estudados.

4.4.2 Grau de entupimento para gotejadores não autocompensantes

São apresentados na Figura 13 os graus de entupimento (GE) dos gotejadores em função do tempo de funcionamento. Verifica-se que apenas o gotejador E2 não apresentou entupimento, mas sim aumento da sua vazão, em todas as avaliações realizadas, caracterizando como melhor desempenho entre os modelos de gotejadores não autocompensantes estudados.

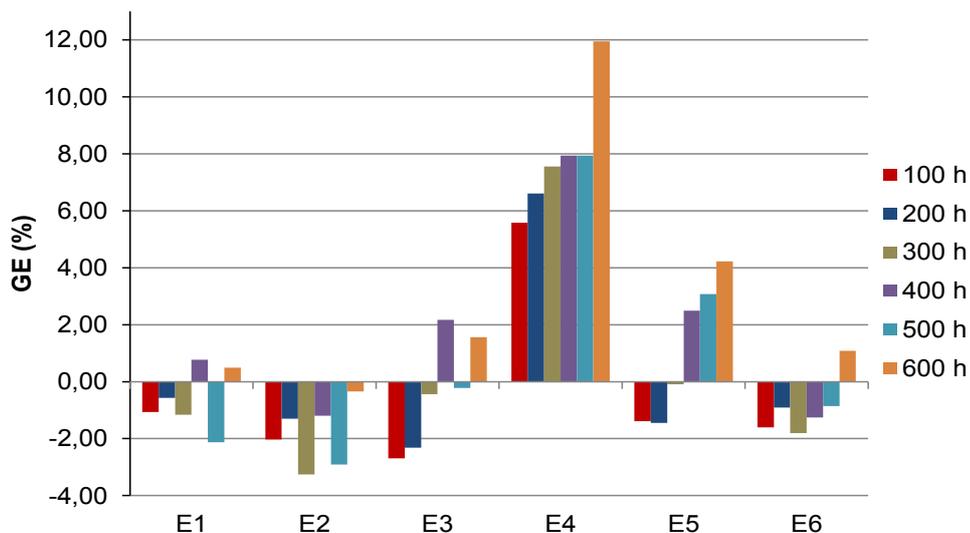


Figura 13. Grau de entupimento (GE) de seis modelos de gotejadores não autocompensantes utilizando EET como água de irrigação em função do tempo de uso.

Os gotejadores E1, E3 e E6 apresentaram obstrução a partir de 600 horas de funcionamento com grau de entupimento de 0,49, 1,56 e 1,09%, respectivamente.

Foram caracterizados com baixa severidade ao entupimento no término do experimento, segundo Morata et al. (2014).

O gotejador E5 apresentou entupimento a partir de 400 horas de uso do EET aumentando de maneira linear até as 600 h, quando encerrou o experimento, com grau de entupimento de 4,22%, sendo classificado com baixa severidade ao entupimento (MORATA et al., 2014). Já o gotejador E4 mostrou-se suscetível ao entupimento já a partir da segunda avaliação (100 h), quando apresentou entupimento de 5,58% e aumento até o fim do experimento, encerrando-o com 11,95%, caracterizando-se com média severidade ao entupimento (Morata et al., 2014) e com desempenho inferior a todos os modelos de gotejadores não autocompensantes estudados.

5. CONCLUSÃO

1. Os dez gotejadores avaliados apresentaram média a boa uniformidade em função do coeficiente de variação de fabricação (CVf).

2. Os seis gotejadores não autocompensantes avaliados foram classificados como de regime turbulento, com excelentes coeficientes de determinação.

3. O tempo de uso dos gotejadores usando efluente de esgoto tratado (EET) afeta o coeficiente de variação de vazão dos dez modelos de modo e intensidade diferentes.

4. A vazão relativa apresentou diferenças significativas entre os modelos de gotejadores estudados, sendo, no entanto, pouco suscetíveis ao entupimento com uso de EET os gotejadores autocompensantes, e mais suscetíveis os gotejadores não autocompensantes.

5. Comparando-se os quatro modelos de gotejadores autocompensantes estudados, o modelo G4 destaca-se perante os demais, pois apresentou vazão relativa igual a 99,92%, coeficiente de variação de vazão igual a 2,69% e grau de entupimento igual a 1,19%, não sendo sensível a redução da vazão em relação ao tempo e apresentando baixo grau de entupimento.

6. Entre os seis modelos de gotejadores não autocompensantes, destaca-se positivamente o modelo E1, apresentando vazão relativa igual a 100,52%, coeficiente de variação igual a 2,76% e grau de entupimento igual a 0,49%, já o modelo E4 com desempenho inferior entre os modelos não autocompensantes, com vazão relativa igual a 93,20%, coeficiente de variação de vazão igual a 5,17% e grau de entupimento igual a 11,95%.

