

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROCESSO DE LAVAGEM ULTRASSÔNICA NA
DESOBSTRUÇÃO DE GOTEJADORES DE IRRIGAÇÃO
LOCALIZADA**

MAYCON DIEGO RIBEIRO

CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO DE 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROCESSO DE LAVAGEM ULTRASSÔNICA NA
DESOBSTRUÇÃO DE GOTEJADORES DE IRRIGAÇÃO
LOCALIZADA**

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

MAYCON DIEGO RIBEIRO

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo

Co-Orientador: Prof. Dr. Delfran Batista dos Santos

CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO DE 2016



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

MAYCON DIEGO RIBEIRO

**PROCESSO DE LAVAGEM ULTRASSÔNICA NA DESOBSTRUÇÃO DE
GOTEJADORES DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA**

APROVADA: 22 de fevereiro de 2016

BANCA EXAMINADORA

Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo
Orientador - UAEA/UFCA

Dr. Delfran Batista dos Santos
Co-Orientador - IFBAIANO

Dr. Salomão de Sousa Medeiros
Examinador - INSA

Dr. Ignacio Hernán Salcedo
Examinador - INSA

Dr^a. Márcia Rejane de Queiroz Almeida Azevedo
Examinadora - CCA/UFPB

Dr^a. Vera Lucia Antunes de Lima
Examinadora - CCA/UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico àquele que sempre foi inspiração de vida; aquele que, mesmo na sua ausência, sempre me ensinou algo, aquele que jamais desanimava e sempre via algo positivo nas mais problemáticas situações; aquele que simplesmente vivia a vida com sua eterna companheira felicidade e me ensinou a viver assim; a meu avô Benedito Ribeiro (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por tudo que Ele me proporciona.

À Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade da realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa sob a Chamada MEC/SETEC/CNPq N ° 94/2013.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo, pela orientação, apoio e pelo acolhimento junto à instituição para a realização do curso.

Ao Prof. Dr. Delfran Batista dos Santos pela orientação, apoio, incentivo, paciência e acolhimento para a realização do curso.

Ao Prof. Dr. Ignacio Hernán Salcedo, pela criação da ideia de usar o processo de lavagem ultrassônica para desobstrução de gotejadores, a qual originou o nosso projeto.

Ao Dr. Salomão de Sousa Medeiros e demais professores já mencionados pelas correções e sugestões na qualificação do trabalho.

Ao Prof. Rafael de Oliveira Batista, pelo auxílio e consultoria das partes fundamentais do trabalho.

À coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade da realização do Curso, estendendo-se à Coordenadora Prof^(a). Dr^(a). Vera Lucia Antunes de Lima, e secretários Dona Cida, Seu Gilson e Isaías.

Ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano (IF Baiano) e à Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) pelo apoio intelectual e material.

Aos meus amigos Marcio Roberto Klein, Flavio Daniel Szekut e Claudia Facini dos Reis que, com certeza, me ajudaram a ser uma pessoa e um profissional melhor, participando diariamente da minha vida.

Aos amigos que acompanharam o desenvolvimento da pesquisa e estiveram comigo grande parte do tempo Allan Radax Freitas Campos, Daniel Cavalcanti Feitosa e Floriano Suszek.

A Valquíria de Moraes Silva que nestes últimos momentos do doutorado, vem me incentivando e me apoiando.

A minha família que, mesmo de longe nunca deixaram de me apoiar em todas as minhas escolhas e me deram a oportunidade de ir em busca dos meus objetivos; minha mãe Terezinha de F. M. Machado Ribeiro, meu pai Milton Ribeiro, minha irmã Luana Tainara Ribeiro, meus avós Benedito Ribeiro (*in memoriam*) Ordalina Ribeiro, Tios Nilton Ribeiro, Terezinha Tironi e Ari Tironi.

A todos os funcionários do INSA, da UFCG e aqueles que, direta ou indiretamente auxiliaram, para a realização desta pesquisa. Muito Obrigado.

SUMÁRIO

INDICE DE FIGURAS	9
INDICE DE TABELAS	12
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESE	2
3. OBJETIVOS.....	3
3.1. Objetivo Geral	3
3.2. Objetivos Específicos	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1. Irrigação localizada.....	5
4.2. Qualidade de água para irrigação localizada	6
4.2.1. Água residuária de esgoto doméstico	8
4.2.2. Água com sais.....	11
4.3. Obstrução de gotejadores de irrigação localizada	14
4.3.1. Obstrução com água residuária.....	14
4.3.2. Obstrução físico-química.....	16
4.4. Desobstrução de gotejadores de irrigação localizada.....	17
4.5. Equipamento de ultrassom	20
5. MATERIAL E MÉTODOS	22
5.1. Construção e caracterização do experimento	22
5.1.1. Localização do experimento.....	22
5.1.2. Construção da bancada de ensaios.....	23
5.1.3. Descrição dos experimentos	25
5.1.3.1. Experimento 1: Obstrução e desobstrução com o sistema operando com água residuária.....	25

5.1.3.2.	Experimento 2: Obstrução e desobstrução com o sistema operando com água com cálcio	27
5.1.4.	Características dos gotejadores testados.....	29
5.1.5.	Qualidade da água de irrigação	31
5.1.5.1.	Análises microbiológicas	32
5.1.5.2.	Análises físico-químicas	32
5.1.6.	Análises do material obstruidor dos gotejadores por meio de microscopia óptica e da microscopia eletrônica de varredura - MEV	33
5.1.6.1.	Identificação taxonômica do material obstruidor por microscopia óptica... 33	
5.1.6.2.	Análises do material obstruidor por imagens do MEV.....	34
5.2.	Obstrução dos gotejadores.....	34
5.3.	Desobstrução dos gotejadores	41
5.3.1.	Desobstrução pelo processo de lavagem ultrassônica	42
5.3.2.	Desobstrução com acidificação	43
5.3.3.	Desobstrução com cloração	43
5.3.4.	Desobstrução com acidificação+lavagem ultrassônica	44
5.3.5.	Desobstrução com cloração+lavagem ultrassônica	45
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
6.1.	Caracterização dos parâmetros do experimento	46
6.1.1.	Caracterização das diferentes qualidades de água.....	46
6.1.2.	Caracterização inicial dos gotejadores novos.....	49
6.2.	Obstrução dos gotejadores.....	50
6.2.1.	Monitoramento da obstrução dos gotejadores	50
6.2.2.	Identificação microbiológica do material aderido às paredes dos gotejadores por microscopia óptica	57
6.2.3.	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do material obstruidor aderido aos gotejadores.....	62
6.3.	Desobstrução dos gotejadores	67
6.3.1.	Desobstrução dos gotejadores obstruídos com água residuária (AR)	67

6.3.1.1.	Desobstrução dos gotejadores obstruídos com água residuária (AR) em função dos tratamentos.....	67
6.3.1.2.	Desobstrução dos gotejadores obstruídos com água residuária em função do tempo de tratamento	72
6.3.2.	Desobstrução dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio	79
6.3.2.1.	Desobstrução dos gotejadores com água com elevado teor de cálcio em função dos tratamentos.....	79
6.3.2.2.	Desobstrução dos gotejadores com elevado teor de cálcio em função dos tempos de tratamentos.....	84
6.3.2.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das paredes do labirinto dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio após o tratamento de lavagem ultrassônica	91
7.	CONCLUSÃO	93
8.	RECOMENDAÇÕES	94
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Processo de ação de limpeza da lavagem ultrassônica: A) inibição da camada saturada e remoção mecânica do contaminante pela cavitação; B) substrato com contaminantes inertes ao banho químico sendo removidos pela cavitação (Adaptado de PEREIRA, 2010).....	21
Figura 2. Localização do experimento no campo experimental da sede do Instituto Nacional do Semiárido: (A) bancada de ensaios, (B) vista do INSA, Campina Grande, PB, Brasil	23
Figura 3. Layout da bancada de ensaios, com os detalhes e componentes. (desenho: F. D. Szekut)	24
Figura 4. Divisão das seções de controle das linhas laterais da bancada de ensaios, seções 1 e 3 para monitoramento e individualização dos tratamentos, seção 2 para operação do sistema	25
Figura 5. Divisão dos gotejadores na bancada de ensaios em dois grupos na fase de obstrução operando com água residuária (Grupo 1) e água de abastecimento (Grupo 2).....	26
Figura 6. Divisão dos gotejadores na bancada de ensaios da fase de desobstrução do experimento 1	27
Figura 7. Divisão dos gotejadores na bancada de ensaios em dois grupos na fase de obstrução operando com água com cálcio (experimento 2)	28
Figura 8. Divisão dos gotejadores na bancada de ensaios da fase de desobstrução do experimento 2	29
Figura 9. Curvas característica dos gotejadores operando com água residuária de esgoto doméstico tratado, água de abastecimento e a curva calculada pela equação de catálogo do fabricante, para os gotejadores Streamline (A) Tal drip (B) e Tiran (C).31	
Figura 10. Placa de poliestireno com encaixe para 15 copos coletores de volume para coleta simultânea	37
Figura 11. Monitoramento microbiológico do número de Coliformes Totais e <i>Escherichia Coli</i> durante a operação do experimento com água residuária.	48
Figura 12. Coeficiente de variação(CV) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) no monitoramento dos gotejadores Tal drip (A), Streamline (B) e Tiran (C) durante o tempo de funcionamento com água de abastecimento.	51
Figura 13. Coeficiente de variação(CV) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) no monitoramento dos gotejadores Tal drip (A), Streamline (B) e Tiran (C) durante o tempo de funcionamento com água residuária	53
Figura 14. Coeficiente de variação(CV) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) no monitoramento dos gotejadores Tal drip (A), Streamline (B) e Tiran (C) durante o tempo de funcionamento com água com teor elevado de cálcio	54

- Figura 15. Monitoramento do grau de entupimento (GE) e da vazão dos gotejadores Streamline, Tiran e Taldrip funcionando com água de abastecimento (A e B), água residuária (C e D) e água com teor elevado de cálcio (E e F), durante 1200 horas. 56
- Figura 16. Identificação dos principais componentes microbiológicos existentes no material do interior dos gotejadores funcionando com água de abastecimento: (A) Diatomáceas sugestivo de *Gomphonema sp.*; (B) *Coliformes fecais*; (C) Alga clorofilada sugestivo de *Espirogira sp.*; (D) Reprodução assexuada do tipo duplicação em bactéria de forma bacilar; (E) Sugestivo de ovo de *Ascaris lumbricoides*; (F) Formação de biofilme; (G) Sugestivo de bactérias de formas cocos; (H) Colônia de *Microcystis aeruginosa*. 58
- Figura 17. Identificação dos principais componentes microbiológicos existentes no material do interior dos gotejadores funcionando com água residuária: (A) Colônia de *Microcystis aeruginosa*; (B) Diatomáceas sugestivo de *Gomphonema sp.*; (C) Alga clorofilada sugestivo de *Espirogira sp.*; (D) Ovo de *Ascaris lumbricoides*; (E) e reprodução assexuada do tipo duplicação em bactéria de forma bacilar; (F) Alga clorofilada sugestivo de Dinoflagelada; (G) Bactéria de forma cocos; (H) *Coliformes fecais*; (I) Formação de biofilme 60
- Figura 18. Identificação dos principais componentes microbiológicos existentes no material do interior dos gotejadores funcionando com da água com elevado teor de cálcio: A) *Coliformes fecais*; B) Sugestivo de ovo de Helminhos; C) *Microcystis aeruginosa*; D) Sugestivo de Dinoflagelada e; (E) Ácaro 61
- Figura 19. Imagens realizadas pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do material aderido às paredes do labirinto dos gotejadores Streamline (A, B e C) Taldrip (D, E e F) e Tiran; (G, H e I) com aumento de 40x funcionando com água de abastecimento (A, D e G) e água residuária (B, E e H), e com aumento de 70x funcionando com água com elevado teor de cálcio (C, F e I) 63
- Figura 20. Detalhes do material obstruídor na parede do gotejador Streamline funcionando com água com elevado teor de cálcio, aumentado 150x (A) 300x (B) e 500x (C).. 66
- Figura 21. Redução do grau de entupimento (GE) dos gotejadores Taldrip (A), Streamline (B) e Tiran (C) obstruídos com água residuária para os tratamentos de desobstrução: acidificação, cloração, lavagem ultrassônica (LU), acidificação+lavagem ultrassônica e cloração+lavagem ultrassônica 68
- Figura 22. Boxplot dos dados de grau de entupimento (GE) dos tratamentos de ácido (A) cloro (C) lavagem ultrassônica (LU) ácido + lavagem ultrassônica (A+LU) e cloro + lavagem ultrassônica (C+LU) para os gotejadores Taldrip, Streamline e Tiran obstruídos com água residuária 71
- Figura 23. Grau de entupimento (GE) e vazão dos gotejadores diante dos tempos de tratamentos de desobstrução de: A) acidificação; B) cloração; C) lavagem ultrassônica; D) acidificação+lavagem ultrassônica e; E) cloração+lavagem ultrassônica, funcionando com água residuária 78

- Figura 24. Redução do grau de entupimento (GE) dos gotejadores Taldrip (A) Steramline (B) e Tiran (C) obstruídos com água com elevado teor de cálcio para os tratamentos de desobstrução: acidificação, cloração, lavagem ultrassônica (LU), acidificação+lavagem ultrassônica e cloração+lavagem ultrassônica..... 80
- Figura 25. Boxplot dos dados de grau de entupimento (GE) dos tratamentos de ácido (A), cloro (C), lavagem ultrassônica (LU) ácido + lavagem ultrassônica (A+LU) e cloro + lavagem ultrassônica (C+LU) para os gotejadores Taldrip (A) Streamline (B) e Tiran (C) obstruídos com água com elevado teor de cálcio 83
- Figura 26. Grau de entupimento (GE) e vazão dos gotejadores para os tratamentos de desobstrução: (A) acidificação; B) cloração; C) lavagem ultrassônica; D) acidificação+lavagem ultrassônica e; E) cloração+lavagem ultrassônica, funcionando com água com elevado teor de cálcio..... 90
- Figura 27. Imagens das paredes dos labirintos dos gotejadores Streamline (A, B e C), Taldrip (D, E e F) e Tiran (G, H e I) após a obstrução com água residuária (A, D e G, aumentado 40x), água com elevado teor de cálcio (B, E e H aumentado 70x) e após o tratamento de lavagem ultrassônica dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio (C, F e I, aumentado 70x) 92

INDICE DE TABELAS

Tabela 1. Análises de laboratório necessárias para avaliar a água visando à irrigação.....	8
Tabela 2. Fatores que influenciam na escolha mais apropriada do sistema de irrigação funcionando com águas residuárias	11
Tabela 3. Principais sais com menor solubilidade encontrado nos solos e fontes de água de irrigação	17
Tabela 4. Características dos gotejadores utilizados nos ensaios de obstrução e desobstrução	30
Tabela 5. Classificação do sistema de irrigação por gotejamento de acordo com o coeficiente de variação dos gotejadores segundo ASABE (2008)	38
Tabela 6. Classificação do sistema de irrigação de acordo com os valores do coeficiente de uniformidade de distribuição, segundo ASABE (1996)	39
Tabela 7. Classificação do sistema de irrigação de acordo com os valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen, segundo Bernardo <i>et al.</i> (2006)	39
Tabela 8. Classificação do sistema de irrigação de acordo com os valores do coeficiente de uniformidade estatístico, segundo Favetta and Brotel (2001)	40
Tabela 9. Caracterização química das águas utilizadas no experimento	47
Tabela 10. Caracterização microbiológica das águas utilizada no experimento	47
Tabela 11. Caracterização hidráulica inicial dos gotejadores novos do experimento com água residuária de acordo com os tratamentos de desobstrução.....	49
Tabela 12. Caracterização hidráulica inicial dos gotejadores do experimento com água com elevado teor de cálcio de acordo com os tratamentos de desobstrução	50
Tabela 13. P-valor dos dados de grau de entupimento (GE) na comparação de médias dos tratamentos de desobstrução com nível de confiança de 95% dos gotejadores obstruídos com água residuária	69
Tabela 14. Comparação de médias do grau de entupimento (GE) em função dos tratamentos de desobstrução com ácido, cloro, lavagem ultrassônica, ácido + lavagem ultrassônica e cloro + lavagem ultrassônica pelo teste T a 5% de probabilidade dos gotejadores obstruídos com água residuária	69
Tabela 15. P-valor dos dados médios de aumento de vazão (Q+) após os diferentes tempos de aplicação em cada tratamento na comparação de médias com confiança de 95% nos gotejadores obstruídos com água residuária.	73
Tabela 16. Comparação de médias pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do aumento de vazão (Q+) em função do tempo de tratamento em cada modelo de gotejador obstruídos com água residuária	74

Tabela 17. Comparação de médias pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do aumento de vazão (Q+) em função do tempo e do tratamento em dos gotejadores obstruídos com água residuária	75
Tabela 18P-valor dos dados de grau de entupimento (GE) na comparação de médias dos tratamentos de desobstrução com nível de confiança de 95% dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio	81
Tabela 19. Comparação de médias do grau de entupimento (GE) em função dos tratamentos de desobstrução com ácido, cloro, lavagem ultrassônica, ácido + lavagem ultrassônica e cloro + lavagem ultrassônica pelo teste T a 5% de probabilidade dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio ...	82
Tabela 20. P-valor dos dados médios de aumento de vazão (Q+) após os diferentes tempos de aplicação em cada tratamento na comparação de médias com confiança de 95%, nos gotejadores ostruídos com água com elevado teor de cálcio	84
Tabela 21. Comparação de médias pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do aumento de vazão (Q+) em função do tempo de tratamento em cada modelo de gotejador obstruídos com com água com elevado teor de cálcio.....	85
Tabela 22. Comparação de médias pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade, do aumento de vazão (Q+) em função do tempo e do tratamento em cada modelo de gotejador obstruídos com água com elevado teor de cálcio	87

RESUMO

A obstrução é um dos principais problemas de irrigação localizada, podendo ser causada pela formação de biofilmes provindos de águas residuárias e precipitados químicos de águas com excesso de carbonatos, principalmente o cálcio, porém o uso dessas águas se torna indispensável em regiões com escassez hídrica, como é o semiárido brasileiro. Assim o objetivo deste trabalho foi testar o tratamento de lavagem ultrassônica e compará-lo com os tratamentos de acidificação e cloração na desobstrução de gotejadores obstruídos com biofilme de esgoto doméstico tratado e precipitados químicos de cálcio. Foram realizados dois experimentos no Instituto Nacional do Semiárido (INSA) em Campina Grande, PB, um com água residuária e outro com água com teor elevado de cálcio. Foram utilizados três modelos de gotejadores. Os gotejadores funcionaram com cada tipo de água por 1200 horas, sendo obstruídos com biofilme da água residuária no experimento 1 e com precipitados químicos de cálcio no experimento 2. Os gotejadores foram submetidos a 5 tratamentos de desobstrução: lavagem ultrassônica; aplicação de ácido fosfórico; aplicação de cloro; aplicação de ácido+lavagem ultrassônica e aplicação de cloro+lavagem ultrassônica. Foram realizadas análises físico-químicas, microbiológicas da água e microscopia óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no material obstruidor. Os gotejadores foram avaliados no início do experimento, no final da fase de obstrução e durante os tratamentos de obstrução, calculando vazão (Q) e grau de entupimento (GE). Nos gotejadores obstruídos com água residuária os tratamentos de desobstrução mais eficientes foram à lavagem ultrassônica no gotejador Taldrip e Tiran, reduzindo o valor de GE para 4,0 e 33,6%, respectivamente, e o tratamento de cloro+lavagem ultrassônica no gotejador Streamline atingindo um GE de 2,4%. Após o tratamento de lavagem ultrassônica dos gotejadores obstruídos com precipitados químicos de cálcio, reduziram o GE para 0 e 7% para o Taldrip e Streamline, respectivamente. Na comparação do tempo em cada tratamento a lavagem ultrassônica em 30 e 60 minutos aumentou, respectivamente, a vazão em 0,46 e 0,47 Lh⁻¹ nos gotejadores obstruídos com água residuária, sendo estatisticamente os melhores tratamentos. O processo de lavagem ultrassônica é potencialmente um tratamento eficiente para desobstrução de gotejadores obstruídos com biofilme de água residuária e precipitados químicos de cálcio.

Palavras-chave: Obstrução de gotejadores, irrigação com água residuária, precipitado químico, entupimento de emissores.

ABSTRACT

Obstruction is one of the main problems of localized irrigation, which may be caused by stemmed biofilms formation of chemical residual and precipitated water from water with excess carbonates, especially calcium, but the use of these waters is indispensable in areas with water scarcity, as is the Brazilian semiarid region. So the aim of this study was to test the treatment of ultrasonic washing and compare it with the treatments of acidification and chlorination in unclogging of drippers clogged with treated domestic sewage biofilm and chemical calcium precipitates. Two experiments were conducted at the National Institute for Semi-Arid (INSA) in Campina Grande, PB, with wastewater and other water with high calcium content. Three models were used drippers. The drippers worked with every type of water by 1200 hours, clogged with biofilm of wastewaters in experiment 1 and chemical precipitates of calcium in the experiment 2. The drippers were submitted to 5 unblocking treatments: ultrasonic washing; applying phosphoric acid; chloro application; applying ultrasonic washing and acid + chlorine + applying ultrasonic washing. physical-chemical, microbiological analyzes were carried out of the water and light microscopy and scanning electron microscopy (SEM) in obstruídor material. The drippers were evaluated at baseline, at the end of the obstruction stage and during the obstruction treatments, calculating flow rate (Q) and the degree of clogging (GE). In drippers clogged with waste water more efficient clearing treatments were the ultrasonic cleaning the dripper Taldrip Tiran and reducing the amount of EG to 4.0 and 33.6%, respectively, and the treatment of chlorine + ultrasonic cleaning in dripper Streamline reaching a dE of 2.4%. After treatment, ultrasonic cleaning of clogged with drippers chemical precipitates of calcium, GE reduced to 0 and 7% for Taldrip and Streamline, respectively. When comparing the time in each treatment ultrasonic washing in 30 and 60 minutes amentou respectively flow in 0.46 and 0.47 h⁻¹ in drippers clogged with wastewater, being statistically the best treatments. The ultrasonic cleaning process is a potentially effective treatment for unblocking clogged with water drip biofilm wastewater and chemical precipitated calcium.

Keywords: Obstruction of drippers, irrigation with wastewater, chemical precipitate, clogging emitters.

1. INTRODUÇÃO

Devido à escassez hídrica em diversas regiões e a demanda crescente por produção de alimentos, estão sendo utilizadas águas de fontes alternativas para a prática de irrigação. Aliado a este contexto se buscam sistemas eficientes para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos, como é o caso da irrigação por gotejamento.

Dentre as águas utilizadas uma está sendo foco de pesquisa nos últimos anos, as águas residuárias. Algumas regiões dos continentes da Ásia e Europa implementaram o uso deste tipo de água devido à falta de recursos hídricos disponíveis. Uma das principais águas provem de esgoto doméstico, existindo diversas vantagens em utilizar este tipo de água como melhor gestão da água nos centros urbanos, disponibilizando água de melhor qualidade para usos mais nobres, é fonte de nutrientes e está disponível o ano todo. A irrigação com água residuária deve ser realizada via irrigação por gotejamento para evitar contaminação da planta e assegurar a saúde do operador, porém há, também, algumas desvantagens, dentre as quais, a principal é a obstrução de gotejadores causados por biofilme formado por colônias bacterianas.

Outra característica comum em água de irrigação é o cálcio encontrado na maioria das fontes de águas subterrâneas. Este elemento é proveniente de passagem da água por rochas calcárias, o qual se mistura à água das fontes utilizadas na irrigação. No entanto o cálcio em excesso nas fontes de água, principalmente quando o pH é alto, pode obstruir tubulações, e principalmente, gotejadores de irrigação localizada, em virtude da precipitação química de carbonatos de cálcio (CaCO_3).

Devido às características da água, a obstrução é algo que muitas vezes é difícil de evitar, além de recorrente em sistemas de irrigação localizada. Seus prejuízos são consideráveis, destacando-se, dentre eles, danos à produção com a desuniformidade de aplicação, desperdício de água, deterioração do sistema e todo o conjunto de acessórios e equipamentos. Quando não há meios de evitar a obstrução deve-se adotar produtos ou processos para desobstruir o sistema de irrigação localizada.