6. REFERÊNCIAS

ABDELLAH, A. R.; ASHBOLT, N. J. Innovative production treatment hydroponic farm for primary municipal sewage utilization. **Water Resource**, Washington, v. 34, n. 3, p. 825 - 834, 2000.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 9261: **Equipamentos de irrigação agrícola**. Emissores e tubos emissores. Especificação e métodos de ensaio. São Paulo: ABNT, 2006.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. PNBR 12:02-08-022: **Requisitos mínimos para elaboração de projetos de irrigação localizada**. São Paulo: ABNT, 1986.

ABREU, J. M. H.; LOPEZ, J. R.; REGALADO, A. P.; HERNANDEZ, J. F. G. **El riego localizado**. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrárias, 1987. 317 p.

AIROLDI, R. P. S. **Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária**. 2007. 140 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ANDRADE, L. **Avaliação hidráulica e de resistência a tração de dois modelos de mangueiras gotejadoras**. 2005. 76 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.

AUGUSTO, L. G. S.; GURGEL, I. G. D.; CÂMARA NETO, H. F.; MELO, C. H.; COSTA, A. M. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1511-1522, 2012.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1994. 97 p.

AZEVEDO, H. M. **Irrigação Localizada**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, n. 139, 1986. p. 40-53.

BARROS, A. C.; COELHO, R. D.; MEDEIROS, P. R. F.; MELO, R. F.; BARBOZA JÚNIOR, R. A.; DIAS, C. T. S. Entupimento de gotejadores em função da aplicação de superfosfato simples e ácido nítrico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 62 - 71, 2009.

BATISTA, R. O.; SILVA, K. B.; OLIVEIRA, R. A.; FILHO, S. B.; DIAS, N. S. Desempenho hidráulico de sistema de irrigação por gotejamento aplicando água residuária de suinocultura. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 8, n. 3, p. 105 - 111, 2012.

BATISTA, R. O.; OLIVEIRA, R. A.; SANTOS, D. B.; OLIVEIRA, A. F. M.; AZEVEDO, C. A. V.; MEDEIROS, S. S. Obstrução e uniformidade de aplicação em sistemas de irrigação por gotejamento aplicando-se efluente da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n.7, p. 698 – 705, 2013.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. p. 483-548.

BLUM, J. R. C. **Critérios e padrões de qualidade da água**. In: MANCUSO, P. S. S.; SANTOS, H. F. dos. Reúso de água; ABES. São Paulo, 2002. Cap. 5.

BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R. G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 2, n. 2, p.149-162, 1979.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. **Journal of Cleaner Production**, London, v. 15, n. 16, p. 1529 - 1534, 2007.

CARARO, D. C.; BOTREL, T. A.; HILLS, D. J.; LEVERENZ, H. L. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 22, p. 251- 257, 2006.

CARVALHO, L. C. C.; COELHO, R. D.; TEIXEIRA, M. B.; CUNHA, F. N.; SILVA, N. F. Comportamento de gotejadores submetidos aplicação de ferro solúvel, sólidos em suspensão e fitoplâncton. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n. 6, p. 538 - 547, 2014.

COELHO, R. D.; TEIXEIRA, M. B.; RIBEIRO, P. H. P.; CARVALHO, L. C. C.; CUNHA, F. N.; SILVA, N. F. Distúrbios de vazão em gotejadores devido o uso de água com presença de ferro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n. 3, p. 234 - 246, 2014.

CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, N. F.; MOURA, L. M. F.; TEIXEIRA, M. B.; GOMES FILHO, R. R. Variabilidade temporal da uniformidade de distribuição em sistema de gotejamento. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 4, p. 248 - 257, 2013.

DAZHUANG, Y.; ZHIHUI, B.; ROWAN, M.; LIKUN, G.; SHUMEI, R.; PEILING, Y. Biofilm structure and its influence on clogging in drip irrigation emitters distributing reclaimed wastewater. **Journal of Environmental Sciences**, Beijing, v. 21, p. 834 - 841, 2009.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T. Qualidade da água para irrigação na microbacia do Coqueiro, Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.9, p.382- 385, 2009.

FRIZZONE, J. A; LOURENÇO, P. S.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação, gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 365 p.

GARCIA, C. J. B. **Avaliação técnica de tubos emissores para irrigação localizada**. 2006. 63 f Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2006.

HESPANHOL, I. **Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquíferos**. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. dos. (Ed.). **Reuso de Água**. São Paulo: Manole, 2003. p. 37-95.

HOLANDA FILHO, R. S. F.; PORTO FILHO, F. Q.; MIRANDA, N. O.; MEDEIROS, J. F. Caracterização hidráulica do microaspersor Rondo, da Plastro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, 2001.

HOWELL, T. A. et al. **Design and operation of trickle (drip) systems**. In: JENSEN, M. E. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems**. Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1983. p. 661-717.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 2, p. 678-684, 1974.

LI, J.; CHEN, L.; LI, Y. Comparison of clogging in drip emitters during application of sewage effluent and ground water. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 52, n. 4. p. 1203 - 1211, 2009.

LIMA, S. M. S.; HENRIQUE, I. N.; CEBALLOS, B. S. O.; SOUSA, J. T.; ARAÚJO, H. W. C. Qualidade sanitária e produção de alface irrigada com esgoto doméstico tratado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, supl., p. 21 - 25, 2005.