Outro impasse que ocorre quando há obstrução de sistemas de irrigação por gotejamento, é a rejeição do uso destes sistemas de irrigação por parte do agricultor e, quando os processos e produtos não são eficientes, o problema se agrava. Isto faz com que o produtor deixe de utilizar a irrigação por gotejamento, que é uma tecnologia sustentável e eficiente, com baixo consumo de água. Assim, processos novos, eficientes e ambientalmente seguros, devem ser estudados para recuperar totalmente os sistemas de

irrigação uma vez que adquirir outro sistema tem custo elevado, tornando inviável para o agricultor.

Os tratamentos convencionais de desobstrução de gotejadores são acidificação e cloração, porém tais produtos podem causar problemas de toxidez no solo e na planta. Em alguns casos eles não são eficientes além de possuírem custo elevado. Um processo utilizado no setor industrial e de saúde com alto poder de limpeza é a lavagem ultrassônica, a qual utiliza ondas de ultrassom para realizar a limpeza de elementos nas mais diversas superfícies, orifícios e concavidades entre outros lugares de difícil acesso de limpeza. A lavagem ultrassônica utiliza o princípio da cavitação podendo chegar a 100% de eficiência em sua limpeza, assim, este método pode ser um processo com potencial para ser implementado na limpeza e na desobstrução de gotejadores de irrigação localizada, visto que no setor industrial e de saúde o sistema já se mostrou eficiente para limpeza de orifícios.

2. HIPÓTESE

O processo de lavagem ultrassônica dos gotejadores de irrigação localizada obstruídos com biofilme de água residuária de esgoto doméstico tratado e com precipitados químicos de cálcio tem potencial para recuperar as condições hidráulicas iniciais dos gotejadores com capacidade de ser altamente eficiente no processo de desobstrução comparado aos tratamentos de acidificação e cloração, visto que seu uso no setor industrial chega a 100% de eficiência na limpeza de peças.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Avaliar o processo de lavagem ultrassônica na desobstrução de gotejadores de irrigação localizada obstruídos com biofilme de água de esgoto doméstico tratado e com precipitados químicos de cálcio, verificando sua eficiência diante dos tratamentos de acidificação e cloração.

3.2. Objetivos Específicos

- a) Monitorar a obstrução de três modelos de gotejadores de irrigação localizada, submetidas à aplicação de água residuária de esgoto doméstico tratado e água com teor elevado de cálcio por meio da vazão e grau de entupimento.

- b) Submeter três modelos de gotejadores de irrigação localizada, obstruídos com biofilme de água residuária de esgoto doméstico tratado, ao processo de lavagem ultrassônica e avaliar sua eficiência na recuperação das condições hidráulicas dos gotejadores por meio da vazão e do grau de entupimento.
 - Comparar o desempenho de desobstrução do método proposto de lavagem ultrassônica com desobstrução com acidificação e cloração;
 - Avaliar a desobstrução diante de diferentes tempos de lavagem ultrassônica, aplicação de ácido e de cloro;
 - Avaliar a eficiência de desobstrução da combinação do tratamento de acidificação+lavagem ultrassônica e cloração+lavagem ultrassônica.

- a) Submeter três modelos de gotejadores de irrigação localizada, obstruídos com precipitados químicos de cálcio, ao processo de lavagem ultrassônica e avaliar sua eficiência na recuperação das condições hidráulicas dos gotejadores por meio da vazão e do grau de entupimento.
 - Comparar o desempenho de desobstrução do método proposto de lavagem ultrassônica com desobstrução com acidificação e cloração;
 - Avaliar a desobstrução diante de diferentes tempos de lavagem ultrassônica, aplicação de ácido e de cloro;

- Avaliar a eficiência de desobstrução da combinação do tratamento de acidificação+lavagem ultrassônica e cloração+lavagem ultrassônica.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Irrigação localizada

Os principais métodos da prática de irrigação no mundo são irrigação por aspersão, irrigação por superfície, irrigação subsuperficial e irrigação localizada, as quais são práticas que visam aumentar a produção por meio do suprimento de água para as plantas, de vez que no início do século XXI, 18% da área agrícola total estavam sendo irrigados, e foram responsáveis por aproximadamente 44% do total colhido (CHRISTOFIDIS, 2009). Segundo Fereres *et al.* (2011) não há dúvida de que a agricultura irrigada é essencial para atender à demanda futura de alimentos e que a maior produtividade é a estratégia principal para o futuro porém ao mesmo tempo em que água proporciona maior potencial de rendimento é um recurso limitado; portanto, os sistemas agrícolas devem ser mais sustentáveis.

A irrigação localizada é um sistema altamente tecnológico que vem aumentando sua área irrigada no mundo, sendo o sistema que mais se desenvolveu nos últimos anos devido à maneira racional do uso de água. No Brasil, os maiores crescimentos de áreas irrigadas por este método foram na região do nordeste (CHRISTOFIDIS, 2002). O crescimento da irrigação localizada se deu, em geral, em regiões com maior escassez hídrica (TELTSCHEK *et al.*, 1991).

Entre os métodos de irrigação se destaca a irrigação localizada, haja vista ser um sistema sustentável de produção, utiliza a menor quantidade de água para irrigação e apresenta maior eficiência relativa (85% a 95%) quando comparada com os demais métodos (BERNARDO *et al.*, 2006). A irrigação localizada opera com baixa vazão e baixa pressão dos gotejadores e faz com que a água e os nutrientes sejam aplicados diretamente na zona radicular das plantas em intervalos frequentes resultando na economia de água e energia (BRAUER *et al.*, 2011; LIU and HUANG, 2009; MÖLLER and WEATHERHEAD, 2007).

Quando se trata de economia de água, ainda em relação ao método de irrigação localizada, os sistemas de irrigação por gotejamento se destacam visto que utilizam um volume menor de água em relação ao sistema de irrigação por microaspersão. A irrigação por gotejamento possui vazões que podem variar de 1 a 10 Lh⁻¹, com pressões variando de 20 a 300 kPa, o diâmetro dos orifícios dos gotejadores também variam de 0,3 a 1,5 mm, razão pela qual problemas com entupimentos podem ser recorrentes quando se utilizam águas de qualidades inferior, também é necessário realizar monitoramento periódicos dos

sistemas. No entanto, devido a problemas de pressão, vazão e principalmente de obstrução de gotejadores, é necessário monitorar o sistema através da aplicação de ferramentas de avaliação de desempenho (BURGUETE *et al.*, 2009)

O maior problema com o uso da irrigação por gotejamento é o entupimento dos gotejadores (AHMED *et al.*, 2007); assim a existência de partículas em suspensão na água de irrigação é tida como a maior causa de entupimento (LI *et al.*, 2012). Porém outros fatores podem causar a obstrução dos gotejadores como é o caso da formação de biofilme e precipitados químicos (RIBEIRO *et al.*, 2005). Contudo, se por um lado este sistema possui economia de água e elevadas eficiências de irrigação e uniformidades de aplicação, por outro se faz necessário o uso adequado do manejo com determinada qualidade de água, sendo este um dos parâmetros que podem afetar seu desempenho em virtude do diâmetro dos orifícios dos gotejadores, que estão sujeitos à obstrução. Assim, além de afetar as culturas a qualidade de água na irrigação localizada é fator importante em razão da existência de diferentes qualidade de água provindas das diferentes regiões do Brasil e do mundo sendo que, para realizar a irrigação por gotejamento, a água deve ter qualidade mínima para não causar prejuízos econômicos ao sistema com obstrução dos gotejadores (GHUNMI *et al.*, 2009)

4.2. Qualidade de água para irrigação localizada

A água é o fator mais importante no setor da irrigação pois, além de suprir as necessidades das culturas, é o principal insumo utilizado via irrigação. As águas para irrigação provêm de diferentes fontes, podendo ser superficial, subsuperficial e até mesmo de reuso, conseqüentemente elas possuem características diversas (ALMEIDA, 2010). Diante das diferentes fontes estas podem ser próprias para irrigação ou não, de vez que aqueles que não possuem qualidade suficiente para ser utilizada na irrigação, devem sofrer um tratamento antes do uso para não prejudicar as culturas, o solo e os sistemas de irrigação.

Devido à escassez hídrica em algumas regiões do país e do mundo, estão sendo utilizadas fontes diversas de água e, muitas vezes, com qualidade inadequada para irrigar. Segundo Figueiredo *et al.* (2009) o aumento da demanda de água nos diversos setores pode ser um problema no que diz respeito à qualidade de água para irrigação, pois uma vez que há escassez hídrica, a água de qualidade superior será para outros usos (como indústria e

abastecimento urbano) enquanto que somente águas de qualidades inferiores serão destinadas para à irrigação (ALVAREZ *et al.*, 2009).

Quando usada na irrigação a água de qualidade inferior, também pode trazer problemas relacionados à obstrução das tubulações e gotejadores de irrigação localizada, afetando não apenas o sistema mas também a produção agrícola, trazendo prejuízos econômicos ao produtor (GHUNMI *et al.*, 2009).

Outro aspecto relacionado à qualidade de água, segundo Ayers and Westcot (1999) é a quantidade de sais dissolvidos na água para irrigação pois a qualidade de água varia de maneira significativa com os tipos de sais dissolvidos e suas concentrações em água. Os sais são encontrados em pequenas quantidades nas águas de irrigação porém podem afetar o desempenho do sistema. Os sais têm sua origem na dissolução ou intemperização das rochas e solos, incluindo a dissolução lenta do calcário, do gesso e de outros minerais, além de serem transportados pelas águas de irrigação e depositados no solo.

Outra fonte de água que vem sendo utilizada na irrigação de culturas, principalmente em regiões áridas e semiáridas, devido à falta do recurso hídrico, são águas residuárias provenientes de esgoto de abastecimento urbano (ALMEIDA, 2010). Sendo as principais vantagens na utilização deste tipo de água a possibilidade de realizar um gerenciamento ambiental com reutilização da água residuária e também o incremento de fertilizantes no solo, de vez que águas residuárias são ricas em nutrientes porém a região de produção da água residuária é que irá determinar suas características qualitativas e nutricionais.

Segundo Silva *et al.* (2011) a agricultura irrigada depende tanto da quantidade como da qualidade da água; os autores preconizam que para minimizar os problemas da utilização de água de baixa qualidade é necessário que existam planejamento e monitoramento adequados para atestar sua qualidade e para que problemas futuros possam ser evitados; no entanto, ainda são utilizadas águas sem critério de qualidade, o que é um dos fatores mais importantes a ser considerado na irrigação.

Segundo Almeida (2010) os principais parâmetros a serem avaliados na qualidade de água de irrigação são as características físico-químicas e biológicas, sendo: Potencial Hidrogeniônico (pH) Condutividade Elétrica (CE) Total de Sais Dissolvidos (TSD) íons: sódio (Na^+) potássio (K^+) cálcio (Ca^{2+}) magnésio (Mg^{2+}) cloretos (Cl^-) sulfatos (SO_4^{2-}) carbonatos (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-) e também é usual analisar o íon boro (B^{3+}).

A Tabela 1 apresenta os intervalos usuais dos parâmetros de qualidade de água que devem ser analisados para irrigação, segundo Ayers and Westcot (1976 e 1991) e Aragués *et al.* (1979).

Tabela 1. Análises de laboratório necessárias para avaliar a água visando à irrigação

Parâmetros	Unidade	Intervalo usual para irrigação
<i>SALINIDADE</i>		
Conteúdo de sais		
Condutividade elétrica (CE)	dS m ⁻¹	0,0 – 3,0
Total de Sais Dissolvidos (TSD)	mg L ⁻¹	0,0 – 2000,0
<i>CÁTIONS E ÂNIONES</i>		
Cálcio (Ca ²⁺)	meq L ⁻¹	0,0 – 20,0
Magnésio (Mg ²⁺)	meq L ⁻¹	0,0 – 5,0
Sódio (Na ⁺)	meq L ⁻¹	0,0 – 40,0
Carbonatos (CO ₃ ²⁻)	meq L ⁻¹	0,0 - 0,1
Bicarbonatos (HCO ₃)	meq L ⁻¹	0,0 – 10,0
Cloretos (Cl ⁻)	meq L ⁻¹	0,0 – 30,0
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	meq L ⁻¹	0,0 – 20,0
<i>NUTRIENTES</i>		
Nitrato - Nitrogênio (NO ₃ ⁻ - N)	meq L ⁻¹	0,0 – 10,0
Amoníaco - Nitrogênio (NH ₄ ⁺ - N)	meq L ⁻¹	0,0 – 5,0
Fosfato - Fósforo (PO ₄ ³⁻ - P)	meq L ⁻¹	0,0 – 2,0
Potássio (K ⁺)	meq L ⁻¹	0,0 – 2,0
<i>VÁRIOS</i>		
Boro (B ³⁺)	mg L ⁻¹	0,0 – 2,0
Acidez (pH)		6,0 - 8,5
Razão de Adsorção de Sódio (RAS)	(mmol L ⁻¹) ^{1/2}	0,0 – 15,0

Adaptado de AYERS and WESTCOT (1976 e 1991) e ARAGUÉS *et al.* (1971).

4.2.1. Água residuária de esgoto doméstico

A demanda dos usos da água está dividida em água para consumo humano, indústria e agricultura. As reservas mundiais limitadas de água doce, juntamente com as restrições de lançamento de efluentes no meio ambiente, culminam para a necessidade do uso racional dos recursos hídricos de modo a mitigar os impactos negativos da geração de efluentes (MEDEIROS *et al.*, 2010).

O uso de água residuárias na agricultura é um tema que vem sendo discutido e pesquisado no mundo visto que proporciona o uso mais eficiente do recurso hídrico com consequente redução de volume de água gasto dos outros setores, justamente por deixar de utilizar água de uso mais nobre e reutilizar as águas residuárias (MOJIRI and AMIROSSADAT 2011; VEDACHALAM and MANCL 2012).

A utilização de água residuária na agricultura irrigada já é praticada em diversos países, principalmente da Ásia e na Europa. Além da redução no uso de insumos como água, há, também, outra vantagem econômica, que é a redução da aplicação de fertilizantes, uma vez que o uso de água residuária de esgoto doméstico aumenta o incremento de macro e micronutrientes no solo irrigado (PEREIRA *et al.*, 2011); por outro lado, a aplicação de água residuária no solo também pode ocasionar a desagregação e a diminuição da condutividade hidráulica do solo (SCHACHT & MARSCHNER, 2015).

Outro benefício com a utilização da irrigação com água residuária é o ambiental, ocasionado pela diminuição da captação de águas subterrâneas e a redução de descarga de efluentes diretamente nos corpos hídricos (MUYEN *et al.*, 2011)

Um estudo realizado por CARR *et al.* (2011) na Jordânia, revelou que produtores agrícolas reconhecem a disponibilidade de efluentes durante todo o ano e conhecem os benefícios econômicos de sua utilização na agricultura. A Jordânia é um dos países mais avançados em reúso de águas residuárias pois utiliza mais de 90% de seu efluente de esgoto doméstico tratado sendo a maior parte para fins agrícolas, devido à escassez de água e dependência política da agricultura no país (ACWUA, 2010).

Segundo Cirelli *et al.* (2009) o uso de águas residuais na irrigação, com ou sem tratamento, está aumentando em regiões áridas e semiáridas, porque é um recurso valioso; no entanto, os aspectos de qualidade de água devem ser analisados antes do uso da água residuária para não causar problemas de contaminação de solo e planta pois a pesquisa realizada nesta área deve constituir a base para um planejamento integrado da reutilização em solos e de culturas, no contexto da agricultura sustentável e proteção ambiental, (KALAVROUZOTIS *et al.*, 2011).

Outro fator importante a salientar é que o uso de águas residuárias aumentou significativamente nos últimos anos devido à escassez de água, elevado custo de fertilizantes, uso racional da água bruta e diminuição dos impactos ambientais (BRESSAN *et al.*, 2012). A escassez de água é cada vez mais comum em regiões áridas e semiáridas, sobretudo em áreas rurais em que existe pouca infraestrutura de abastecimento. Esta problemática é maior nos países em desenvolvimento como é o caso de algumas regiões do Brasil. Diante disto, a utilização de água residuária de esgoto doméstico utilizada via irrigação para produção de culturas prioritárias, apresenta-se como opção de grande potencialidade, no que diz respeito ao incremento da produção agrícola na agricultura de subsistência como é o caso do semiárido brasileiro.

Desta forma é possível disponibilizar a água de melhor qualidade para usos mais nobres, como consumo humano e para fins agrícolas a água utilizada pode ser de qualidade inferior, como o efluente de esgotos tratados; no entanto, mesmo para fins agrícolas as águas devem atender a padrões de qualidade, razões por que esgotos devem passar por sistemas de tratamentos para melhorar a qualidade e estarem disponíveis para serem utilizados no meio agrícola sem ocasionar malefícios ao meio ambiente, às culturas produzidas e à saúde humana.

A qualidade das águas provenientes de esgotos é determinada conforme suas características, visto que a procedência de cada grupo de água residuária é diferente, de acordo com a atividade geradora do efluente, dentre elas o esgoto doméstico e industrial. A respeito dos diferentes tipos de efluentes sabe-se que devem ser coletados e tratados separadamente no intuito de evitar problemas no tratamento de suas águas residuárias devido à mistura de esgoto doméstico e industriais (AMERASINGHE *et al.*, 2013).

Em geral, o processo de tratamento de águas residuárias consiste em diminuir ou remover os poluentes contidos nelas, sendo que os principais parâmetros indicadores que permitem caracterizar o esgoto são: sólidos, Demanda Bioquímica de Oxigênio –DBO, e Demanda Química de Oxigênio – DQO, nitrogênio fósforo e indicadores de contaminação fecal (BRESSAN *et al.*, 2012).

Segundo Von Sperling (2005) o tratamento do esgoto consiste nas seguintes fases: tratamento preliminar; tratamento primário; tratamento secundário; remoção de nutrientes e remoção de organismos patogênicos. O tratamento preliminar consiste em separar sólidos grosseiros, sendo o tratamento de ordem física. O tratamento primário consiste na remoção de poluentes, sólidos em suspensão, sedimentáveis e sólidos flutuantes, também de ordem física; já no tratamento secundário são realizadas as seguintes etapas: promoção de uma sucessão de reações bioquímicas realizadas por microrganismos para a remoção da matéria orgânica. Tais reações são quantificadas através da averiguação de DBO (5:20). Nesta etapa também são removidos alguns nutrientes por processos bioquímicos ocorrendo também a eliminação de organismos patogênicos com desinfecção por cloro, ozônio, radiação ultravioleta (UV) e outros.

Após passar pelos tratamentos estes efluentes devem atender a padrões de qualidade, segundo a Resolução CONAMA 357 de 17/03/2005 (MMA 2005) que classifica as águas em doces, salinas e salobras sendo que para irrigação, usa-se a água doce. A água doce pode ser dividida em cinco classes: classe especial; classe 1, que pode ser utilizada em irrigação de alimentos consumidos in natura; classe 2, que pode ser utilizada em

irrigação de frutas; classe 3, que pode ser utilizada em irrigações de árvores, cereais e forrageira e classe 4, que pode ser destinada à harmonia paisagísticas. Se o efluente possuir qualidade adequada pode ser utilizado para fertirrigação em diversas culturas. Alguns parâmetros de qualidade de água também são estabelecidos por Ayers and Westcot (1991) pelo boletim 29 da FAO.

Após tratamento da água residuária é possível que seja aplicada via irrigação pois, segundo Bressan *et al.* (2012) a aplicação pode ser feita com cinco sistemas de irrigação distintos: aspersão, sulcos, inundação, gotejamento e gotejamento subsuperficial; estes autores ressaltam alguns fatores, Tabela 2, que afetam a escolha do sistema e as medidas preventivas a serem consideradas para cada tipo de sistema

Tabela 2. Fatores que influenciam na escolha mais apropriada do sistema de irrigação funcionando com águas residuárias

Método de Irrigação	Fatores que afetam na escolha	Medidas protetivas necessárias
Inundação	Custo Baixo. Sistematização do terreno pode ser necessária.	Proteção completa para operários agrícolas, consumidores e manuseadores de culturas.
Sulcos	Custo Baixo. Nivelamento pode ser necessário.	Proteção completa para operários agrícolas, consumidores e manuseadores de culturas.
Aspersão	Eficiência média do uso da água. Não há necessidade de nivelamento.	Algumas culturas, principalmente árvores frutíferas, são excluídas. Distância mínima de 100 metros de casas e estradas
Subsuperficial e localizada	Custos elevados. Elevada eficiência do uso da água. Alta produtividade agrícola.	Filtração para evitar entupimento dos orifícios

Fonte: (BRESSAN *et al.*, 2012)

No entanto maneira mais segura para aplicar efluente de esgoto doméstico é via irrigação por gotejamento superficial ou subsuperficial garantindo, assim, a segurança alimentar e a segurança do trabalhador que irá manusear o sistema de irrigação e as culturas, visto que a aplicação via gotejamento não dispersa a água ou a deixa em contato direto com as culturas, o que evita uma provável contaminação (BRESSAN *et al.*, 2012).

4.2.2. Água com sais

Normalmente, as fontes de água de irrigação são de origem superficial e subsuperficial ou subterrânea; em algumas regiões onde há escassez dos recursos hídricos fontes alternativas de água se tornam necessários. No entanto, essas fontes de água têm origem no ciclo hidrológico e após passar pelos diversos meios, chega às fontes de destino, as quais são fontes de qualidades distintas.

As fontes hídricas superficiais e subterrâneas possuem sais dissolvidos, constituindo os principais sais primários dos estratos da crosta terrestre, os quais são liberados no processo de meteorização química (hidrólise, hidratação, oxidação, carbonatação e outros) e são transportados para as fontes de águas superficiais e subterrâneas (ALMEIDA, 2010). Um dos principais cátions encontrados em diferentes extratos da crosta terrestre é o íon Ca^{2+} , que está presente na maioria dos solos e apresenta uma série de características (ALMEIDA, 2010):

Águas provenientes de solos calcários:

- Baixo conteúdo de sais solúveis;
- Valores baixos de CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , e as vezes SiO_2 ;
- Algumas são pobres em Mg^{2+} ;
- Ricas em HCO_3^- , e em Ca^{2+} ;
- Os Cl^- e os Na^+ são variáveis;
- Em geral a relação: $\text{Na}^+/\text{K}^+ < 1$;

Águas provinientes de solos gípdicos (solo com gesso):

- Elevado conteúdo de SO_4^{2-} e Ca^{2+} ;
- Valor de Mg^{2+} é variável;
- Valores normais de HCO_3^- ;
- Conteúdo baixo de Cl^- e de Na^+ ;
- Em geral a relação: $\text{Na}^+/\text{K}^+ < 1$

Águas provinientes de solos argilosos:

- Baixo conteúdo de sais solúveis;
- Valores altos de HCO_3^- ; e de Cl^- ;
- Conteúdos altos de Ca^{2+} e de Mg^{2+}
- Elevado conteúdo de SiO_2 ;
- Valores baixos de SO_4^{2-}

Assim é possível verificar que muitas fontes de águas usadas em irrigação possuem excesso de cálcio. Em águas subterrâneas ocorrem o mesmo processo, pois as

águas são retiradas com perfuração de poços, onde estão presas em aquíferos, as características das águas dependerá das rochas que compõem os aquíferos.

Os sais, encontrados nas fontes de águas para irrigação, têm sua origem na dissolução ou intemperização das rochas e solos, incluindo a dissolução lenta do calcário e de outros minerais, além de serem transportados pelas águas de irrigação e depositados no solo onde se acumulam sempre em que a água se evapora ou é consumida pelas culturas (AYERS and WESTCOT, 1999).

A qualidade da água de irrigação é definida principalmente pela quantidade total de sais dissolvidos e sua composição iônica. Os principais sais dissolvidos na água de irrigação são os de sódio, cálcio e magnésio, em forma de cloretos, sulfatos e bicarbonatos. Normalmente, o potássio e o carbonato estão presentes em proporções relativamente baixas (SILVA *et al.*, 2011). Segundo Cavalcante (2000) a qualidade de água para irrigação em termos químicos, é determinada pela composição e concentração de sais constituídos e dissolvidos na água. Ainda em relação às características químicas da água, quando utilizada para irrigação pode deixar precipitados químicos em gotejadores.

Um dos indicadores químicos de qualidade de água é a dureza, que é o resultado da presença principalmente de sais alcalinos terrosos (cálcio e magnésio) ou de outros metais bivalentes, em menor intensidade. Em teores elevados causa sabor desagradável e efeitos laxativos; reduz a formação da espuma do sabão, aumentando seu consumo; provoca incrustações nas tubulações e caldeiras (SILVA *et al.*, 2011). A classificação das águas, em termos de dureza (em CaCO_3) é:

- $< 50 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ – água mole;
- entre 50 e $150 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ – água com dureza moderada;
- entre 150 e $300 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ – água dura;
- $300 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ – água muito dura.

O íon cálcio (Ca^{2+}) nas fontes de água de irrigação é algo comum em muitas regiões e em regiões semiáridas, como o nordeste brasileiro, os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} são predominantes com uma relação de Ca:Mg de 1,7:1 (MEDEIROS, 1992). Assim, é necessário conhecer os efeitos da água com cálcio nos sistemas de irrigação e nas culturas; também se torna necessário verificar as consequências e soluções dos possíveis problemas que venham a ocorrer como a obstrução dos gotejadores uma vez que a retirada de cálcio pode tornar-se inviável e o uso de ácidos para reduzir o pH pode ser prejudicial ao solo e à cultura.

4.3. Obstrução de gotejadores de irrigação localizada

A obstrução de gotejadores de irrigação localizada é um problema comum nos sistemas de irrigação em operação, sobretudo porque pode ser utilizada diferentes qualidades de água para irrigar. Há varias fontes de água para utilizar na irrigação, porém em algumas regiões há poucas fontes com qualidade de água inferior a padrões estabelecidos de água de irrigação para utilizar.

Existem diferentes meios de prevenção de obstrução porém tais meios nem sempre conseguem inibir a obstrução, com é o caso de filtros que, apesar de todas as tecnologias, não conseguem reter todas as impurezas que causam a obstrução, como as bactérias e substâncias químicas. Bactérias podem formar colônias e, conseqüentemente, biofilme, no interior das tubulações e as substâncias químicas contidas nas águas podem reagir e precipitar no interior da tubulação causando a obstrução.

4.3.1. Obstrução com água residuária

O principal problema com o uso da irrigação por gotejamento é o entupimento do emissor (AHMED *et al.*, 2007) pois a existência de partículas em suspensão na água de irrigação é tida como a maior causa de entupimento (LI *et al.*, 2012). Quando é feita a aplicação de água residuária o risco de entupimento pode ser maior pois, além das partículas sólidas em suspensão em que os filtros não conseguem reter, pode haver também a formação de biofilme por colônias bacterianas, o que também favorece a obstrução dos gotejadores.

Segundo Batista *et al.* (2010) a aplicação de efluente de esgoto doméstico tratado tem potencial para obstrução de gotejadores devido à formação do biofilme formado pela interação entre colônias de bactérias e algas, ocasionando entupimento parcial ou total dos gotejadores, acarretando perda de eficiência de distribuição. Vale *et al.* (2013) também verificaram, em seus estudos, diminuição do desempenho hidráulico do sistema de irrigação quando utilizaram diferentes concentrações de efluente de esgoto doméstico diluídas em água de abastecimento.

Quando se utiliza água residuária na irrigação por gotejamento o entupimento do emissor está relacionado com a qualidade de água do efluente, qualidade do emissor, métodos de filtragem e tratamento do efluente e as condições ambientais. As obstruções podem ser: obstrução física, que é causada pela suspensão de partículas inorgânicas (tais

como sedimentos, areia, argila, plástico), materiais orgânicos (resíduos animais, caracois, etc) e detritos microbiológicos (algas, protozoários etc) materiais físicos são, muitas vezes, combinados com limos bacterianos (LIU and HUANG, 2009). Estes autores realizaram um estudo comparando o uso de diferentes gotejadores na aplicação de água residuária e concluíram que os gotejadores autocompensantes foram os mais indicados pois a pressão constante funciona como dispositivo de antientupimento.

Batista *et al.* (2010) constataram, em seu estudo, que a cada 120 horas de funcionamento de um sistema de irrigação por gotejamento usando água residuária, ocorria um decréscimo do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e da vazão dos gotejadores avaliados, de 4,49%, 10,58% e 4,56%, respectivamente. Os autores ainda verificaram que a filtragem com membrana e abertura dos finais de linhas a cada duas semanas não prevenirá totalmente a obstrução de gotejadores; também verificaram que o entupimento dos gotejadores foi mais acentuado no final das linhas laterais.

Analisando os efeitos da aplicação de esgoto doméstico na uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação localizada, Souza e Moreira (2012) verificaram que a formação de biofilme resultante da interação entre sólidos suspensos e bactérias foi a principal causa de obstrução de gotejadores e ainda constataram reduções de uniformidade com aplicação de esgoto doméstico tratado no sistema de tratamento primário, no secundário e no terciário, porém as maiores reduções ocorreram no sistema de tratamento primário devido à maior concentração de sólidos suspensos. Os valores de uniformidade de distribuição (CUD) após 500 horas de funcionamento do sistema operando com água residuária de esgoto doméstico reduziram 61, 27 e 57% respectivamente para os tratamentos primário, secundário e terciário. Batista *et al.* (2011) constataram que em relação à uniformidade estatística (UE) que os valores reduziram 54, 24 e 59%, respectivamente, para os tratamentos primário, secundário e terciário.

Outro fator que aumenta o risco de obstrução de gotejadores é quando se aplica água residuária em sistemas de irrigação instalados em terrenos com topografias acidentadas, cujas linhas laterais de gotejadores se encontram inclinadas (LI *et al.*, 2012). E a obstrução dos gotejadores operando com água residuária se agrava ainda mais conforme aumenta o comprimento do labirinto do gotejador (BATISTA *et al.*, 2008).

Albuquerque *et al.* (2014) verificaram, em seu estudo, que a matriz extracelular do biofilme é produzida pelos próprios microrganismos; tal matriz é constituída por polissacarídeos, proteínas, exoenzimas, ácidos nucleicos e lipídios, que permitem

imobilizar as células do biofilme, mantendo o biofilme coesivo, fato este que faz com que o biofilme se prenda na parede e no gotejador, obstruindo a passagem de água. Segundo Zhou *et al.* (2013) o processo de formação de biofilme se dá em duas fases,: uma fase inicial, na qual a proliferação microbiana é rápida, e as substâncias pegajosas segregadas por microrganismos crescem rapidamente formando os biofilmes nas paredes dos tubos, diminuindo a passagem de água; em uma segunda fase o próprio biofilme captura partículas presentes na água aumentando sua formação.

O maior problema da aplicação de água residuária para os sistemas de irrigação por gotejamento é a obstrução de gotejadores, devido à formação de biofilme por colônias bacterianas, formado no interior das tubulações após a passagem pelos filtros visto que os filtros utilizados não conseguem reter tais bactérias e algas presentes nas águas residuárias de esgoto doméstico.

4.3.2. Obstrução físico-química

Uma problemática dos sistemas de irrigação localizada se refere às obstruções físico-químicas, que ocorrem devido à presença de compostos químicos na água que sofrem precipitação, ocasionando a obstrução dos gotejadores. A existência de partículas em suspensão na água de irrigação é tida como a maior causa de entupimento (LI *et al.*, 2012) e ainda a concentração e o tamanho das partículas são os fatores que mais interferem na obstrução dos gotejadores de irrigação localizadas (NIU *et al.*, 2013). Na Tabela 3, são apresentados os sais mais frequentes nos solos, e conseqüentemente, nas fontes de água de irrigação.

Porém os principais e mais comuns sais encontrados nas águas de irrigação são os carbonatos, principalmente o carbonato de cálcio (CaCO_3) pois ele precipita quando a concentração de bicarbonato excede cerca de 2 meq L^{-1} (miliequivalentes por litro) e o pH é maior que 7,5. O aumento das temperaturas da água diminui a solubilidade de carbonato de cálcio, aumentando o potencial para a precipitação. A obstrução de gotejadores de irrigação localizada em virtude da precipitação de CaCO_3 , é um problema recorrente principalmente se houver elevadas concentrações de íons na água e se o pH estiver elevado (LIU and HUANG, 2009).

Segundo Bernardo *et al.* (2006) e Mantovani *et al.* (2006) as concentrações elevadas de íons de bicarbonato em águas de irrigação levam a precipitação do cálcio e magnésio, sob a forma de carbonatos, e além da obstrução que pode ocorrer nos

gotejadores de irrigação, estes precipitados aumentam a proporção de sódio na solução do solo.

Tabela 3. Principais sais com menor solubilidade encontrado nos solos e fontes de água de irrigação

Ordem	Sais	Solubilidade (meq L ⁻¹)
1	CaCO ₃ *	0,5
2	MgCO ₃ *	2,5
3	Ca(HCO ₃) ₂ *	3 – 12
4	Mg(HCO ₃) ₂ *	15 – 20
5	CaSO ₄ *	30
6	NaHCO ₃	1642
7	MgSO ₄	5760
8	NaCl	6108
9	Na ₂ CO ₄	6830
10	Na ₂ CO ₃	8320
11	MgCl ₂	14955
12	CaCl ₂	25470

*Sais de solubilidade baixa

Adaptado de DONEEN (1975) e PIZARRO (1996)

Outro fator que influencia no processo de precipitação química é o pH, que é influenciado diretamente pelo tipo de rochas que compõem as fontes de água, o que ficou comprovado com o estudo desenvolvido por Ferreira *et al.* (2015) em fontes de água superficial em uma região do Ceará.

Os gotejadores de irrigação localizada são extremamente susceptíveis a obstrução física e, mesmo havendo um processo de filtragem para reter as partículas sólidas, os precipitados químicos ainda podem se formarem dentro das tubulações, causando a obstrução física, cuja ocorrência se deve aos filtros convencionais de areia, tela e disco não retêm os íons dissolvidos que se combinam para formar os precipitados; logo quando estes fatores começam a interferir no desempenho hidráulico dos sistemas meios de prevenção de obstrução e tratamentos de desobstrução devem ser aplicados para retomar o desempenho adequado do sistema.

4.4. Desobstrução de gotejadores de irrigação localizada

A obstrução de um sistema de irrigação por gotejamento pode ocorrer por vários motivos, no entanto, quando isto se concretiza deve-se fazer um tratamento de

desobstrução, pois a aquisição de um sistema de irrigação por gotejamento tem custo elevado. Existem diferentes tipos de produtos e processos de desobstrução com vantagens e desvantagens, porém é possível verificar, na literatura, que a maioria das pesquisas de desobstrução de gotejadores de irrigação localizada está relacionada a tratamentos químicos.

Um dos principais tratamentos é a utilização de cloro livre e ácido nítrico, Teixeira *et al.* (2008) estudaram o comportamento da desobstrução de gotejadores submetidos a diferentes doses de aplicação de cloro (10 e 50 mg L⁻¹) e aplicação de ácido nítrico a pH 2 e obtiveram os melhores resultados com a aplicação de 50 mg L⁻¹ de cloro livre; já Cararo and Botrel (2007) estudaram a desobstrução em diferentes gotejadores de irrigação localizada, e verificaram que a aplicação de cloro residual livre a 0,5 mg L⁻¹ teve melhores resultados nos tratamentos de desobstrução de gotejadores autocompensantes que utilizaram ar comprimido a uma pressão de entrada de 196 kPa.

Outra maneira de minimizar o problema seria manter a água de irrigação com baixos valores de pH pois a obstrução com precipitados químicos ocorre principalmente quando o pH da água está elevado. Assim uma forma para baixar o pH e evitar a obstrução ou e até mesmo desobstruir os gotejadores de irrigação, seria a aplicação de ácidos em teores adequados sendo necessário acidificar a fonte de água e evitar a elevação do pH (KIDDER and HANLON 2012). Quando se acidifica uma fonte de água, o ácido deve sempre ser adicionado à água e nunca o contrário. Existem diferentes ácidos, tais como ácido clorídrico, sulfúrico, cítrico e fosfórico, alguns adubos ácidos também podem acidificar a água de irrigação para utiliza-la como prevenção ou tratamento de desobstrução (LIU and MCAVOY, 2012)

A aplicação de ácido pode ser um tratamento eficiente para desobstruir gotejadores, os autores Vieira *et al.* (2004) realizaram trabalhos com a aplicação de ácido fosfórico (85%) com pH 2,0 e pH 3,0 em gotejadores obstruídos com precipitados de ferro e verificaram que os tratamentos com ácido apresentaram melhores resultados comparados com o tratamento com hipoclorito de sódio, um produto comercial chamado Reciclean e impacto mecânico dos gotejadores (batidas realizadas em cada gotejador) porém o tratamento com ácido possui os maiores gastos.

Os autores Karaca and Uçan (2013) realizaram trabalhos de desobstrução de gotejadores entupidos com CaCO₃, aplicando diferentes concentrações de ácido clorídrico (HCl) e verificaram que concentrações até 10 ppm podem recuperar o desempenho hidráulico de sistemas que tiverem o comprometimento da vazão inferior a 10%.

Obstruções mais severas devem ser recuperadas com a aplicação de maiores concentrações de ácido, porém segundo os mesmos autores, concentrações elevada podem ser tóxicas para as plantas e ao solo no decorrer do tempo.

Os autores Eroglu *et al.* (2012) verificaram estudando o desempenho de irrigação por gotejamento obstruído com precipitados químicos de CaCO_3 , um meio alternativo para evitar a precipitação do CaCO_3 com a aplicação de bactérias sendo um método promissor em campo pois, segundo ASAE Standards (1993) a aplicação de produtos ácidos para baixar o pH e evitar a precipitação, pode causar prejuízos ao solo e as culturas.

Outro meio utilizado como tratamento de desobstrução diz respeito às estirpes bacterianas, Sahin *et al.* (2005) verificaram que elas podem ser utilizadas como agentes de antiobstrução em tratamentos de gotejadores dos sistemas de irrigação localizada obstruídos de forma biológica. Os autores ainda relatam que este método pode substituir os tratamentos convencionais químicos na desobstrução de gotejadores, destacando que as cepas bacterianas, além de realizar a limpeza biológica dos tubos, também podem ser usadas para controle de microrganismos patogênicos os quais provocam doenças em plantas e contaminam o solo.

Além dos tratamentos de choque para desobstrução de gotejadores de irrigação localizada, também é possível realizar tratamentos com medidas preventivas de obstrução. Os autores Martins *et al.* (2010) realizaram trabalhos de prevenção da obstrução de gotejadores operando com água ferruginosas, aplicando cloro orgânico e realizando a abertura dos finais de linha. Com isto, os autores verificaram eficácia nas medidas preventivas por um longo período. Medidas preventivas em esgoto sanitário de maturação foram testadas por Batista *et al.* (2005) que acidificaram e aplicaram cloro residual livre na água para evitar a obstrução e verificaram que houve redução na formação de biofilme nas tubulações e nos gotejadores dos sistemas de irrigação por gotejamento. Outra maneira de prevenção foi testada por Gamri *et al.* (2014) ao constatarem a redução do biofilme nas tubulações dos sistemas de irrigação quando havia variação da pressão.

Uma maneira alternativa de desobstrução de gotejadores de irrigação localizada é o processo mecânico (VIEIRA, *et al.*, 2004) o qual não interfere quimicamente na água, no solo nem nas plantas. É uma técnica mecânica que pode ser utilizada para realizar a desobstrução é através da lavagem ultrassônicas, cujo as ondas de ultrassom podem causar desestruturação mecânica do material obstruidor das tubulações e dos gotejadores de irrigação realizando a limpeza de todo o sistema e promovendo a recuperação hidráulica do sistema com a desobstrução dos gotejadores.

4.5. Equipamento de ultrassom

A limpeza ultrassônica é uma tecnologia que faz uso da cavitação e transferência de momento, o qual faz a indução e a propagação de ondas acústicas de alta intensidade, com frequência acima do limite de audição do homem (aproximadamente 18 kHz) em meios líquidos, sendo o meio mais eficiente de métodos de limpeza não abrasivos e que não utilizam dissolução química do substrato (PUSKAR, 1982, PEREIRA, 2010). Estes autores ainda descrevem que a limpeza por este método é altamente utilizada na indústria metal-mecânica, automotiva, aeronáutica e óptica, para a remoção de resíduos metálicos e graxos de processos de usinagem, manutenção e manipulação.

Este método de limpeza é capaz de remover impurezas sem comprometer ou danificar a superfície que está sendo limpa sendo particularmente eficiente na limpeza e na desobstrução de objetos com cavidades, furos e reentrâncias (ENGE, 2015). Quando o objeto a ser limpo possui geometria complexa, com cavidades e reentrâncias, muitas vezes a agitação mecânica gerada por borbulhas de ar, hélices ou agitadores, não é suficiente, tornando obrigatório o uso do ultrassom (PEREIRA, 2010).

Até nos anos 90 a tecnologia do ultrassom não era tão conhecida no Brasil pois os produtos eram importados e caros; a partir de então e com restrições ambientais, o método de limpeza ultrassônica passou a ser mais amplamente utilizado no Brasil, constatando-se que também é um método muito eficiente de limpeza em comparação com os outros, (PEREIRA, 2010).

No setor industrial de manufatura e hospitalar, entre outros, são utilizados diversos sistemas de limpeza porém as limpezas como, por exemplo, banho de sais fundidos e por solventes, e alguns outros produtos químicos, estão ficando em desuso devido às restrições ao uso de substâncias tóxicas e agressivas ao meio ambiente. Assim, a principal alternativa ao uso destes processos tem sido a limpeza ácida, alcalina e por emulsões, em conjunto com a limpeza mecânica e ultrassônica (PEREIRA, 2010).

Para o uso da tecnologia do ultrassom em processos de limpeza são utilizados os equipamentos de lavadora ultrassônica. Estes equipamentos se destinam à limpeza de peças ou partes, retirando todas as impurezas contidas na superfície ou nas reentrâncias minúsculas e mais profundas dos objetos, porém eles não atuam sozinhos mas, sim, em conjunto com a solução de limpeza adequada a cada tipo de trabalho, como os detergentes enzimáticos, pois nenhum outro sistema consegue limpar objetos, seja ele manual ou

mecânico, como o processo de limpeza por ultrassom, sendo este o método mais rápido, eficiente e econômico, além de ser mais higiênico (UNIQUE, 2015).

Em geral os equipamentos de lavagem ultrassônica, operam com frequência de 20 ou 25 kHz e 40 kHz, porém há sistemas que operam com frequências de 100 kHz, e os chamados Megassônicos, que operam com frequência de até 1 MHz.

A partir de um campo ultrassônico de alta intensidade no meio líquido, ocorre o fenômeno da cavitação que, em resumo, é o surgimento de bolhas de vapor que colapsam gerando grandes diferenciais pontuais de pressão e temperatura, realizando a remoção mecânica do contaminante (Figura 1A). Quando há contaminantes químicos inertes é necessário utilizar-se da ação mecânica assim, o processo de limpeza por ultrassom age pela erosão gerada pela cavitação dispensando o contato direto do objeto a ser limpo com escovas ou outros agentes físicos externos (Figura 1B).

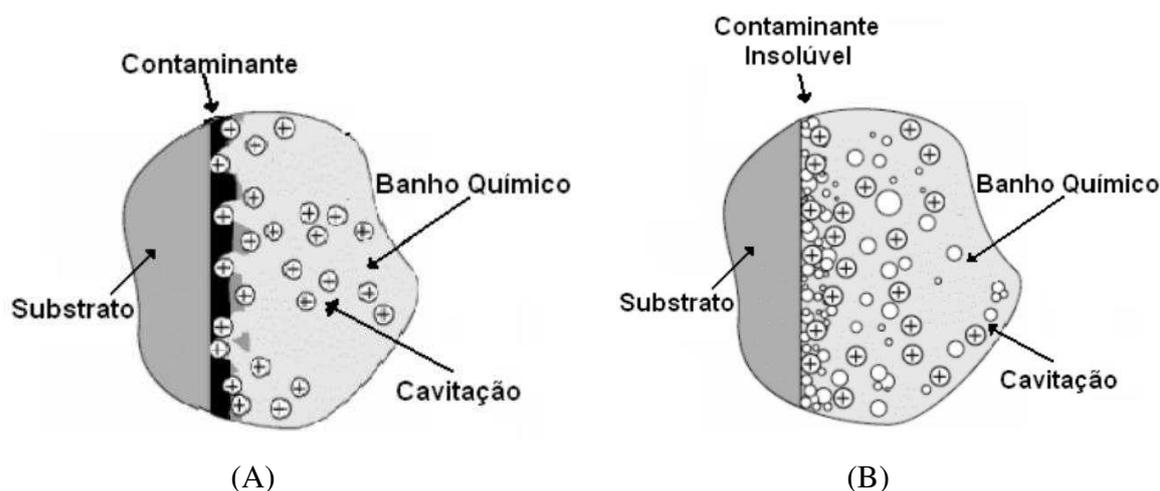


Figura 1. Processo de ação de limpeza da lavagem ultrassônica: A) inibição da camada saturada e remoção mecânica do contaminante pela cavitação; B) substrato com contaminantes inertes ao banho químico sendo removidos pela cavitação (Adaptado de PEREIRA, 2010).

Devido à alta eficiência dos equipamentos de lavagem ultrassônica, eles estão sendo utilizados nos mais diversos meios do setor industrial, saúde, ambiental etc., podendo ser também uma tecnologia promissora no meio agrícola. Assim, testes devem ser realizados na meio agrícola, e a lavagem ultrassônica pode ser aplicada na área de desobstrução de gotejadores de irrigação localizada. Devido às características do processo de limpeza das lavadoras e equipamentos de ultrassom, a limpeza dos gotejadores de irrigação pode torna-los novos após serem desobstruídos, de vez que tais processos de limpeza conseguem uma eficiência de 100% quando bem operados e utilizados de maneira adequada (COTELL, *et al.*, 1994)

5. MATERIAL E MÉTODOS

Com o intuito de propor um novo processo de desobstrução de gotejadores de irrigação localizada, foram realizados testes com a lavagem ultrassônica utilizando um equipamento de emissão de ondas ultrassônicas em três diferentes tipos de gotejadores de irrigação localizada. Foi verificada a eficiência da lavagem ultrassônica na recuperação hidráulica dos gotejadores obstruídos com efluente de esgoto doméstico tratado e precipitados de cálcio. O processo de lavagem ultrassônica foi comparado aos processos mais comuns de desobstrução de gotejadores, como a aplicação de ácido fosfórico (H_3PO_4) e a aplicação de cloro.

Foram realizados dois experimentos: no experimento 1, utilizou-se como agente de obstrução, água de esgoto doméstico tratado; no experimento 2 utilizou-se como agente de obstrução, água com elevado teor de cálcio.

Primeiramente foram instalados, na bancada de ensaios, três modelos de gotejadores, que foram operados com água residuária proveniente da estação de tratamento de esgoto do INSA (Instituto Nacional do Semiárido) por 1200 horas com o intuito de obstruir os gotejadores; depois deste período foram aplicados os tratamentos de desobstrução nos gotejadores obstruídos com água residuária.

No segundo experimento foram instalados na bancada de ensaios gotejadores novos, e procedeu-se então a operação do sistema com água com teor elevado de cálcio. Para isso foi feita uma solução de água e cal hidratada para simular uma água com elevado teor de cálcio (Carbonato de cálcio – $CaCO_3$, e Hidróxido de cálcio – $Ca(OH)_2$), e o sistema também foi operado durante 1200 horas, com monitoramento do desempenho hidráulico e depois da obstrução foram aplicados os tratamentos de desobstrução nos gotejadores obstruídos com a água contendo alto teor de cálcio.

Na fase de desobstrução de cada experimento, foram utilizados 5 tratamentos de desobstrução dos gotejadores: o tratamento proposto neste trabalho de lavagem ultrassônica, os processos convencionais de aplicação de ácido fosfórico e a aplicação de cloro, e outros dois tratamentos combinando a aplicação de ácido fosfórico com lavagem ultrassônica e a combinação da aplicação de cloro com lavagem ultrassônica.