LIU, H.; HUANG, G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 745-756, 2009.

LOPEZ, R. J.; ABREU, J. M. H.; REGALADO, A. P.; HERNANDEZ, J. F. G. **Riego localizado**. 2 ed. Madrid: Ediciones Mundi Prensa, 1997. 405 p.

MÉLO, R. F. **Dinâmica e controle do entupimento de gotejadores em função de precipitados químicos e fitoplâncton**. 2007. 189 p. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MONTES, C. R.; KATO, M. T.; SOUZA, M. A. A. de; CORUCCI FILHO, B.; MARQUES JÚNIOR, J. **Irrigação com esgotos tratados: impactos no solo e aquíferos**. In: SANTOS, M. L. F. dos (Coord.). Tratamento e utilização de esgotos sanitários. Rio de Janeiro: ABES, 427 p. 2006.

MORATA, G. T.; DANTAS, G. F.; DALRI, A. B.; PALARETTI, L. F.; FARIA, R. T.; SANTOS, G. O. Entupimento de gotejadores com uso de efluente de esgoto tratado sob dois sistemas de filtragem. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n. 2, p. 86 - 97, 2014.

NAJAFI, P.; TABATABAEI, S. H.; ASGARI, K. Evaluation of filtration and SDI application effects on treated wastewater quality index. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, p. 1250-1255, 2010.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. **Trickle irrigation of crop**. Productions design, operation and management. Amsterdam: Elsevier, 1986. 383 p.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. **Irrigation Science**, New York, v. 12, p. 187-192, 1991.

OLIVEIRA, E. L. (Org.). **Manual de Utilização de Águas Residuárias em Irrigação**. Botucatu: FEPAF, 2012. 192 p.

PESCOD, M. B. **Wastewater treatment and use in agriculture**. Rome: FAO, 1992. p. 125, (Irrigation and Drainage Paper, 47).

PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; ELBANA, M.; DURANROS, M.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R.; LAMM, F. R. Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 883 - 891, 2010.

PITTS, D. J.; HAMAN, D. Z.; SMAJSTRALA, A. G. **Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems**, University of Florida, Florida Cooperative Extension Service, University of Florida, April 1990, Bulletin 258, p. 12.

PIZARRO CABELO, F. **Riegos localizados de alta frequência**. 3. ed., Bilbao. 1996. 513 p.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, New York, v. 13, p. 129 - 139, 1992.

RAV-ACHA, C.; KUMMEL, M.; SALAMON, I.; ADIN, A. The effect of chemical oxidants on effluent constituents for drip irrigation. **Water Research**, London, v. 29, n. 1, p. 119-129, 1995.

RIBEIRO, P. A. A.; COELHO, R. D.; TEIXEIRA, M. B. Entupimento de tubos gotejadores convencionais com aplicação de cloreto de potássio (branco e vermelho) via duas qualidades de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 279 - 287, 2010.

RIBEIRO, P. A. A.; TEIXEIRA, M. B.; COELHO, R. D.; FRANCO, E. M.; SILVA, N. F.; CARVALHO, L. C. C.; ALVES, M. E. B. Gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. **Irriga**, Botucatu, Ed. Especial, p. 368 - 379, 2012.

SANTOS, M. L. F.; AISSE, M. M.; BASTOS, R. K. X.; PIVELI, R. P. Utilização de Esgotos Sanitários - Marcos Conceituais e Regulatórios. In: SANTOS, M. L. F. (Org.). **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. Petrópolis: Sermograf Artes Gráficas e Editora Ltda, 2006, v. 1, p. 1-15.

SCALOPPI, E. J. Características dos principais sistemas de irrigação. **ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 25, p. 22-27, 1986.

SCHIMIDT, A. P. R. A. **Efeito da espessura da parede no desempenho hidráulico de mangueiras gotejadoras**. 2014. 47 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2014.

SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 22, n.5, p. 1034-1038, 1979.

SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Embrapa: Informação Tecnológica, Brasília, 2011, 771p.

TAJRISHY, M.; HILLS, D. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 120, n. 4, p. 716-731, 1994.

TAYLOR, H. D.; BASTOS, R. K. X.; PEARSON, H. W.; MARA, D. D. Drip irrigation with waste stabilization pond effluents: solving the problem of emitter fouling. **Water Science Technology**, London, v. 31, n. 12. p. 417-424. 1995.

TEIXEIRA, M. B. **Efeitos de dosagens extremas de cloro e pH na vazão de gotejadores autocompensantes (irrigação localizada)**. 2006. 322 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

VERMEIREN, F. S.; JOBLING, G. A. **Localized irrigation design, installation, operation, evaluation**. FAO: Rome, 1994. 203p. (FAO Irrigation and Drainage, Paper 36).

VON BERNUTH, R; SOLOMON, K. H. **Emitter construction**. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Trickle irrigation for crop production. Phoenix: Elsevier Science, 1986. cap. 2, p. 27-52.