5.1. Construção e caracterização do experimento

5.1.1. Localização do experimento

O experimento foi realizado no campo experimental da sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA\MCTi) no município de Campina Grande, no estado da Paraíba, Brasil (Figura 2) cujas coordenadas geográficas são: 7° 16' 20" S e 35° 56' 29" O, e altitude de 550 metros, a classificação de Koeppen é denominado *As*, para o clima da região. A coleta de dados do experimento 1 e do experimento 2 ocorreu entre junho de 2014 até fevereiro de 2015.



Figura 2. Localização do experimento no campo experimental da sede do Instituto Nacional do Semiárido: (A) bancada de ensaios, (B) vista do INSA, Campina Grande, PB, Brasil

5.1.2. Construção da bancada de ensaios

Para a realização dos experimentos foi construída uma bancada de ensaios em cota mais elevada que os reservatórios de água facilitando, assim, o retorno da água. A bancada foi construída sobre uma base de concreto em nível que era a parte superior da estação de tratamento de esgoto do INSA, facilitando a estabilidade da bancada uma vez que ela foi construída na área experimental para se aproximar o máximo possível das condições de campo.

A bancada de ensaios possuía 10,0 m de comprimento, 2,0 m de largura e 1,2 m de altura da base, facilitando o manejo e a coleta de dados. Para a coleta da água foi construída uma superfície com chapas de zinco onduladas (telhas de zinco) fixadas sobre cavaletes de madeira (Figura 3) para evitar o aquecimento das telhas às mesmas foram pintadas da cor branca. Sobre a bancada foram fixados arcos de ferro a 0,25 m de altura

das telhas de zinco, para fixar os gotejadores assim foi possível alocar os coletores de volume abaixo dos gotejadores.

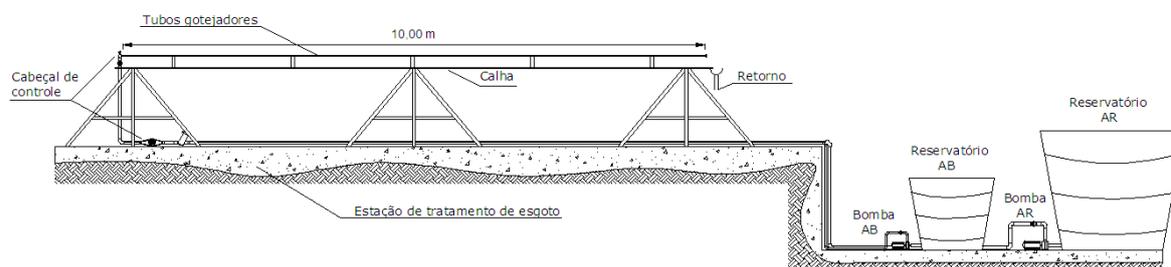


Figura 3. Layout da bancada de ensaios, com os detalhes e componentes. (desenho: F. D. Szekut)

A bancada de ensaios possuía os seguintes componentes: cavaletes de suporte, calhas de zinco e arcos de sustentação das linhas laterais dos gotejadores; reservatórios de água; tubulações e conexões; hidrômetro da marca LAO®, modelo UJB1, com vazão nominal de $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, para aferição do volume e vazão de água do sistema; filtros de disco de 200 mesh, marca IRRITEC® modelo FLD; registros do tipo gaveta de 1"; controladores de pressão de ação direta da marca BERMAD®, modelo 0075 PRVy, para controle de pressão do sistema; manômetros de glicerina do tipo tubo de Bourdon da marca GE com resolução de $0,10 \text{ Kg cm}^{-2}$, para aferição da pressão do sistema; conectores e as linhas laterais dos gotejadores.

Também havia duas motobombas, uma operando com água residuária no experimento 1, e água com cálcio no experimento 2, sendo esta com motor WEG®, 2 CV, 220 volts trifásico, com uma bomba KSB® modelo C 2000N, com vazão nominal de $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e altura manométrica de 24 mca. Outra motobomba foi usada para aplicação de água de abastecimento (gotejadores operando com água de abastecimento usada como controle da obstrução) da marca THOR®, modelo IDB 35, periférica, 220 volts monofásica $\frac{1}{2}$ HP, com vazão nominal de $2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e altura manométrica de 26 mca. A motobomba THOR de $\frac{1}{2}$ CV também foi utilizada na aplicação de produtos no processo na desobstrução e avaliação das linhas após a aplicação dos tratamentos, por operar um número de linhas menores.

A bancada foi construída com dois cabeçal de controle e um cabeçal poderia ser dividido em dois, permitindo acionar três seções da bancada. Havia uma seção em cada extremidade da bancada comportando três linhas laterais para controle e monitoramento da

vazão dos gotejadores, e também para aplicar os tratamentos na fase de desobstrução e avaliar somente os gotejadores de cada tratamento (Figura 4).

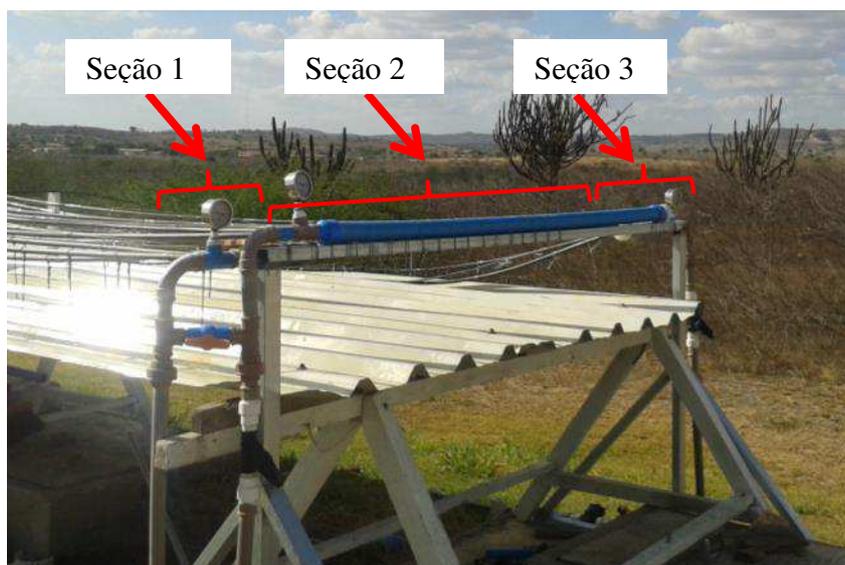


Figura 4. Divisão das seções de controle das linhas laterais da bancada de ensaios, seções 1 e 3 para monitoramento e individualização dos tratamentos, seção 2 para operação do sistema

Havia um painel de controle com temporizadores para o acionamento das motobombas diariamente, o que possibilitou diminuir erros nos horários de funcionamento dos sistemas.

5.1.3. Descrição dos experimentos

5.1.3.1. Experimento 1: Obstrução e desobstrução com o sistema operando com água residuária

No experimento 1, realizou-se a obstrução e a desobstrução dos gotejadores operando com água residuária, proveniente da estação de tratamento de esgoto doméstico do INSA. A fase de obstrução se deu no período de 25 de junho a 4 de outubro de 2014, e a fase de desobstrução se deu de 5 de outubro a 7 de novembro. Foram instalados sobre a bancada de ensaios, três tipos (modelos) de gotejadores distribuídos em dezoito linhas laterais sendo seis linhas de cada modelo de gotejador. Os gotejadores utilizados foram: Streamline16080 da Netafim; Taldrip da Naadanjain e Tiran16010 da Netafim.

Obstrução

Os gotejadores foram divididos em 2 grupos: grupo 1 (15 linhas laterais, sendo cinco de cada modelo de gotejador – seção 2 da bancada) para o monitoramento da obstrução dos gotejadores operando com água residuária de esgoto doméstico e grupo 2 (3 linhas laterais sendo uma de cada modelo de gotejador – seção 3 da bancada) para o monitoramento das condições hidráulicas operando com água de abastecimento (Figura 5) para comparação com a obstrução da água residuária e água com excesso de cálcio.

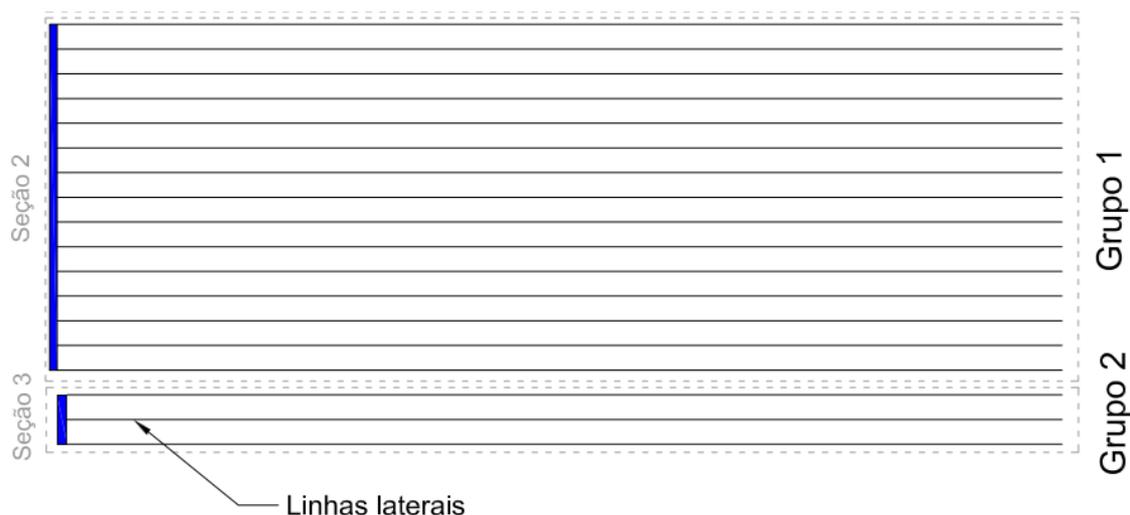


Figura 5. Divisão dos gotejadores na bancada de ensaios em dois grupos na fase de obstrução operando com água residuária (Grupo 1) e água de abastecimento (Grupo 2)

O sistema ficou em funcionamento por 1200 horas, e após a obstrução as linhas laterais de gotejadores que estava operado com água de abastecimento (grupo 2) foi descartada, pois o intuito era apenas verificar o comportamento de obstrução diante dos outros dois tipos de qualidade de água.

Desobstrução

Na segunda fase (fase de desobstrução) as 18 linhas laterais dos gotejadores foram divididas em 6 grupos de 3 linhas, sendo uma linha de cada modelo gotejador, porém foram utilizadas apenas 12 linhas laterais, sendo 3 grupos submetidos aos tratamentos de desobstrução, um grupo submetido a análise de microscopia (óptica e MEV) e os outros grupos foram descartados (Figura 6).

- Grupo 1 - Lavagem Ultrassônica: tratamento com o processo de lavagem ultrassônica;
- Grupo 2 - Acidificação: tratamento com aplicação de ácido fosfórico a pH 2;

- Grupo 3 - Cloração: tratamento com aplicação de cloro ativo.
- Grupo 4 foram retiradas amostras destrutivas para a análise microbiológica de microscopia do biofilme coletado no interior dos tubos e também para análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificação do tipo de estruturas aderidas aos gotejadores;
- Grupo 5 e 6 - foi descartada;

Os outros dois tratamentos de desobstrução realizados foram:

- Combinção do tratamento de acidificação com a lavagem ultrassônica , utilizando os mesmos gotejadores do grupo 2, que após receber o tratamento de acidificação passaram pela lavagem ultrassônica por 15 minutos.
- Combinção da cloração com a lavagem ultrassônica utilizando as mesmas linhas laterais do grupo 3, que após o tratamento de cloração as linhas foram submetidas à lavagem ultrassônica por 15 minutos dando origem ao quinto tratamento.

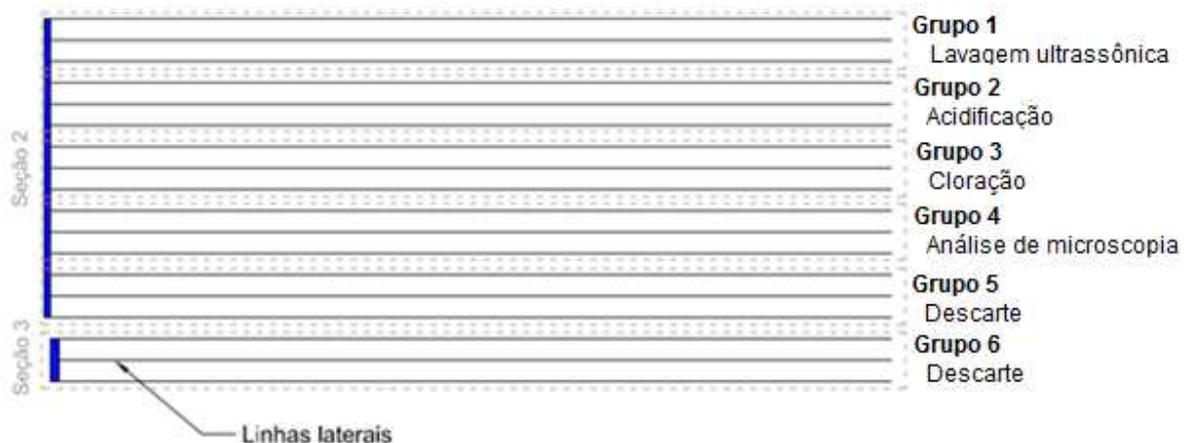


Figura 6. Divisão dos gotejadores na bancada de ensaios da fase de desobstrução do experimento 1

5.1.3.2. Experimento 2: Obstrução e desobstrução com o sistema operando com água com cálcio

O experimento 2 se iniciou após finalizar o experimento 1, ocorrendo na mesma bancada de ensaios utilizando-se toda a estrutura já construída, realizou-se, no entanto, uma limpeza nas tubulações e na motobomba. No experimento 2 o sistema operou utilizando água simulando a água de irrigação com teor elevado de cálcio. A fase de obstrução foi realizado no período de 01 de dezembro de 2014 à 30 de janeiro de 2015, e a fase de desobstrução foi no período de 31 de janeiro a 12 de fevereiro de 2015.

Foi preparada, semanalmente, uma solução de água com cálcio na concentração de $1,0 \text{ g L}^{-1}$ de cal hidratada, (90% de hidróxido de cálcio, que reagia e formava os precipitados químicos de cálcio) com o intuito de obstruir o sistema para aplicar os tratamentos de desobstrução, e depois foram aplicados os tratamentos de desobstrução dos gotejadores.

Obstrução

Na primeira fase do experimento 2, assim como no experimento 1, foram instaladas 15 linhas laterais na bancada de ensaios (5 linhas laterais de cada modelo de gotejador) particionadas em dois grupos. Um grupo tinha 3 linhas laterais (uma de cada modelo de gotejador) para o monitoramento da obstrução dos gotejadores durante as 1200 horas de operação da bancada. Outro grupo foi compreendido pelos demais gotejadores (12 linhas laterais – 4 de cada modelo de gotejador) submetidos à mesma água com cálcio pelo mesmo período de 1200 horas para serem utilizados na fase dos tratamentos de desobstrução (Figura 7).

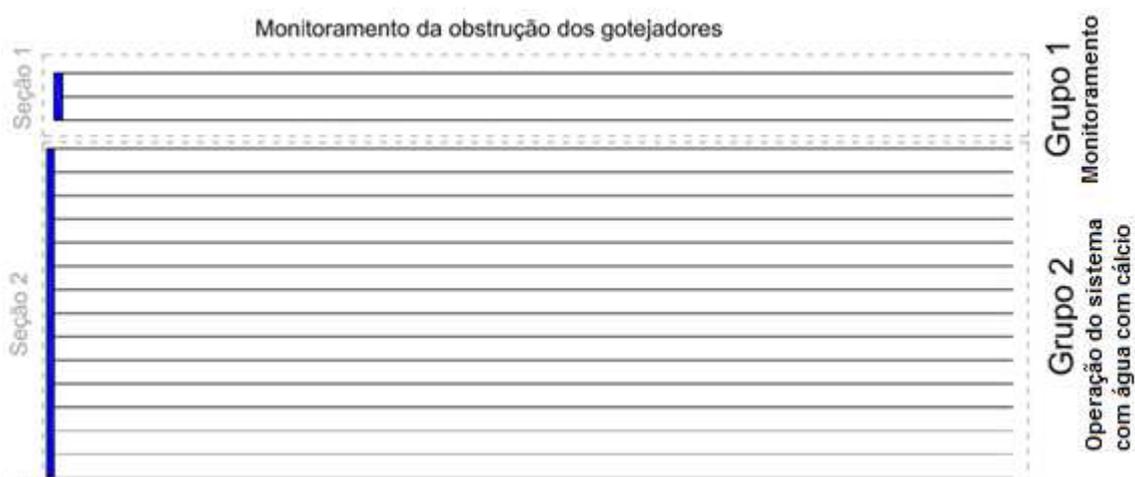


Figura 7. Divisão dos gotejadores na bancada de ensaios em dois grupos na fase de obstrução operando com água com cálcio (experimento 2)

Desobstrução

Na fase de desobstrução do experimento e com água com cálcio, as 15 linhas laterais foram divididas em 5 grupos contendo um modelo de gotejador por grupo. Os grupos foram submetidos aos seguintes tratamentos de desobstrução (Figura 8):

- Grupo 1 - Lavagem Ultrassônica: tratamento com o processo de lavagem ultrassônica;
- Grupo 2 - Acidificação: tratamento com aplicação de ácido fosfórico a pH 2;
- Grupo 3 - Cloração: tratamento com aplicação de cloro ativo.

- Grupo 4 foram retiradas amostras destrutivas para a análise microbiológica de microscopia do biofilme coletado no interior dos tubos e também para análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificação do tipo de estruturas aderidas aos gotejadores;
- Grupo 5 - foi descartada;

Assim como no experimento 1, os outros dois tratamentos de desobstrução realizados foram:

- Combinção do tratamento de acidificação com a lavagem ultrassônica , utilizando os mesmos gotejadores do grupo 2, que após receber o tratamento de acidificação passaram pela lavagem ultrassônica por 15 minutos.
- Combinção da cloração com a lavagem ultrassônica utilizando as mesmas linhas laterais do grupo 3, que após o tratamento de cloração as linhas foram submetidas à lavagem ultrassônica por 15 minutos dando origem ao quinto tratamento.



Figura 8. Divisão dos gotejadores na bancada de ensaios da fase de desobstrução do experimento 2

5.1.4. Características dos gotejadores testados

Para a realização dos experimentos foram selecionados 3 modelos gotejadores. A escolha considerou os gotejadores mais utilizados por agricultores na região em estudo do semiárido brasileiro, visto não serem autocompensantes e cujas características se encontram na Tabela 4.

Tabela 4. Características dos gotejadores utilizados nos ensaios de obstrução e desobstrução

Marca	Modelo	Vazão (L h ⁻¹)	Pressão (kPa)	Esp. Entre gotejadores (m)
NAADANJAIN	Taldrip	1,70	100	0,20
NETAFIM	Streamline 16080	1,60	100	0,30
NETAFIM	Tiran 16010	2,00	100	0,40

Os modelos da Netafim ainda apresentam as características do labirinto, o Streamline possui dimensões do labirinto de 0,66, 0,55 e 13 mm para largura, profundidade e comprimento respectivamente, o modelo Tiran também da Netafim, possui dimensões do labirinto de 0,76, 1,08 e 75 mm para largura, profundidade e comprimento, respectivamente.

Outro parâmetro importante verificado foi a curva característica dos gotejadores. Na Figura 9 são apresentadas as curvas características dos gotejadores em estudo. Em um trabalho realizado por Szekut (2015) foram realizados ensaios com água residuária de esgoto doméstico tratado, água de abastecimento e comparou as curvas características com a equação característica da vazão fornecida pelo catálogo.

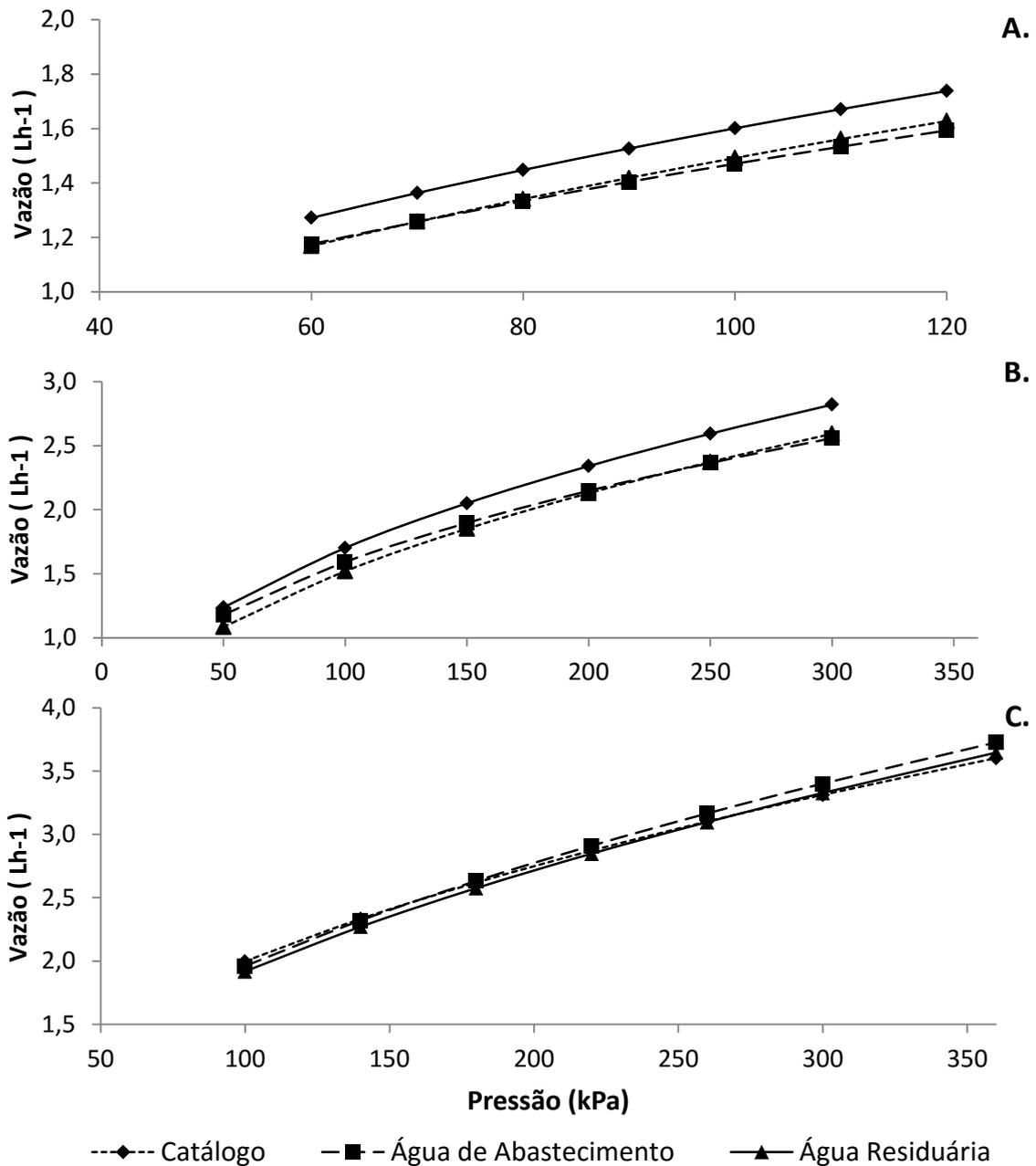


Figura 9. Curvas característica dos gotejadores operando com água residuária de esgoto doméstico tratado, água de abastecimento e a curva calculada pela equação de catálogo do fabricante, para os gotejadores Stremline (A) Taldrip (B) e Tiran (C).

5.1.5. Qualidade da água de irrigação

Para fins de caracterização dos componentes físicos, químicos e microbiológicos contidos na água utilizada nos experimentos e também a caráter de classificar o risco de obstrução que a água pode oferecer ao sistema de irrigação, foram realizadas análises de água dos reservatórios de água de abastecimento, água residuária e água com cálcio no início de cada experimento.

5.1.5.1. Análises microbiológicas

As análises microbiológicas foram realizadas pelo Laboratório de Referência em Dessalinização da Universidade Federal de Campina Grande (LABDES/UFCG) em Campina Grande, PB. A metodologia utilizada pelo laboratório foi o método enzimático de substrato definido, Colilert, resultando em parâmetros quantitativos de Coliformes totais e coliformes fecais (*Escherichia Coli*).

As amostras foram coletadas nos reservatórios da água de abastecimento, água residuária e água com cálcio na altura intermediária da lâmina de água. A coleta foi realizada com frascos de polietileno autoclavados, identificados e imediatamente levados ao laboratório, pois a análise microbiológica deveria ser realizada em até 24 horas após a coleta, sendo respeitadas as condições de temperatura da água dos frascos. Todas as coletas foram realizadas no período da manhã devido às temperaturas mais amenas e também à possibilidade de as análises serem realizadas ainda no mesmo dia, sem causar prejuízos às amostras.

No experimento 1 com água residuária, além da coleta no início, também foram realizadas coletas ao longo do experimento, uma vez que, a obstrução tem relação direta com a quantidade de coliformes na água de irrigação. As coletas para o monitoramento de coliformes totais e coliformes fecais do reservatório de água residuária foram adquiridas nos seguintes tempos: 0 h; 96 hs; 336 hs; 492 hs; 672 hs; 816 hs; 1032 hs e 1152 hs de funcionamento do sistema, que deu-se no período de 25 de junho à 04 de outubro de 2014.

A classificação em relação ao risco de entupimento de gotejadores de irrigação localizada foi realizada de acordo com Nakayama (1982) que preconiza que o número máximo de população bacteriana por mililitro deve ser menor que 10.000 para não haver nenhum risco, quando este valor estiver entre 10.000 e 50.000 o risco é moderado, e acima de 50.000, o risco de obstrução é severo.

5.1.5.2. Análises físico-químicas

As análises físico-químicas foram realizadas pelo Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) e pelo Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) localizados na Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) em Mossoró, RN.

As amostras de água para análises físico-químicas também foram coletadas nos reservatórios da água de abastecimento, água residuária de esgoto doméstico tratado e água com elevado teor de cálcio, na porção intermediária da altura da lâmina de água do reservatório. As amostras foram identificadas e acondicionadas em garrafas plástica de 2 L

(lavadas com água destiladas) e congeladas para preservar suas características e depois foram enviadas laboratórios.

Os parâmetros físico-químicos analisados foram: potencial hidrogeniônico (pH) a condutividade elétrica (CE) o Potássio (K) o Sódio (Na) o Cálcio (Ca) o Magnésio (Mg) o Cloreto (Cl) o carbonato, o bicarbonato, os sólidos suspensos (SS) os sólidos dissolvidos (SD) o Ferro total (Fe) e o Manganês (Mn) classificados conforme preconizado por Ayers and Westcot, (1991) Nakayama *et al.* (2006) Capra and Scicolone, (1998) em relação ao risco de obstrução para sistemas de irrigação por gotejamento.

5.1.6. Análises do material obstruidor dos gotejadores por meio de microscopia óptica e da microscopia eletrônica de varredura - MEV

Com o propósito de caracterizar o material que obstruiu os gotejadores, foi realizada a análise do material obstruidor formado pela água de abastecimento, água residuária e água com cálcio. As análises das amostras foram realizadas por identificação taxonômica, que identifica os microrganismos contidos na amostra, usada principalmente para a obstrução com água residuária. Também foram realizados análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para identificação das estruturas e formas do material aderido às paredes dos gotejadores. Depois do processo de lavagem ultrassônica nos gotejadores obstruídos com água com cálcio, também foram realizadas imagens pelo MEV para verificar a quantidade de material que ficou aderido ao gotejador após o tratamento.

5.1.6.1. Identificação taxonômica do material obstruidor por microscopia óptica

As amostras de água foram coletadas, identificadas e armazenadas conforme as normas da NBR 9898/85 para identificação taxonômica dos organismos presentes nas águas.

As amostras foram retiradas do interior dos gotejadores e acondicionadas em recipientes plásticos para realizar a avaliação microscópica utilizando pipeta simples e lâmina de microscopia óptica cujo procedimento consistiu em:

1 - Pipetar uma quantidade de amostra equivalente a 1 mL e coloca-lo sobre a lâmina de microscopia utilizando-se a técnica de esfregaço, que consiste em espalhar, com uma espátula e em sentido único, a água, sobre a lâmina, este procedimento foi realizado em triplicata.

2 - Além da técnica de esfregação também foi realizada a técnica de lâmina simples aquecida em Bico de Bunsen até total evaporação da água sobre a lâmina. Não foram utilizados corantes nem substâncias de neutralização ou fixação.

Após o preparo e a identificação das lâminas foi utilizado um microscópio óptico de marca Leica® para visualização de todas as lâminas nos aumentos de 4X, 10X, 40X e 100X. A técnica de visualização foi a de leitura de transectos do início ao fim da amostra, em todas as triplicatas.

No decorrer da avaliação microscópica eram realizadas fotografias digitais através de uma câmera acoplada ao microscópio e a um computador, para o registrar as principais visualizações de colônias bacterianas, bactérias isoladas e demais microrganismos identificados. Para a identificação em escala de gênero foi utilizada a técnica de chave taxonômica e posterior quadro comparativo de imagens.

5.1.6.2. Análises do material obstruidor por imagens do MEV

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta resolução e fornece rapidamente informações sobre a morfologia da amostra sólida identificando seus elementos químicos.

Para as análises das amostras com o equipamento MEV, foi retirada uma canaleta do labirinto de fluxo do gotejador de cada modelo após o processo de obstrução dos experimentos verificando, desta maneira, os elementos químicos existente no material obstruidor. Também foi feito, uma amostra pelo MEV dos gotejadores obstruídos com água com cálcio após o tratamento de lavagem ultrassônica.

Para melhorar o nível de emissão de elétrons as amostras são submetidas a um processo de metalização com íons metálicos de ouro e colocadas em uma câmara com pressão em torno de 0,1 a 0,05 mbar. O alvo metálico é bombardeado com átomos de gás inerte; com isto, os átomos do alvo são depositados sobre a amostra.

5.2. Obstrução dos gotejadores

i. Obstrução do sistema operando com água residuária – experimento 1

A bancada de ensaios ficou em operação por 1200 horas com água de esgoto doméstico tratado; este tempo é superior ao observado por LIU and HUANG (2009) que consideram o tempo de 1000 horas de operação em sistemas de irrigação localizada para provável obstrução severa dos gotejadores.

O sistema ficou operando 12 horas por dia, o acionamento da motobomba era diário a partir das 6:00 horas operando até as 18 horas de cada dia, totalizando o período de 100 dias e 1200 horas de funcionamento.

Neste primeiro experimento com água residuária foi realizado o monitoramento da vazão do sistema a cada 36 horas (3 dias) de 8 gotejadores de cada linha lateral, conforme proposto por Deniculi (1980) nas 15 linhas laterais do experimento. A avaliação de monitoramento da vazão dos gotejadores totalizou 120 pontos de coleta, sendo 40 gotejadores avaliados em cada tipo de gotejador. Paralelamente à avaliação das linhas laterais operando com água residuária, também foram avaliadas as 3 linhas laterais operando com água de abastecimento, para comparação das obstruções posteriormente.

A bancada de ensaios possuía calhas de coleta para realizar a circulação da água porém durante a operação da bancada havia perdas de água principalmente por evaporação, devido à exposição tempo, similar às condições reais de campo. Não houve reposição das perdas de água no experimento 1, porque havia fluxo contínuo de água residuária, provinda da estação de tratamento do INSA, estando disponível a todo momento para a operação da bancada uma vez que a motobomba foi conectada diretamente ao reservatório da água residuária proveniente da estação de tratamento.

ii. Obstrução do sistema operando com água com cálcio – experimento 2

No experimento utilizando água com elevado teor de cálcio, o tempo de operação para obstrução também foi de 1200 horas, ficando acima do tempo de 1000 horas, em que pode ocorrer obstrução severa, segundo Liu and Huang (2009). O sistema ficou em operação 20 horas diárias, totalizando 60 dias, o sistema era acionado às 14 horas e desligado às 10:00 horas do dia seguinte para que a motobomba não superaquecer durante o período com temperaturas elevadas do dia. O monitoramento da vazão dos gotejadores e a avaliação do sistema foram realizados a cada 120 horas, totalizando 10 avaliações.

Diferente do experimento 1, percebeu-se que não era necessário realizar o monitoramento de todas as linhas laterais do sistema, então no experimento 2, operando com água com elevado teor de cálcio, foi realizado o monitoramento periódico (a cada 120 horas) da vazão de uma linha lateral de cada modelo de gotejador.

No entanto todas as linhas laterais da bancada foram avaliadas no início (0 horas de funcionamento) e no final da fase de obstrução (1200 horas de funcionamento). Em cada linha lateral foram selecionados e marcados 25 gotejadores.

No experimento 2 foi instalado um reservatório de 1000 L ao lado da bancada de ensaios, e periodicamente era preparada uma solução de água e cálcio com a dosagem de 1 g de cal hidratada por litro de água, a cal hidratada possui aproximadamente 90% de hidróxido de cálcio, que reage com elementos químicos presentes na água, como CO_2 e se transforma em carbonato de cálcio (CaCO_3) ocorrendo o precipitado químico. A solução era reposta periodicamente devido às perdas, sobretudo por evaporação da água que ocorria na bancada.

iii. *Avaliação inicial dos gotejadores*

Para determinar os parâmetros de obstrução dos gotejadores, foi realizada a caracterização inicial de vazão dos gotejadores novos; para esta avaliação foi utilizada água de abastecimento. Os ensaios de vazão foram realizados na pressão de 100 kPa para todas as linhas laterais dos gotejadores, submetidos posteriormente à operação com as respectivas águas de obstrução, água residuária no experimento 1 e água com cálcio no experimento 2.

Os gotejadores foram selecionados e marcados; desta maneira, sempre eram avaliados os mesmos gotejadores não permitindo, assim, erros com o monitoramento e avaliação de gotejadores diferentes daqueles avaliados inicialmente.

Com os gotejadores selecionados e marcados foi coletado o volume de água de cada gotejador com o auxílio de copos plásticos pelo tempo de 4 minutos contabilizados por cronômetros; depois o volume era medido com provetas. A metodologia de coleta de volume para o cálculo de vazão seguiu as recomendações da ABNT/NBR ISO 926:2006, que preconizam um tempo mínimo de coleta de 3 minutos, sendo medido por meio de provetas graduadas e posteriormente realizado o cálculo de vazão.

Para tentar diminuir os erros que podem ocorrer quando a coleta não é simultânea em todos os pontos, foi montada uma bandeja de poliestireno com encaixe para que sejam inseridos vários copos coletores realizando-se assim; a coleta simultânea de um conjunto de pontos (Figura 10).



Figura 10. Placa de poliestireno com encaixe para 15 copos coletores de volume para coleta simultânea

Com a medida do volume e o tempo foi calculada a vazão de cada gotejador e, conseqüentemente, a vazão de cada linha lateral, conforme a Equação 1.

$$Q_{\text{gotejador}} = \text{Volume}_{\text{gotejador}} / \text{tempo de coleta}_{\text{gotejador}}$$

[1]

Em que:

$Q_{\text{gotejador}}$ – Vazão do gotejador em $L h^{-1}$

$\text{Volume}_{\text{gotejador}}$ – Volume de água do coletor de cada gotejador (L);

$\text{Tempo de coleta}_{\text{gotejador}}$ – Tempo de coleta do volume de cada gotejador (h).

Outro parâmetro realizado na caracterização inicial dos gotejadores foi o cálculo do coeficiente de variação (CV) (Equação 2) o qual deve ter o valor máximo de 7% em tubos de irrigação localizada, conforme descrito pela ABNT/NBR ISO 926:2006.

Coeficiente de variação – CV:

$$CV = \frac{s}{\bar{q}} 100 \quad [2]$$

Em que:

CV – Coeficiente de Variação;

S - Desvio padrão da vazão dos gotejadores, L h⁻¹;

Q - Vazão média dos gotejadores, L h⁻¹.

A classificação do CV também foi utilizada para realizar monitoramento no processo de obstrução dos gotejadores, e depois o CV foi utilizado como parâmetro de eficiência dos tratamentos de desobstrução dos gotejadores, seguindo a classificação descrita pela ASABE (2008) (Tabela 5).

Tabela 5. Classificação do sistema de irrigação por gotejamento de acordo com o coeficiente de variação dos gotejadores segundo ASABE (2008)

Tipo de emissor	CV(%)	Classificação
Gotejadores com saída pontual	< 5	Excelente
	5 a 7	Médio
	7 a 11	Marginal
	11 a 15	Deficiente
	> 15	Inaceitável

Os coeficientes de uniformidade dos sistemas de irrigação por gotejamento também são outro parâmetro indicativo da qualidade do sistema de irrigação. Nesta fase de caracterização dos gotejadores foram calculados os seguintes coeficientes: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) (Equação 3); Coeficiente de Uniformidade de Crishiansen (CUC) (Equação 4) e Coeficiente de Uniformidade Estatístico (UE) (Equação 5). Porém no monitoramento foram calculados apenas o Coeficiente de variação (CV) CUC, vazão e o grau de entupimento (GE) (equação 6).

Coeficiente de uniformidade de distribuição – CUD:

$$CUD = \frac{Q_{25\%}}{\bar{Q}} \times 100 \quad [3]$$

Em que:

CUD – Coeficiente de Uniformidade de Distribuição, %;

$Q_{25\%}$ - Vazão média das 25% menores descargas dos gotejadores Lh⁻¹;

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

O CUD é classificado de acordo com ASABE (1996) conforme consta na Tabela 6.

Tabela 6. Classificação do sistema de irrigação de acordo com os valores do coeficiente de uniformidade de distribuição, segundo ASABE (1996)

CUD (%)	Classificação
> 90	Excelente
75-90	Bom
62-75	Regular
50-62	Ruim
< 50	Inaceitável

Coeficiente de uniformidade de Christiansen – CUC:

$$CUC = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - \bar{Q}|}{n_e \times \bar{Q}} \right] \quad [4]$$

Em que:

CUC – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, %;

Q_i – Vazão de cada emissor, L h⁻¹;

n_e – Número de gotejadores.

A classificação do sistema de irrigação, de acordo com os valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) é apresentada na Tabela 7, de acordo com BERNARDO *et al.* (2006).

Tabela 7. Classificação do sistema de irrigação de acordo com os valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen, segundo Bernardo *et al.* (2006)

CUC	Classificação
Excelente	> 90%
Bom	80 - 90%
Regular	70 - 80%
Ruim	60 - 70%
Inaceitável	< 60%

Coeficiente de uniformidade estatístico – UE:

$$UE = 100 (1 - CV) \quad [5]$$

Em que:

UE - Uniformidade Estatística, %.

A classificação do sistema para valores obtidos da UE, segundo FAVETTA and BROTEL (2001) estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Classificação do sistema de irrigação de acordo com os valores do coeficiente de uniformidade estatístico, segundo Favetta and Brotel (2001)

Us (%)	Classificação
> 90	Excelente
80 a 90	Muito Bom
70 a 80	Regular
60 a 70	Péssimo
< 60	Inaceitável

A caracterização inicial dos gotejadores foram realizadas através dos cálculos já descritos porém outro parâmetro que foi calculado a partir da caracterização inicial, o qual auxiliará no monitoramento e posteriormente na eficiência dos tratamentos de desobstrução foi o grau de entupimento dos gotejadores (GE); ele foi calculado a partir da vazão de caracterização, ou vazão inicial dos gotejadores descrito na Equação 6.

$$GE = \left(1 - \frac{Q_{usado}}{Q_{inicial}}\right) 100 \quad [6]$$

Em que:

GE - Grau de Entupimento, %;

Q_{usado} - Vazão média dos gotejadores, quando usados, $L h^{-1}$;

$Q_{inicial}$ - Vazão média dos gotejadores, quando novos, $L h^{-1}$.

Todos estes cálculos de coeficientes, além de serem utilizados na caracterização inicial dos gotejadores, também foram utilizados no monitoramento de obstrução dos mesmos, e posteriormente na desobstrução. Foi realizado um comparativo da obstrução de cada gotejador diante dos diferentes gotejadores; também se verificou a eficiência de cada tratamento de desobstrução através do GE. Foi realizada a estatística descritiva dos dados através do Software Excel® e pelo Software estatístico MiniTab®.

5.3. Desobstrução dos gotejadores

Foram aplicados cinco tratamentos de desobstrução nos três modelos de gotejadores, sendo os seguintes tratamentos:

- Processo de lavagem ultrassônica;
- Aplicação de ácido fosfórico a pH 2;
- Aplicação de cloro,
- Combinação da aplicação de ácido fosfórico com a lavagem ultrassônica, e;
- Combinação da aplicação de cloro com a lavagem ultrassônica.

Os procedimentos dos tratamentos de desobstrução foram realizados da mesma maneira no experimento 1 com água residuária onde havia obstrução devido a formação de biofilme, e no experimento 2, onde a obstrução foi causada por precipitados químicos de cálcio.

Antes de se iniciar os tratamentos os gotejadores foram avaliados para caracterizar as condições hidráulicas; após terem sido submetidos à obstrução, cada gotejador foi identificado para que pudessem ser aplicados os tratamentos comparando o desempenho hidráulico com os valores antes da aplicação dos tratamentos. Após o tempo de cada tratamento, os mesmos gotejadores, já marcados, eram avaliados com a coleta do volume por um período de 4 minutos, sendo calculadas a vazão e GE, verificando a melhora no desempenho do gotejador.

Em cada tratamento de desobstrução houve diferentes tempos de tratamentos, sendo que em cada tempo de tratamento os gotejadores eram avaliados:

- ✓ Tratamento com lavagem ultrassônica: T1 – 5 min; T2 – 15 min; T3 – 30 min, e; T4 – 60 min de lavagem ultrassônica;
- ✓ Tratamento com acidificação: T1 – 12 hs; T2 – 24 hs e; T3 – 36 hs de aplicação do ácido.
- ✓ Tratamento com cloração: T1 – 12 hs; T2 – 24 hs e; T3 – 36 hs de aplicação do cloro.
- ✓ Tratamento com acidificação mais lavagem ultrassônica: T1 – 12 hs; T2 – 24 hs; T3 – 36 hs de aplicação do ácido e T4 (TS) – 15 minutos de lavagem ultrassônica.
- ✓ Tratamento com cloração: T1 – 12 hs; T2 – 24 hs; T3 – 36 hs de aplicação do cloro, e; T4 (TS) – 15 minutos de lavagem ultrassônica.

Foi realizado a comparação de médias dos valores de grau de entupimento (GE) entre os tratamentos para cada modelo de gotejador, com significância de 5% pelo Teste T. Também foi realizado a comparação de médias dos valores absolutos do aumento de vazão (Q+) promovido diante de cada tempo de tratamento (T1, T2, T3 e T4) para cada modelo de gotejador, pelo teste Tukey, a 5% de significância, em cada tratamento havia 25 repetições, sendo as repetições o número de gotejadores por linha laterais submetida em cada tratamento e seus tempos de desobstrução. O software utilizado para as análises estatísticas foi o Minitab®.

5.3.1. Desobstrução pelo processo de lavagem ultrassônica

O equipamento utilizado para realizar o tratamento de desobstrução pelo processo de lavagem ultrassônica foi uma lavadora ultrassônica da marca Altsonic Clean, com capacidade do tanque de 30L; ela emite ondas de Ultrassom de frequência de 40 kHz; possui uma bandeja perfurada para alocar, da melhor maneira, o objeto a ser lavado e também para não permitir o contato direto com as paredes do tanque da lavadora. Foi utilizado, para auxiliar no processo de lavagem, um detergente enzimático próprio para ser utilizado em lavadoras ultrassônicas.

Os gotejadores foram retirados da seção 2 (meio da bancada) e inseridos na seção 1 (lateral da bancada de ensaios) onde tinha o cabeçal de controle individual de três linhas de gotejadores. Após a instalação, as linhas foram avaliadas na pressão de 100 kPa com água de abastecimento; depois, as linhas laterais foram retiradas da bancada e inseridas na solução do tanque da lavadora ultrassônica, o qual continha água com detergente enzimático para auxiliar no processo de lavagem; após serem inseridas no tanque a lavadora era ligada no tempo de cada tratamento.

Para realizar o processo de lavagem ultrassônica, as linhas laterais foram submetidas à quatro tempo de lavagem, sendo 5, 10, 15 e 30 minutos, o tempo somado de lavagem de cada linha lateral de gotejadores foram de 5 min, 15 (5+10) min, 30 (5+10+15) min e 60 (5+10+15+30) minutos. Este processo foi repetido para cada um dos 3 modelos de gotejadores avaliados. Após cada tempo de lavagem ultrassônica, as linhas laterais de gotejadores eram inseridas novamente na bancada, e abertos os finais de linhas para a retiradas das impurezas, em seguida os finais de linhas eram fechados e realizava-se a avaliação dos mesmos gotejadores do início do experimento a pressão de 100 kPa.

5.3.2. Desobstrução com acidificação

Foi utilizado ácido fosfórico (H_3PO_4) no tratamento de acidificação. Para realizar a desobstrução com o processo de acidificação foram retiradas e identificadas três linhas laterais de gotejadores obstruídos da seção 2 da bancada (uma linha lateral de cada modelo de gotejador) e instaladas na seção 1, onde é possível ter o controle individual de cada linha lateral de gotejadores. Cada modelo de gotejador foi avaliado através da coleta do volume de 25 gotejadores identificados (numero de repetições de cada tratamento) pelo tempo de 4 minutos, calculando-se assim, a vazão e os coeficientes. Dessa maneira foi realizada a caracterização da recuperação das condições hidráulicas dos gotejadores, avaliando a vazão antes e depois dos tratamentos de desobstrução.

Foi preparada, em um reservatório de 80 L, uma solução de ácido fosfórico com água, diminuindo o pH da água para 2. Para isso adicionou-se ácido gradualmente no tanque, sendo monitorado através de um pHmêtro portátil (Marca: TecnoPON, modelo: mPA – 210P) até o pH ficar estabilizado em 2; depois das linhas laterais terem sido avaliadas, foi aplicada a solução nas linhas obstruídas pelo tempo de 10 minutos, o sistema foi fechado e desligado mantendo o ácido no interior dos gotejadores, que ficaram em repouso durante 12 horas.

Depois do repouso de 12 horas foi realizada a abertura do final das linhas de gotejadores e o sistema foi ligado com água de abastecimento para a lavagem das linhas; após a lavagem das linhas o sistema foi pressurizado até a pressão de 100 kPa para novamente fazer a avaliação dos gotejadores já identificados; depois da avaliação foi aplicado ácido novamente pelo tempo de 10 minutos deixando-se em repouso por 12 horas. Este procedimento de aplicação de ácido e avaliação foi realizado 3 vezes.

5.3.3. Desobstrução com cloração

Para realizar a desobstrução com o processo de cloração, foram retiradas e identificadas três linhas laterais obstruídas da seção 2 da bancada (uma linha lateral de cada modelo de gotejador) elas foram instaladas na seção 1, na qual é possível ter o controle individual de cada linha lateral de gotejadores. Cada linha lateral de gotejadores foi avaliado através da coleta do volume, de 25 gotejadores identificados (numero de repetição dos tratamentos), pelo tempo de 4 minutos, calculando assim, a vazão e os

coeficientes, sendo realizada a caracterização dos valores de vazão e GE dos gotejadores obstruídos, antes de iniciar o processo de desobstrução e depois de aplicar os tratamentos de desobstrução.

Uma solução de cloro foi preparada em um reservatório de 80 L, com a dosagem de 5 g de cloro livre (100%) utilizados comercialmente para limpar piscinas (proporção de $62,5 \text{ mg L}^{-1}$); o pH foi baixado com ácido fosfórico para 5,5, e monitorado pelo pHmêtro portátil. Esta proporção foi utilizada com base no trabalho de Teixeira *et al.* (2008), que verificaram que a proporção de 50 mg L^{-1} de cloro livre desobstruiu os gotejadores, sendo abaixado o pH entre 5,5 e 6,0 para melhor ação do cloro.

A solução com cloro foi aplicada nas linhas laterais obstruídas durante 10 minutos e depois o sistema foi fechado e a motobomba desligada mantendo a solução com cloro no interior das linhas laterais gotejadoras, que permaneceram em repouso pelo tempo de 12 horas; depois de 12 horas foi realizada a abertura do final das linhas de gotejadores, o sistema foi ligado com água de abastecimento para a lavagem dos gotejadores e em seguida os finais de linhas foram fechados; depois, o sistema foi pressurizado até a pressão de 100 kPa para novamente fazer a avaliação dos gotejadores identificados e depois da avaliação foi aplicado cloro novamente pelo tempo de 10 minutos deixando-se em repouso durante 12 horas. Este procedimento de aplicação de cloro e a avaliação foram realizados 3 vezes.

5.3.4. Desobstrução com acidificação+lavagem ultrassônica

Para testar a combinação dos dois tratamentos foi realizada, após o tratamento utilizando o ácido fosfórico uma etapa de lavagem ultrassônica das linhas laterais durante 15 minutos, sendo avaliadas novamente para obtenção da eficiência de um tratamento combinado.

A avaliação se deu como nos outros tratamentos, mediante a coleta dos mesmos 25 gotejadores do volume no tempo de 4 minutos, e só então calculado os coeficientes.

5.3.5. Desobstrução com cloração+lavagem ultrassônica

Da mesma maneira como foi realizado o ácido foi feita com o cloro; após o tratamento com a aplicação do cloro foi realizado a lavagem ultrassônica das linhas laterais dos gotejadores, que foram avaliados novamente para verificar a eficiência do tratamento em conjunto. A avaliação se deu como nos outros tratamentos, mediante a coleta dos mesmos 25 gotejadores do volume no tempo de 4 minutos, só então calculado os coeficientes.

Após a coleta de dados foi calculados a vazão dos gotejadores após cada tratamento de desobstrução e também o grau de entupimento, em cada tratamento havia 25 repetições (numero de gotejadores avaliados por linha lateral). A comparação de médias entre os tratamentos foi feita pelo teste T e teste Tukey a 5 % de significância, pelo software estatístico Minitab®.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização dos parâmetros do experimento

6.1.1. Caracterização das diferentes qualidades de água

As análises da água para caracterizar os parâmetros químicos e microbiológicos da água de abastecimento, água residuária de esgoto doméstico tratado e água com cálcio utilizada nos experimento, são apresentadas nas Tabela 9 e Tabela 10.

Na Tabela 9 é possível observar alguns valores que estão fora dos padrões estabelecidos para qualidade de água para irrigação. De acordo com Ayers and Westcot (1976 e 1991) e Aragues *et al.* (1979) o pH da água com cálcio (pH= 9) é considerado de alto risco de obstrução devido à precipitação química de carbonatos e bicarbonatos. Segundo Nakayama (1982) quando os valores de pH, da água de irrigação por gotejamento estão acima de 8, do considerado risco severo de entupimento dos gotejadores. Ainda conforme Nakayama (1982) para os três tipos de água, o risco de entupimento é considerado moderado em relação aos Sólidos Totais Dissolvidos, o qual possui uma faixa para essa classificação entre 500 e 2000 mg L⁻¹.

Segundo Doneen (1975) e Pizarro (1996) os principais sais que possuem as menores solubilidades com maior capacidade de precipitar e, conseqüentemente, os que oferecem maiores riscos de obstrução a gotejadores de irrigação localizada, são os carbonatos de cálcio e magnésio. Conforme se verifica na Tabela 9, os valores de dureza em cálcio é de 26, 48 e 79 mg L⁻¹ respectivamente para água de abastecimento, água residuária e água com cálcio. O risco de obstrução química é maior na água com cálcio agrava quando a este é associado um pH elevado.

Outro fator relacionado aos precipitados de cálcio é o *índice de saturação de Langelier – ISL* (NAKAYAMA & BUCKS, 1986) em que os valores positivos indicam o risco de precipitação de carbonato de cálcio na água de irrigação. Desta maneira é possível verificar, na Tabela 9, que o risco por precipitados de carbonato de cálcio existe apenas para a água com cálcio, o qual possui o valor de *ISL* de 1,81 e para água de abastecimento e água residuária este valor é negativo, não apresentando risco de entupimento.

Tabela 9. Caracterização química das águas utilizadas no experimento

Parâmetros	Resultados		
	Água de Abastecimento	Água Residuária	Água com cálcio
Condutividade Elétrica (mmho cm ⁻¹ a 25°C)	1092,00	2139,00	2860,00
pH	6,60	7,60	9,00
Turbidez (uT)	0,70	3,30	5,20
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co L ⁻¹)	0,00	110,00	100,00
Dureza em Cálcio (mg L ⁻¹)	26,60	48,00	79,50
Dureza em Magnésio (mg L ⁻¹)	35,00	37,20	30,00
Dureza Total (mg L ⁻¹)	212,50	275,70	323,80
Sódio (mg L ⁻¹)	148,90	234,70	521,80
Potássio (mg L ⁻¹)	5,30	60,60	8,20
alumínio (mg L ⁻¹)	0,13	0,09	0,00
Ferro Total (mg L ⁻¹)	0,01	0,08	0,08
Alcalinidade em Hidróxidos (mg L ⁻¹)	0,00	0,00	0,00
Alcalinidade em Carbonatos (mg L ⁻¹)	0,00	0,00	210,00
Alcalinidade em Bicarbonatos (mg L ⁻¹)	84,00	203,20	85,00
Alcalinidade Total (mg L ⁻¹)	84,00	203,20	295,00
Sulfato (mg L ⁻¹)	34,40	114,30	67,10
Fósforo Total (mg L ⁻¹)	0,00	10,70	0,00
Cloreto (mg L ⁻¹)	305,30	388,70	777,50
Nitrato (mg L ⁻¹)	0,04	0,66	0,75
Nitrito (mg L ⁻¹)	0,00	0,03	0,19
Amônia (mg L ⁻¹)	0,45	21,40	6,46
Sílica (mg L ⁻¹)	3,70	6,20	5,00
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-1,57	-0,02	1,81
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C) (mg L ⁻¹)	662,40	1160,00	1726,20

Outros fatores observados no que confere à qualidade de água no experimento, foram as características microbiológicas das três águas utilizadas no início de cada experimento. Os valores também estão acima do recomendado para irrigação localizada, conforme a Tabela 10.

Tabela 10. Caracterização microbiológica das águas utilizada no experimento

Parâmetros	Resultados		
	Água de Abastecimento	Água Residuária	Água com cálcio
Coliformes Totais (UCF)	520,00	10112,00	10112,00
<i>Escherichia Coli</i> (UFC)	0,00	9139,00	63,00

Conforme verifica-se na Tabela 10, os valores de Coliformes Totais são de 520, 10112 e 10112 unidades formadoras de colônias (UFC) para água de abastecimento, água residuária e água com cálcio, respectivamente no início do experimento. Segundo Nakayama (1982) os valores de UFC para a água de abastecimento não oferecem risco de obstrução para sistemas de irrigação por gotejamento, diferentemente dos valores de água residuária e água com cálcio, que apresenta risco moderado de entupimento.

Os valores de coliformes totais, *Escherichia Coli* e limite de UFC para obstrução de gotejadores de irrigação localizada do experimento com água residuária estão apresentados na Figura 11. É possível observar a variação das UFC durante as 1200 horas do experimento com água residuária.

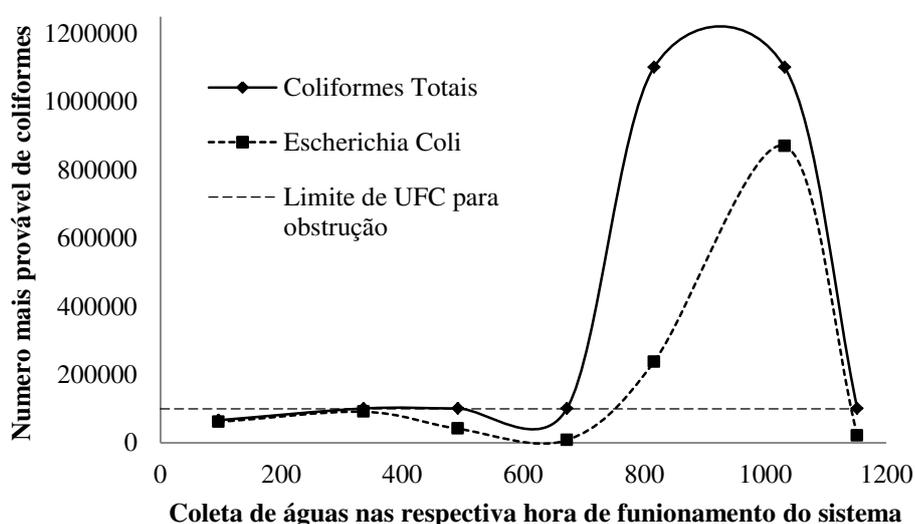


Figura 11. Monitoramento microbiológico do número de Coliformes Totais e *Escherichia Coli* durante a operação do experimento com água residuária.

É possível verificar, na Figura 11, que em alguns momentos do experimento o número de coliformes se eleva ultrapassando o valor de 100.000 UFC. Segundo Nakayama (1982) os riscos de entupimento de gotejadores de irrigação por gotejamento passaram de moderado para severo quando os valores ultrapassaram 100.000 UFC.

Conforme verifica-se nas análises de água, os sistemas de irrigação tendem a se obstruir devido às qualidades de água utilizada nos experimentos. O experimento operando com água residuária possui números elevados de unidades formadoras de colônias bacterianas, os quais levam à formação do biofilme e, em contrapartida a obstrução dos gotejadores. O experimento operando com excesso de cálcio com pH elevado e *índice de saturação de langelier* alto, leva a precipitação química com a possibilidade também de obstruir os gotejadores.

Tal como a obstrução, é possível aplicar os tratamentos de desobstrução posteriormente, porém estes padrões de qualidade de água, não são muito diferentes dos utilizados por agricultores, seja pela displicência, não se importando com tal fator, ou por menosprezar a qualidade de água, os agricultores expõem os sistemas as possíveis obstruções dos gotejadores assim eles terão que utilizar tratamentos de desobstrução eficazes para continuar a utilizar seus sistemas com águas de menor qualidade.

6.1.2. Caracterização inicial dos gotejadores novos

Na Tabela 11 são apresentadas as características hidráulicas dos gotejadores os quais foram operados com água residuária no experimento 1.

Tabela 11. Caracterização hidráulica inicial dos gotejadores novos do experimento com água residuária de acordo com os tratamentos de desobstrução

Tratamentos	Acidificação			Cloração			Lavagem ultrassônica		
	Taldrip	Strenline	Tiran	Taldrip	Strenline	Tiran	Taldrip	Strenline	Tiran
Gotejador									
Vazão média (L h⁻¹)	1,56	1,44	1,93	1,56	1,44	1,94	1,56	1,45	1,90
Desvio Padrão	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,10
CV (%)	0,82	1,43	1,81	1,31	1,69	1,76	1,12	1,37	5,33
CUC (%)	99,30	98,85	98,57	98,91	98,82	98,80	99,05	98,95	96,19
CUD (%)	99,00	98,06	97,60	98,37	97,89	97,85	98,58	98,46	92,91
CUE (%)	99,18	98,57	98,19	98,69	98,31	98,24	98,88	98,63	94,67

Verifica-se na Tabela 11, que os valores dos coeficientes de uniformidades estão todos acima 90% sendo, respectivamente, classificados como excelentes. O CV também apresenta baixos valores, menores que 7%, conforme limite estabelecido pela ABNT/NBR ISO 926:2006.

No experimento 2, com água com elevado teor de cálcio, os gotejadores também eram novos; e, dessa maneira, também foi realizada a caracterização hidráulica inicial dos gotejadores, que estão apresentados na Tabela 12.

Na caracterização hidráulica dos gotejadores funcionando no experimento 2 com água com cálcio (Tabela 12) apenas o gotejador Tiran, que na fase de desobstrução foi submetido ao tratamento de lavagem ultrassônica, apresentou um CUD de 89,62%, sendo classificado em uma faixa abaixo da excelentes; porém todos os outros gotejadores foram classificados como excelentes apresentando valores acima de 90%.

Tabela 12. Caracterização hidráulica inicial dos gotejadores do experimento com água com elevado teor de cálcio de acordo com os tratamentos de desobstrução

Tratamentos	Acidificação			Cloração			Lavagem ultrassônica		
	Taldrip	Streamline	Tiran	Taldrip	Streamline	Tiran	Taldrip	Streamline	Tiran
Gotejador									
Vazão média (L h⁻¹)	1,52	1,41	1,84	1,51	1,41	1,92	1,52	1,43	1,78
Desvio Padrão	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,13	0,03	0,02	0,14
CV (%)	1,56	1,89	1,33	2,58	1,87	6,87	1,80	1,63	7,88
CUC (%)	98,71	98,53	98,89	98,46	98,48	96,08	98,82	98,81	94,94
CUD (%)	97,92	97,45	98,30	97,43	97,80	91,84	98,69	97,81	89,62
CUE (%)	98,44	98,11	98,67	97,42	98,13	93,13	98,20	98,37	92,12

O CV dos gotejadores apresentou valores abaixo de 7,0%, limite máximo estabelecido pela ABNT/NBR ISO 926:2006 para considerar aceitável, porém o gotejador Taldrip que na fase de desobstrução foi submetido à lavagem ultrassônica apresentou valor de CV igual a 7,9% ultrapassando o estabelecido pela ABNT.

A caracterização hidráulica inicial dos gotejadores é primordial para a verificação de obstrução e desobstrução, pois ela serve de referencia de o quão eficazes os gotejadores iniciaram a operação de irrigação. Durante a operação do sistema é possível monitorar a velocidade de obstrução comparando com as condições iniciais e verificar quais os parâmetros hidráulicos que mais são afetados. Após a obstrução dos gotejadores quando se aplicam os tratamentos de desobstrução, é possível comparar o efeito dos tratamentos nos gotejadores através das características hidráulicas iniciais, ou seja, se após os tratamentos o gotejador recuperou suas condições iniciais ou quão próximas ficou delas. Segundo Patil *et al.* (2013) a qualidade da irrigação de um sistema de irrigação por gotejamento é verificada pelo desempenho hidráulico do emissor.

6.2. Obstrução dos gotejadores

6.2.1. Monitoramento da obstrução dos gotejadores

Na Figura 12 estão apresentados os valores dos coeficientes CV e CUC dos gotejadores obtidos no experimento com água de abastecimento.

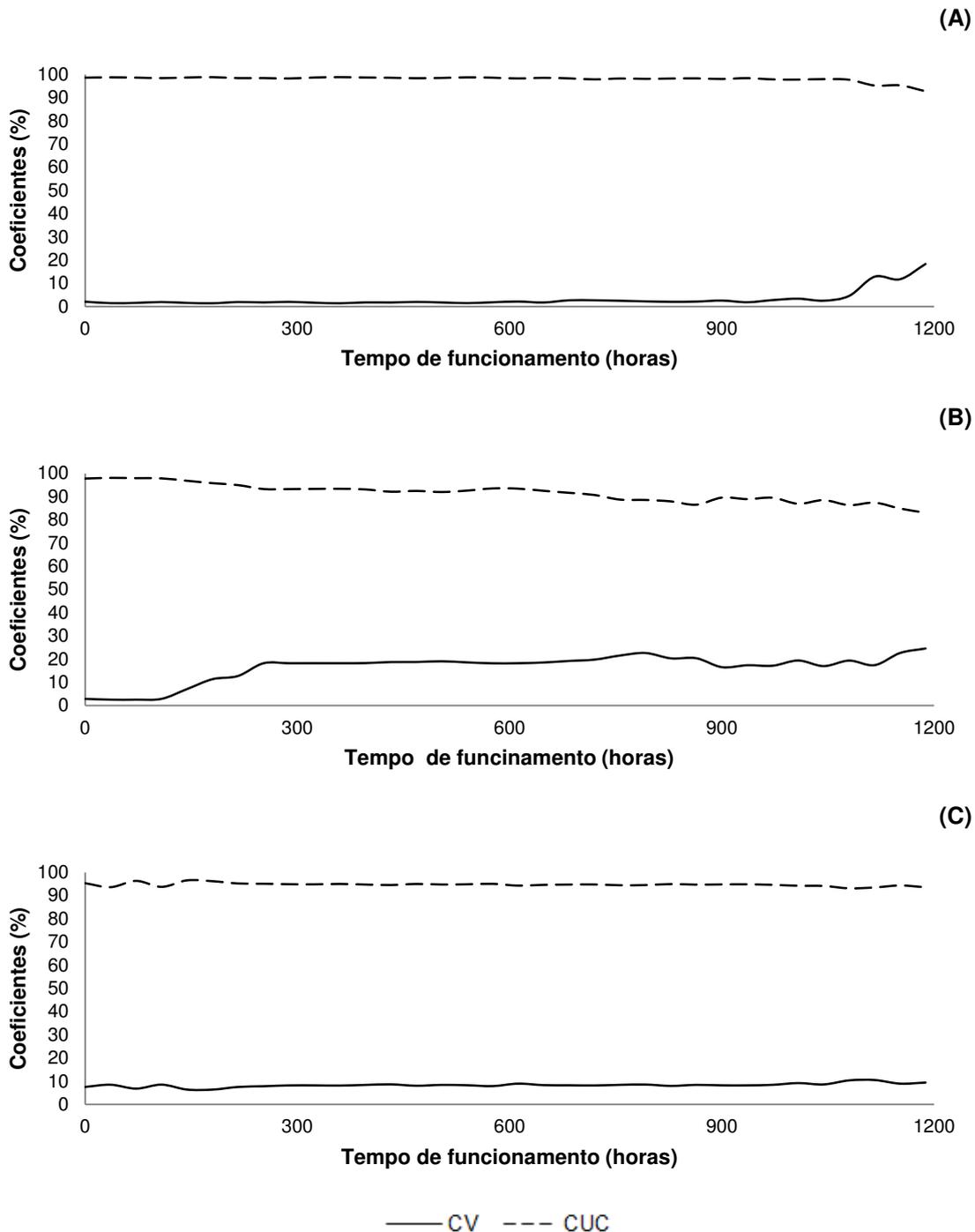


Figura 12. Coeficiente de variação(CV) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) no monitoramento dos gotejadores Taldrip (A), Streamline (B) e Tiran (C) durante o tempo de funcionamento com água de abastecimento.

Na Figura 12 o valor de CUC do gotejador Streamline começou a diminuir a partir de 300 horas de funcionamento, porém mesmo assim ficou acima de 84% no final das 1200 horas de funcionamento. Já o CV teve valores de 24,5%, no final do experimento. Apesar de ser uma água de boa qualidade, o desempenho hidráulico do gotejador Streamline foi afetado desde as 300 horas de funcionamento, e o gotejador Taldrip teve seu

desempenho afetado apenas no final do experimento de obstrução com água de abastecimento.

Ainda na Figura 12 os gotejadores Tiran e Taldrip apresentaram, no decorrer do experimento com 1200 horas de funcionamento, desempenho satisfatório. O gotejador Tiran manteve o CV em torno de 11%. O gotejador Taldrip manteve seu desempenho praticamente igual, com elevada uniformidade de distribuição em torno de 98% e CV abaixo de 4% até 1000 horas de funcionamento, mesmo assim, seu desempenho foi afetado nas 200 horas finais, e o CV chegou a valores acima dos 18%.

A Figura 13. Apresenta o desempenho hidráulico do sistema com água residuária de esgoto doméstico tratado durante as 1200 horas de funcionamento. Houve um declínio acentuado nos gotejadores Taldrip e Tiran, em que o CUC chegou a valores abaixo de 33%. Os valores de CV chegaram a valores de 78 e 90%, respectivamente, para Taldrip e Tiran, valores estes, inaceitáveis para sistemas de irrigação localizada (ABNT/NBR ISO 926:2006). O gotejador Taldrip e Streamline ultrapassou o valor de 15% de CV após 1150 horas de funcionamento e o gotejador Tiran após 220 horas (Figura 13)

Ainda na Figura 13 constata-se que o gotejador Streamline também apresentou desempenho ruim no decorrer das 1200 horas, porém foi melhor que os gotejadores Taldrip e Tiran. O CUC chegou ao final das 1200 horas de experimento de obstrução com valor de 79% e o valor de CV chegou a 30% o que, segundo a ASABE (2008) é inaceitável. No entanto, em apenas 120 horas de funcionamento com um gotejador tipo labirinto não autocompensante operando com água residuária de esgoto doméstico tratado, Batista *et al.* (2010) verificaram que os CUC e CUD diminuiram 4,49 e 10,58%, respectivamente.

As causas de baixas uniformidades quando se utiliza água residuária são devidos à formação de biofilme e à interação entre sólidos suspensos e bactérias, segundo Souza and Moreira (2012). Batista *et al.* (2011) verificaram que houve uma redução de 59% nos valores de uniformidade estatística (UE) nos sistemas de irrigação por gotejamento usando esgoto doméstico por um tempo de 500 horas de funcionamento. Cunha *et al.* (2013) e Vale *et al.* (2013) também constataram redução do desempenho hidráulico em sistemas de irrigação por gotejamento quando utilizaram água residuária de esgoto doméstico.

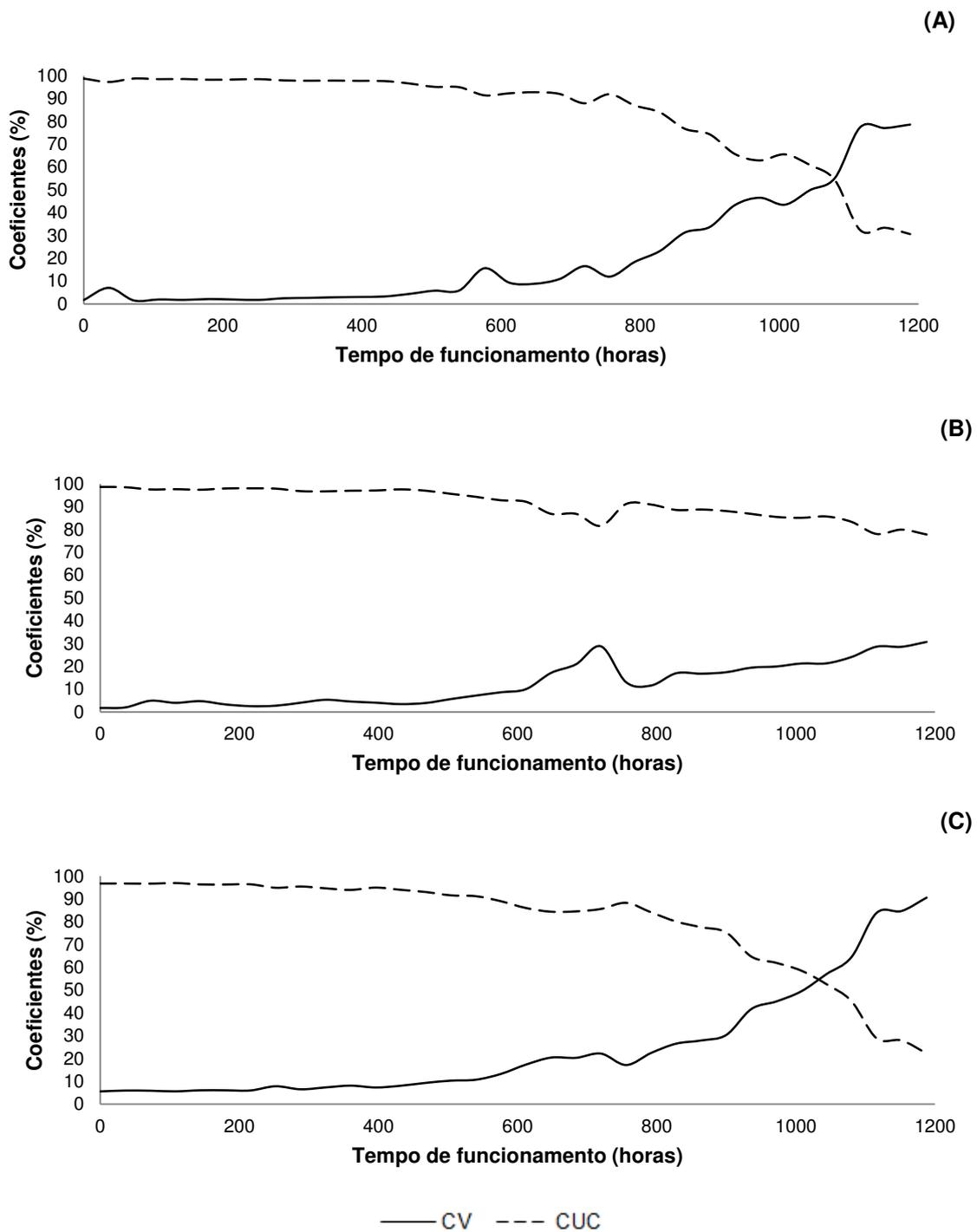


Figura 13. Coeficiente de variação(CV) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) no monitoramento dos gotejadores Taldrip (A), Streamline (B) e Tiran (C) durante o tempo de funcionamento com água residuária

A Figura 14 apresenta os valores de CUC e CV oriundo do monitoramento durante as 1200 horas de de funcionamento do sistema com água com teor elevado de cálcio.

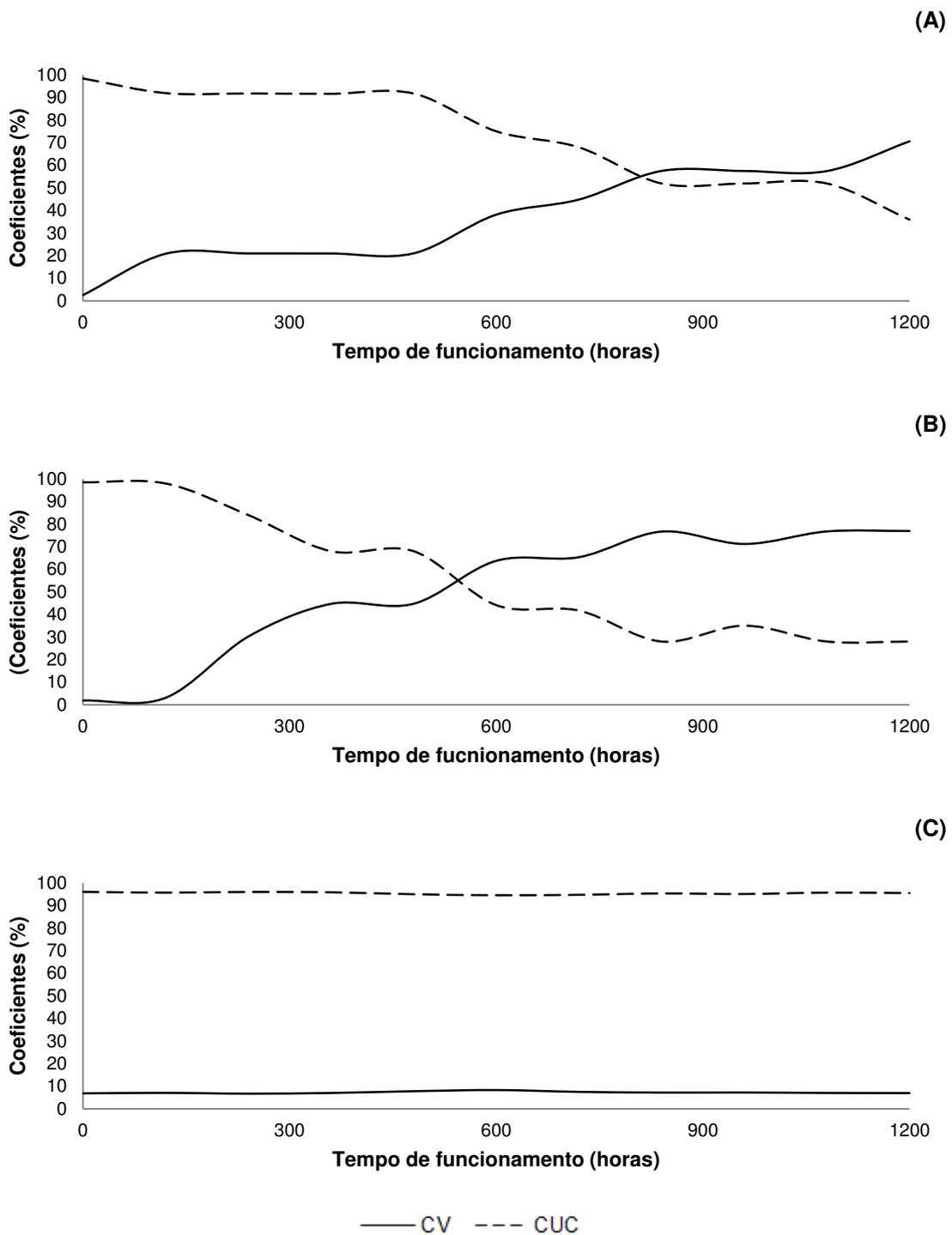


Figura 14. Coeficiente de variação(CV) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) no monitoramento dos gotejadores Taldrip (A), Streamline (B) e Tiran (C) durante o tempo de funcionamento com água com teor elevado de cálcio

O gotejador Tiran não sofreu mudança em relação ao CUC e CV durante as 1200 horas de operação do sistema, permanecendo com seu desempenho hidráulico de acordo com as condições iniciais. Já os outros dois gotejadores, Streamline e Taldrip, tiveram seu desempenho afetado em relação ao CUC e CV (Figura 14).

O gotejador Streamline chegou a valores de CUC abaixo de 70% após 360 horas e valores de CV acima de 30% em 240 horas de funcionamento com água com excesso de cálcio considerado inaceitável ASABE (2008) (Figura 14). Testando diferentes manejos de irrigação com variação do pH e temperaturas da água, HILLS *et al.* (1989) observaram que em 100 dias de funcionamento de um sistema de irrigação por gotejamento ocorreu obstrução total e parcial por precipitados químicos.

Ainda na Figura 14 verifica-se que o gotejador Taldrip teve seu desempenho afetado nas primeiras 120 horas de funcionamento, porém o CUC começou a reduzir de forma mais acentuada, a partir de 720 horas, com valores abaixo de 70%. Os valores de CV tiveram aumento, chegando a 21% nas primeiras 120 horas de operação, passando a ser inaceitáveis (>15%) perante a classificação da ASABE (2008) e chegaram ao valor de 70% ao final das 1200 horas de operação do experimento.

A Figura 15 mostra os resultados do monitoramento do grau de entupimento (GE) e da vazão dos gotejadores. Conforme se observa na Figura 15, o GE dos gotejadores funcionando com água de abastecimento não ultrapassou 18% até o final das 1200 horas de operação do sistema. Apenas o gotejador Streamline chegou ao valor do GE de 18% e os gotejadores Taldrip e Tiran permaneceram com valores abaixo de 9% até às 1200 horas de operação.

Os valores de GE dos gotejadores funcionando com água residuária tiveram seus valores elevados ao longo das 1200 horas de operação. O Gotejador Tiran foi o que sofreu maior aumento dos valores de GE ultrapassando o valor de 15% após 500 horas de funcionamento. O gotejador Streamline foi o que demonstrou melhor desempenho diante da água residuária, chegando ao final das 1200 horas de funcionamento com o valor de GE de 20%. No entanto, Szekut *et al.* (2015) verificaram, estudando o entupimento de gotejadores com uso de água residuária de esgoto doméstico tratado e água de abastecimento, verificaram que não houve diferenças estatísticas na obstrução das duas águas em relação aos valores de GE.

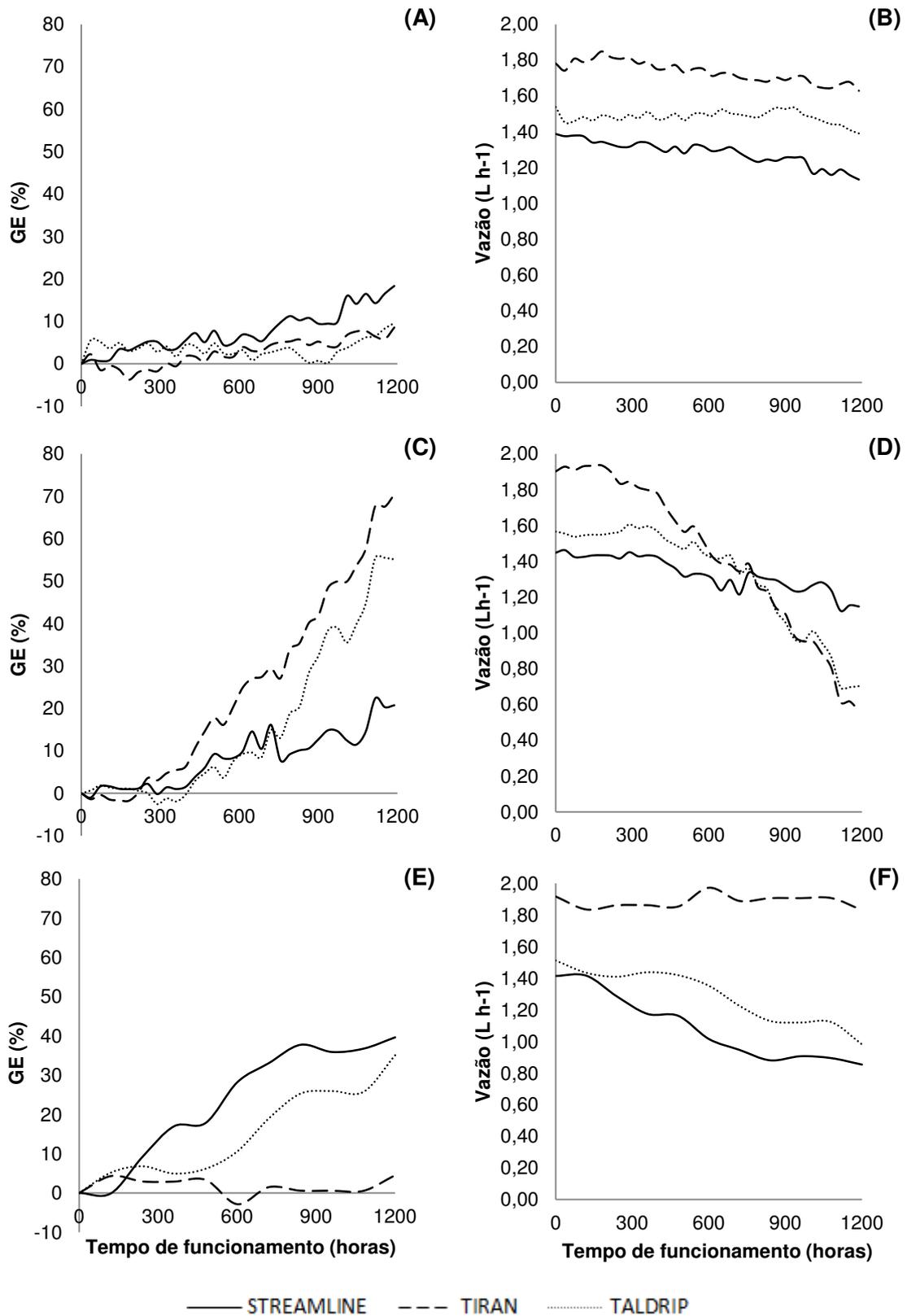


Figura 15. Monitoramento do grau de entupimento (GE) e da vazão dos gotejadores Streamline, Tiran e Taldrrip funcionando com água de abastecimento (A e B), água residuária (C e D) e água com teor elevado de cálcio (E e F), durante 1200 horas

Para a obstrução com precipitados químicos é possível observar, na Figura 15, com água com teor elevado de cálcio que o gotejador Tiran não sofreu entupimento durante as 1200 horas de funcionamento do sistema, mantendo seu GE próximo a 0% no decorrer do experimento e a vazão próxima a $1,8 \text{ Lh}^{-1}$. Porém os gotejadores Streamline e Taldrip tiveram um aumento constante do GE ao longo das 1200 horas de funcionamento chegando ao final do experimento com valores de 39 e 35%, respectivamente, para os gotejadores Streamline e Taldrip.

Apesar dos gotejadores terem sido submetidos às mesmas condições hidráulicas de operação na fase de obstrução, eles se obstruem de maneiras diferentes. Verifica-se que o Tiran teve melhor desempenho funcionamento com água com elevado teor de cálcio e o gotejador Streamline teve melhor desempenho diante dos outros gotejadores quando foi operado com água residuária. Segundo Ribeiro *et al.* 2(012) essas diferenças na obstrução dos gotejadores diante de diferentes qualidades de água se deve principalmente aos tipos de gotejadores, em que diferentes graus de obstrução, são influenciados por diferentes arquiteturas internas dos gotejadores.

6.2.2. Identificação microbiológica do material aderido às paredes dos gotejadores por microscopia ótica

Através da microscopia ótica foi possível identificar os principais componentes microbiológicos do material de biofilme encontrado no interior dos gotejadores funcionando com água de abastecimento, água residuária e água com elevado teor de cálcio.

Foram identificados e classificados através de imagens da microscopia ótica do material dos gotejadores organismos como algas unicelulares e pluricelulares, cianobactérias e bactérias.

Água de abastecimento

Na Figura 16 observa-se as imagens da microscopia ótica realizadas com o material aderido nos gotejadores funcionando com água de abastecimento.

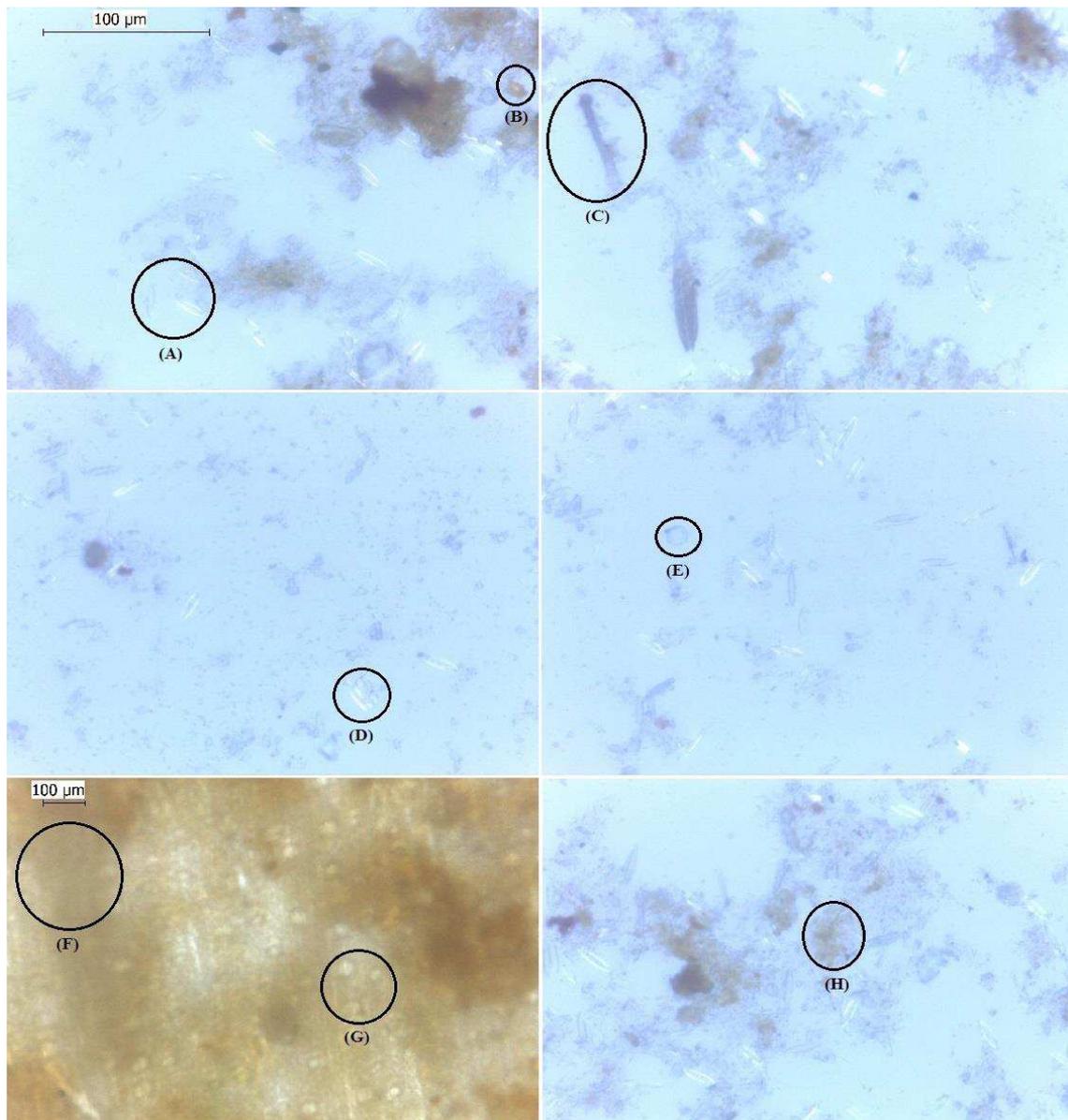


Figura 16. Identificação dos principais componentes microbiológicos existentes no material do interior dos gotejadores funcionando com água de abastecimento: (A) Diatomáceas sugestivo de *Gomphonema sp.*; (B) *Coliformes fecais*; (C) Alga clorofilada sugestivo de *Spirogyra sp.*; (D) Reprodução assexuada do tipo duplicação em bactéria de forma bacilar; (E) Sugestivo de ovo de *Ascaris lumbricoides*; (F) Formação de biofilme; (G) Sugestivo de bactérias de formas cocos; (H) Colônia de *Microcystis aeruginosa*.

Conforme apresentado na Figura 16, foi possível identificar Diatomáceas sugestivo de serem do gênero *Gomphonema sp.* (Figura 16A); Coliformes fecais em pequena quantidade (Figura 16B); alga clorofilada do gênero *Spirogyra* (Figura 16C); organismos sugestivos de serem ovos de Helmintos (Figura 16E) e bactérias bacilares (Figura 16D). Também foi possível identificar a formação de biofilme (Figura 16F) e bactérias de forma coccus e colônia (Figura 16G) bacteriana de *Microcystis aeruginosa*

(Figura 16H) formadora de biofilme, que tem potencial para causar obstrução em gotejadores quando encontrados em grandes quantidades. Observou-se pouca presença de *Coliformes fecais* na amostra do material aderido ao gotejador operado com água de abastecimento.

Água residuária de esgoto doméstico tratado

Na Figura 17 estão as imagens da microscopia óptica realizada como material aderido aos gotejadores funcionando com água residuária. É possível identificar colônias de bactérias e cianobactérias como a *Microcystis aeruginosa* (Figura 17A) com potencial de formar biofilme e, conseqüentemente, obstruir os gotejadores de irrigação localizada. Segundo Menezes e Bicudo (2010) essas bactérias conseguem formar colônias e, em contrapartida, o biofilme através da utilização dos substratos existentes na água.

Ainda é possível identificar outro grupo composto de algas do tipo Diatomácea, sugestivo de serem do gênero *Gomphonema sp.* (Figura 17B) e do grupo das Dinoflageladas (Figura 17F). Essas algas apresentam sílica em sua composição o qual pode reagir quimicamente com as demais substâncias da água e provocar incrustações nos gotejadores. Também foi encontrado outro microrganismo clorofilado do gênero *Espirogira* (Figura 17C).

Os organismos do reino Monera identificados foram bactérias na forma de cocos, bacilos e *Coliformes fecais* (Figura 17E, G, H). Também foi observada na análise de microscopia óptica do material da água residuária, a presença de um grande número de bactérias do tipo *Coliformes fecais* seguido de algas do tipo Diatomáceas em relação à água de abastecimento, de vez que, quando os coliformes ultrapassam o limite de 100.000 UCF, o risco de entupimento dos gotejadores é elevado (NAKAYAMA, 1982).

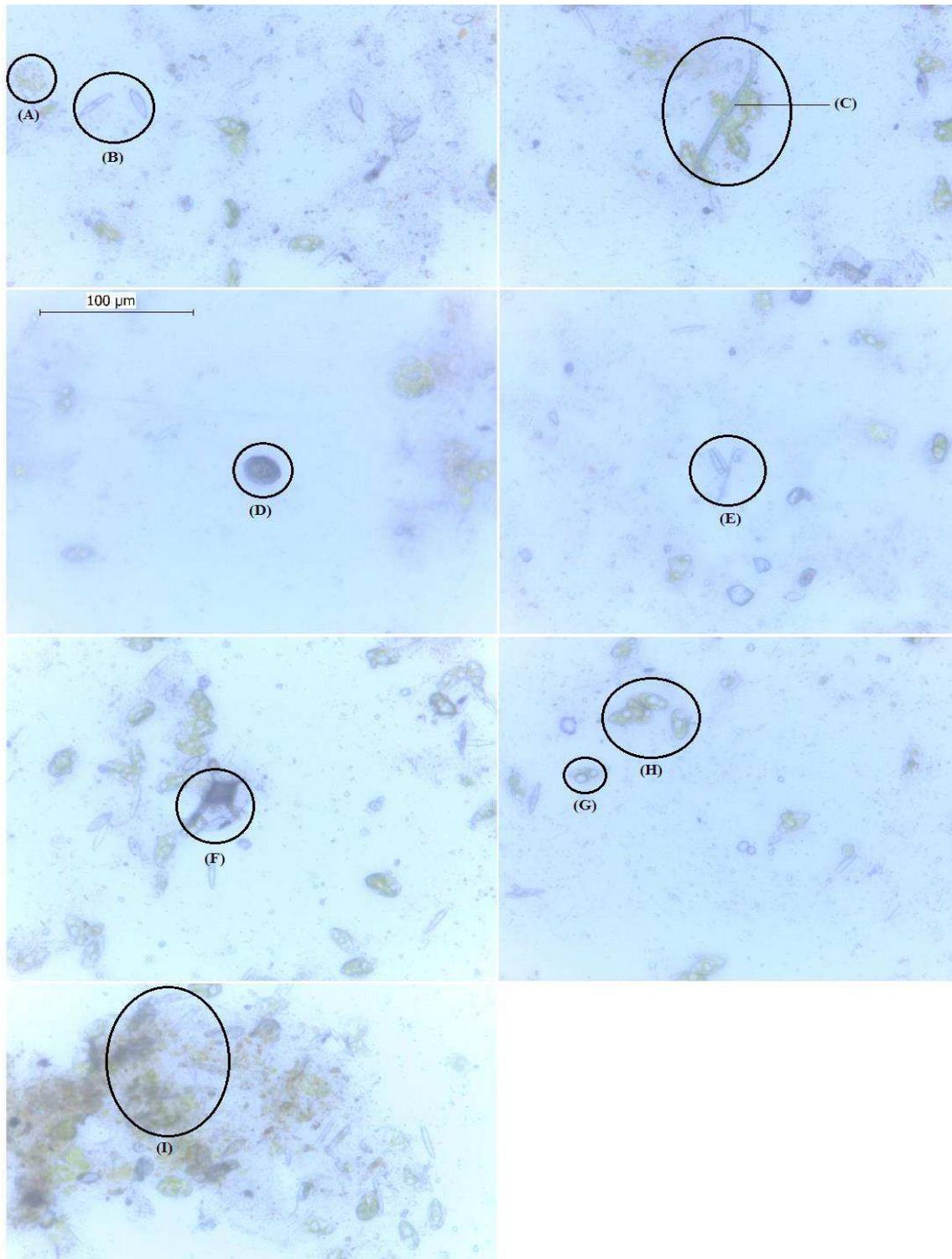


Figura 17. Identificação dos principais componentes microbiológicos existentes no material do interior dos gotejadores funcionando com água residuária: (A) Colônia de *Microcystis aeruginosa*; (B) Diatomáceas sugestivo de *Gomphonema sp.*; (C); Alga clorofilada sugestivo de *Spirogyra sp.*; (D) Ovo de *Ascaris lumbricoides*; (E) e reprodução assexuada do tipo duplicação em bactéria de forma bacilar; (F) Alga clorofilada sugestivo de Dinoflagelada; (G) Bactéria de forma cocos; (H) *Coliformes fecais*; (I) Formação de biofilme

Água com elevado teor de cálcio

A análise de microscopia óptica proporcionou a identificação dos principais componentes microbiológicos aderidos ao material do interior dos gotejadores que funcionou com água com elevado teor de cálcio, podendo ser visualizada na Figura 18.

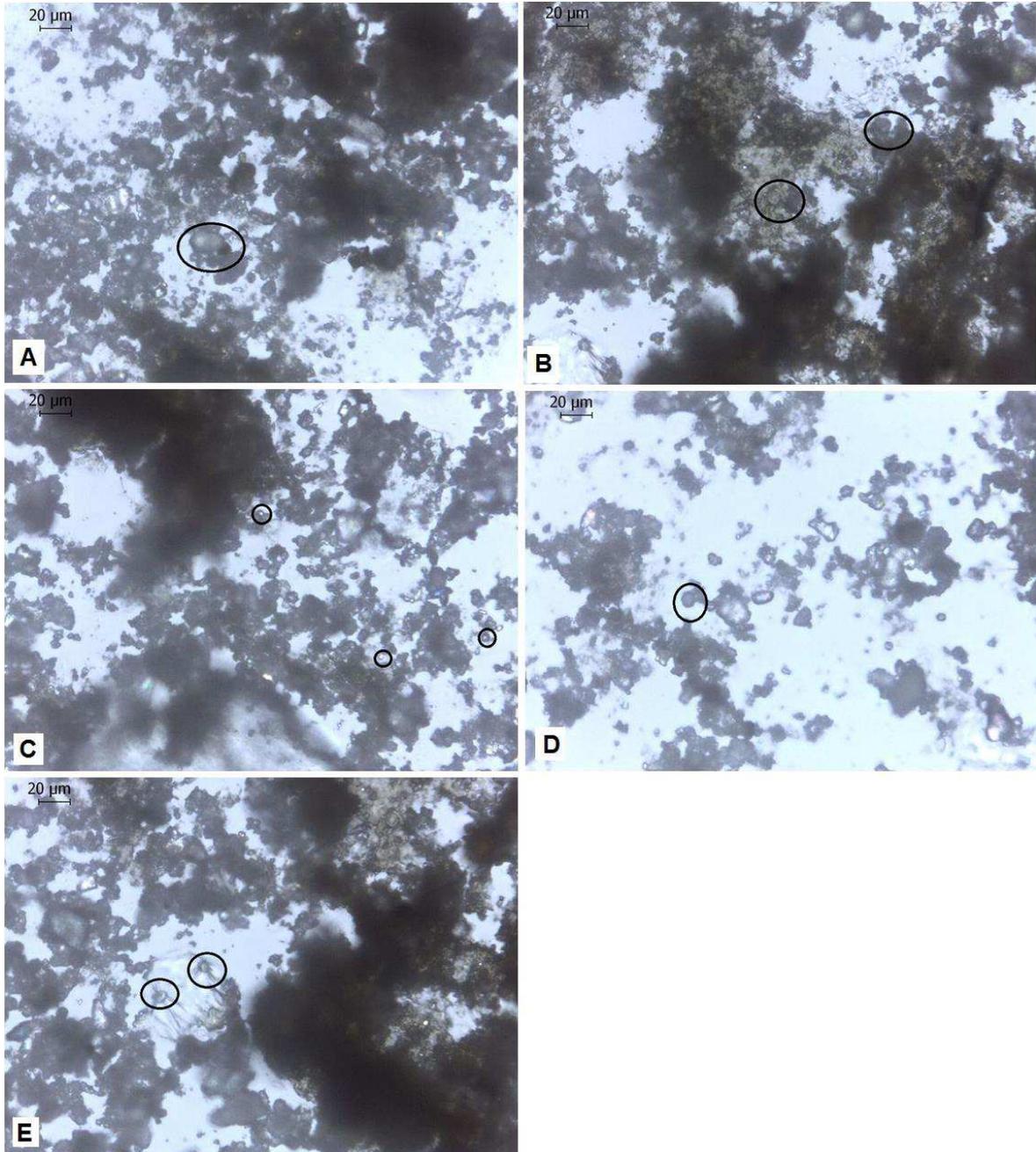


Figura 18. Identificação dos principais componentes microbiológicos existentes no material do interior dos gotejadores funcionando com da água com elevado teor de cálcio: A) *Coliformes fecais*; B) Sugestivo de ovo de Helmintos; C) *Microcystis aeruginosa*; D) Sugestivo de Dinoflagelada e; (E) Ácaro

Na identificação de microscopia óptica para a amostra do material aderido à tubulação pela água com cálcio, foi possível classificar os organismos como algas

unicelulares – cianobactérias, bactérias, ovos de Helminhos e invertebrados aracnídeos acariformes.

Foram encontradas Dinoflageladas (Figura 18D) Coliformes fecais em pequena quantidade, formação de Biofilme e colônias bacterianas de *Microcystis aeruginosa* formadoras de biofilme (Figura 18C). Dos organismos do reino Monera também foram identificadas bactérias em forma de cocos, bacilos, além de pouca presença dos microrganismos *Coliformes fecais* (Figura 18A). Também foram encontrados em pouca quantidade sugestivo de ovos de Helminhos (Figura 18B), que quando em contato com o homem pode contaminá-lo causando alguns problemas de saúde. Encontrou-se também ácaros na água com elevado teor de cálcio conforma mostra a Figura 18E.

6.2.3. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do material obstruído aderido aos gotejadores

Com as imagens de alta resolução e aproximação fornecidas pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) pode-se observar as configurações e formatos do material aderido aos gotejadores, tal como sua estrutura no processo de obstrução.

Material da água residuária e da água com elevado teor de cálcio aderido às paredes dos labirintos dos gotejadores

Na Figura 19, se encontram as imagens de alta resolução feita pela MEV da parede dos três gotejadores, funcionando com água residuária e para os gotejadores funcionando com água de abastecimento. Observa-se uma camada de biofilme formada nas paredes dos gotejadores, porém essas camadas são mais perceptíveis nos gotejadores funcionando com água residuária. A camada de biofilme foi formada provavelmente por colônias de bactérias e cianobactérias conforme identificado nas imagens de microscopia óptica, o que pode obstruir, parcial ou totalmente, os gotejadores (MENEZES e BICUDO, 2010).

Observa-se ainda, que as entranhas dos gotejadores funcionando com água residuária ficam menores com o crescimento do biofilme e apesar da água de abastecimento formar um biofilme, a quantidade de biofilme é menor quando comparada à formação do biofilme com água residuária (Figura 19). Segundo Batista *et al.* (2010) a obstrução de gotejadores funcionando com esgoto doméstico tratado é ocasionada pelo biofilme, um resultante da interação entre colônias de bactérias e algas, ocorrendo entupimento parcial ou total dos gotejadores.

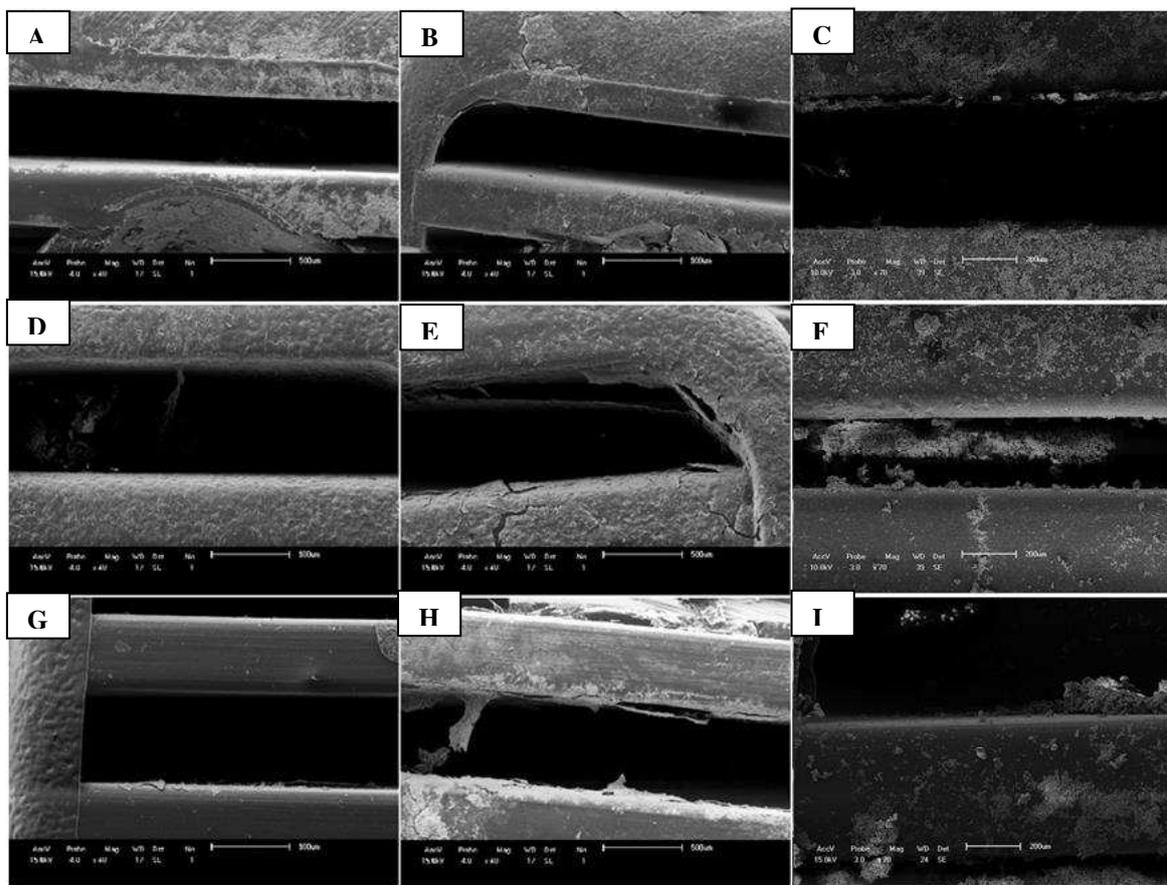


Figura 19. Imagens realizadas pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do material aderido às paredes do labirinto dos gotejadores Streamline (A, B e C) Taldrip (D, E e F) e Tiran; (G, H e I) com aumento de 40x funcionando com água de abastecimento (A, D e G) e água residuária (B, E e H), e com aumento de 70x funcionando com água com elevado teor de cálcio (C, F e I)

Nas imagens referentes a água residuária (Figura 19B, E e H) as formações do biofilme ocasionado pelas algas e colônias bacterianas impede o fluxo de água, acarretando na diminuição da vazão dos gotejadores afetando, conseqüentemente, seu desempenho hidráulico. Segundo Li *et al.* (2012), muitas bactérias, como coccus e bacilos, começaram a formar colônias que se agregavam na parede dos gotejadores como agregados de vários tamanhos, alterando o tamanho das entranhas, orifícios e canais dos gotejadores.

Outro problema relatado por Li *et al.* (2012) que utilizaram MEV, foi o fato de que o biofilme era depositado, de forma contínua, na entrada e na saída do caminho do labirinto, resultando no principal motivo para o entupimento do emissor. Os mesmos autores observaram que estes agregados podem se desprender das paredes ficando em suspensão e, conseqüentemente, obstruir os orifícios dos gotejadores.

Devido exigências para análise pelo MEV, as amostras foram secas ao ar livre, dessa maneira houve redução no volume do biofilme seco em relação ao biofilme úmido, principalmente dos gotejadores funcionando com água residuária, por este motivo, surgiram trincas e rachaduras nas imagens do biofilme (Figura 19B, E e H)

Segundo Albuquerque *et al.* (2014) a matriz extracelular do biofilme é produzida pelos próprios microrganismos; esta matriz polimérica é conhecida como Extracellular Polymeric Substance (EPS) constituída por polissacarídeos, proteínas, exoenzimas, ácidos nucleicos e lípidos, que permitem imobilizar as células do biofilme mantendo-o coesivo. A base da composição do biofilme é constituída das relações com Carbono e Oxigênio, que são recorrentes em altos índices em águas residuárias. Assim a água residuária possui grande potencial de obstrução devido a tais características.

Verifica-se, nas Figura 19C, F e I, a maneira como foram formadas as estruturas do material depositado pela água com elevado teor de cálcio. Diferentemente da água de abastecimento e água residuária, praticamente não existe a formação de biofilme na água com elevado teor de cálcio mas há a formação de estruturas com os precipitados químicos do cálcio.

Segundo Haman (2014) os carbonatos de cálcio se precipitam facilmente em irrigação por gotejamento por se encontrarem em abundância em quase todas as fontes de água do planeta, e segundo este autor, reações químicas que ocorrem fazem com que o cálcio se precipite causando incrustações na parede das tubulações e dos gotejadores levando, conseqüentemente, ao entupimento.

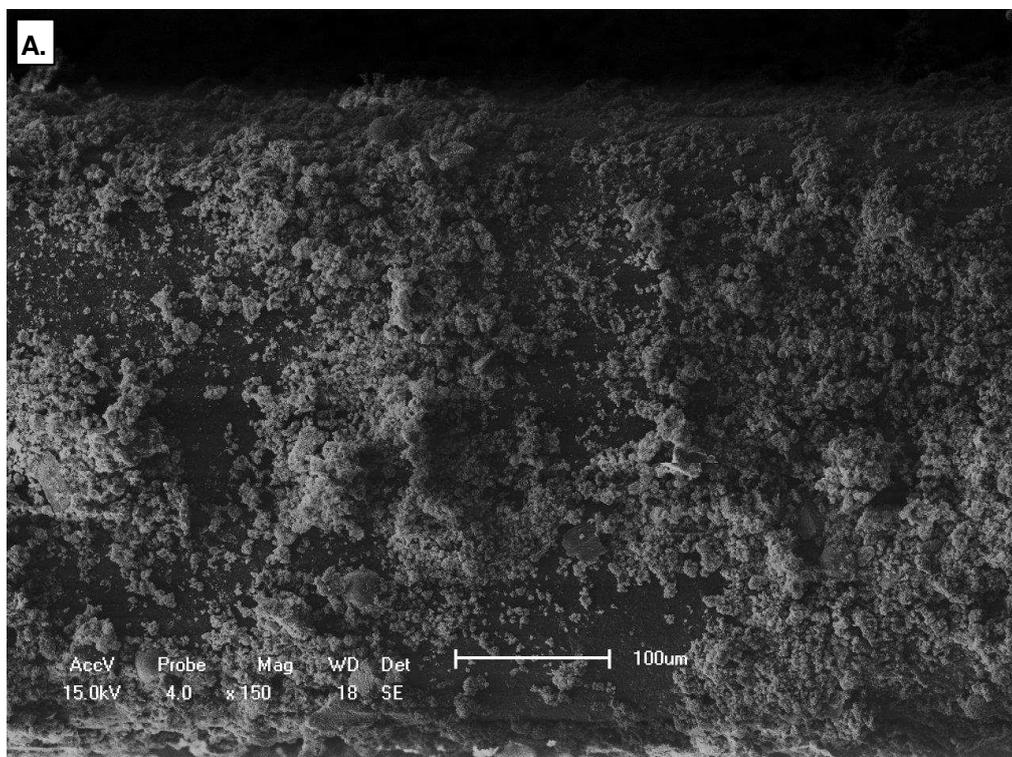
No experimento realizado por Tarchitzky *et al.* (2013), foram analisadas incrustações em sistemas de irrigação por gotejamento, e encontrados, em grande quantidade do material da incrustação, carbono e oxigênio, seguidos de cálcio. Isso mostra o poder de reação química dessas propriedades da água, e pode não apenas causar incrustações com precipitados nos tubos de irrigação, mas também o entupimento.

Ainda na Figura 19 é possível observar que houve maior quantidade de material da água com cálcio depositado no gotejador Streamline (Figura 19C) do que nos gotejadores Taldrip (Figura 19F) e Tiran (Figura 19I). O depósito dos precipitados e as incrustações de cálcio têm formato de nódulos aderidos às paredes dos tubos, os quais também podem se desprender, ficar em suspensão e chegar direto ao orifício do gotejador obstruindo-o, totalmente ou parcialmente afetado, conseqüentemente, o desempenho hidráulico do sistema. Segundo Liu and McAvoy (2015) isto é recorrente em sistemas de irrigação que

usam a fertirrigação, pois os fertilizantes podem reagir quimicamente e se tornar insolúveis e precipitar, ocasionando a obstrução dos gotejadores.

Na Figura 20, são apresentados detalhes das imagens do gotejador Streatline realizadas por MEV com aumento de 150, 300 e 500x, obstruído com água com cálcio.

Verifica-se, na Figura 20, como as estruturas dos precipitados se depositam e formam as incrustações nas paredes dos gotejadores. Na Figura 20A as precipitações das reações químicas do cálcio cobriram praticamente toda a superfície do gotejador diminuindo a área de fluxo da água e afetando diretamente no desempenho hidráulico do sistema.



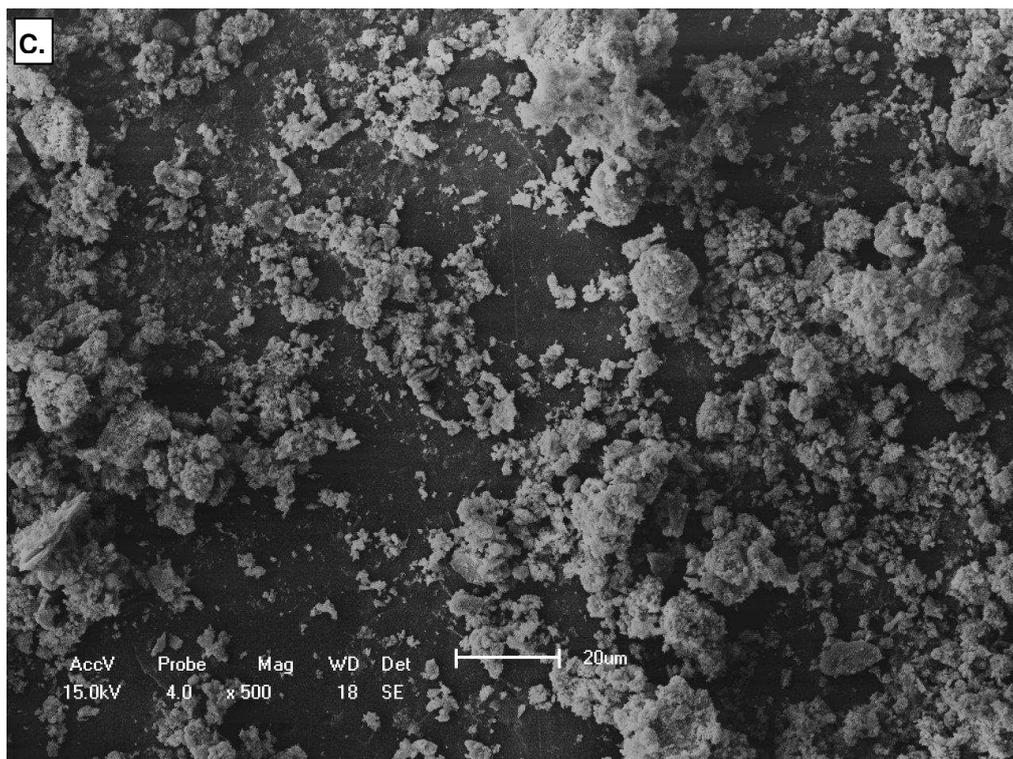
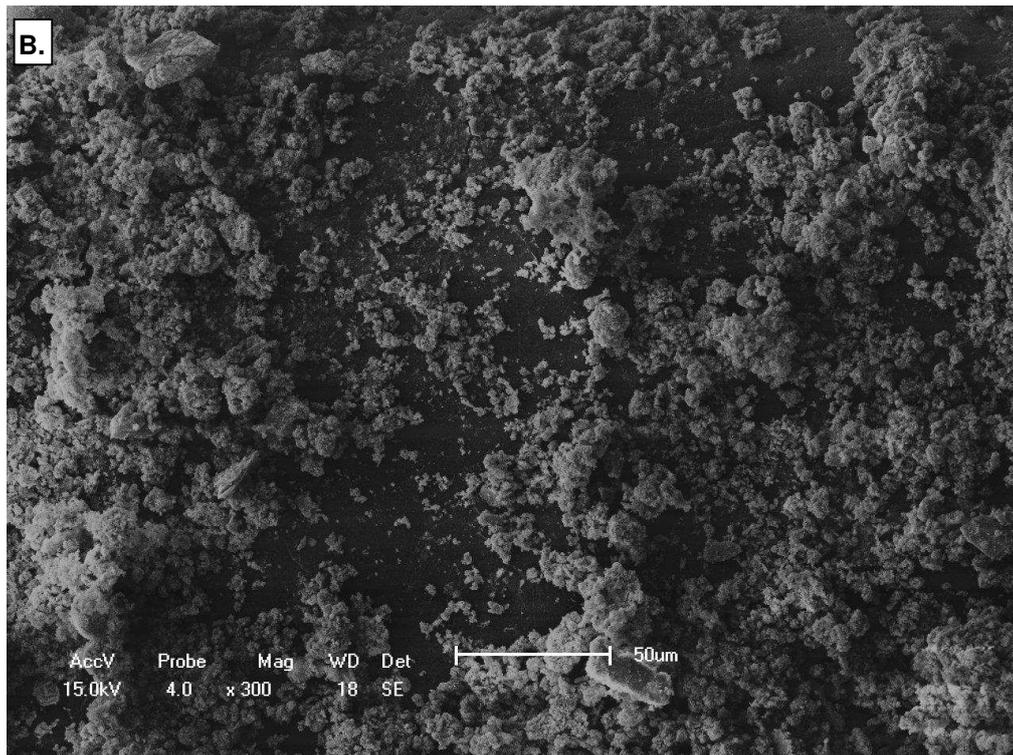


Figura 20. Detalhes do material obstruidor na parede do gotejador Streamline funcionando com água com elevado teor de cálcio, aumentado 150x (A) 300x (B) e 500x (C).

Na Figura 20C, observam-se as estruturas dos precipitados químicos em forma de nódulos de diferentes tamanhos e arranjos. Tais estruturas podem causar perda de carga uma vez que altera a rugosidade da parede da tubulação e dos labirintos dos gotejadores,

consequentemente, diminuindo a vazão. Outro problema possível de ocorrer é o desprendimento dessas partículas da parede dos gotejadores podendo ir direto para o orifício causando a obstrução total ou parcial do gotejador.

Os precipitados de carbonatos de cálcio são dependentes do pH e da temperatura, assim, qualquer alteração nestes fatores pode reduzir a solubilidade de cálcio em água e resultar em precipitação do mineral (HAMAN 2014).

6.3. Desobstrução dos gotejadores

6.3.1. Desobstrução dos gotejadores obstruídos com água residuária (AR)

Depois que os gotejadores passaram pelo processo de obstrução utilizando água residuária por 1200 horas, foram aplicados os tratamentos de desobstrução de ácido fosfórico a pH 2, cloro livre, lavagem ultrassônica, combinação de acidificação+lavagem ultrassônica e cloração+lavagem ultrassônica.

6.3.1.1. Desobstrução dos gotejadores obstruídos com água residuária (AR) em função dos tratamentos

Os gotejadores foram submetidos a três processos de desobstrução e duas combinações de processos, totalizando cinco tratamentos de desobstrução que foram avaliados através da redução do grau de entupimento (GE) e da vazão dos gotejadores.

Na Figura 21 estão apresentados o GE dos gotejadores após o processo de obstrução e o GE depois da aplicação de cada tratamento de desobstrução mostrando a redução do GE gerado por cada tratamento em cada gotejador.

Pode-se verificar nas Figura 21A e C, que os gotejadores Taldrip e Tiran apresentaram menores valores de GE após o tratamento de lavagem ultrassônica reduzindo os valores para 4,08% e 33,62% respectivamente. No gotejador Streamline o tratamento que exerceu maior efeito de desobstrução foi o cloro+lavagem ultrassônica seguido da lavagem ultrassônica (Figura 21B) reduzindo os valores de GE de 11,7 para 2,4% e de 38,2 para 6,2% respectivamente. Entretanto, nota-se que as maiores diferenças entre obstruído e desobstruído após os tratamentos foram ácido+lavagem ultrassônica, lavagem ultrassônica e ácido+lavagem ultrassônica, respectivamente, para os gotejadores Taldrip, Streamline e Tiran. Constata-se ainda que, mesmo com reduções elevadas após os tratamentos os valores de GE para o gotejador Tiran se mantiveram elevados, conforme mostra a Figura 21C.

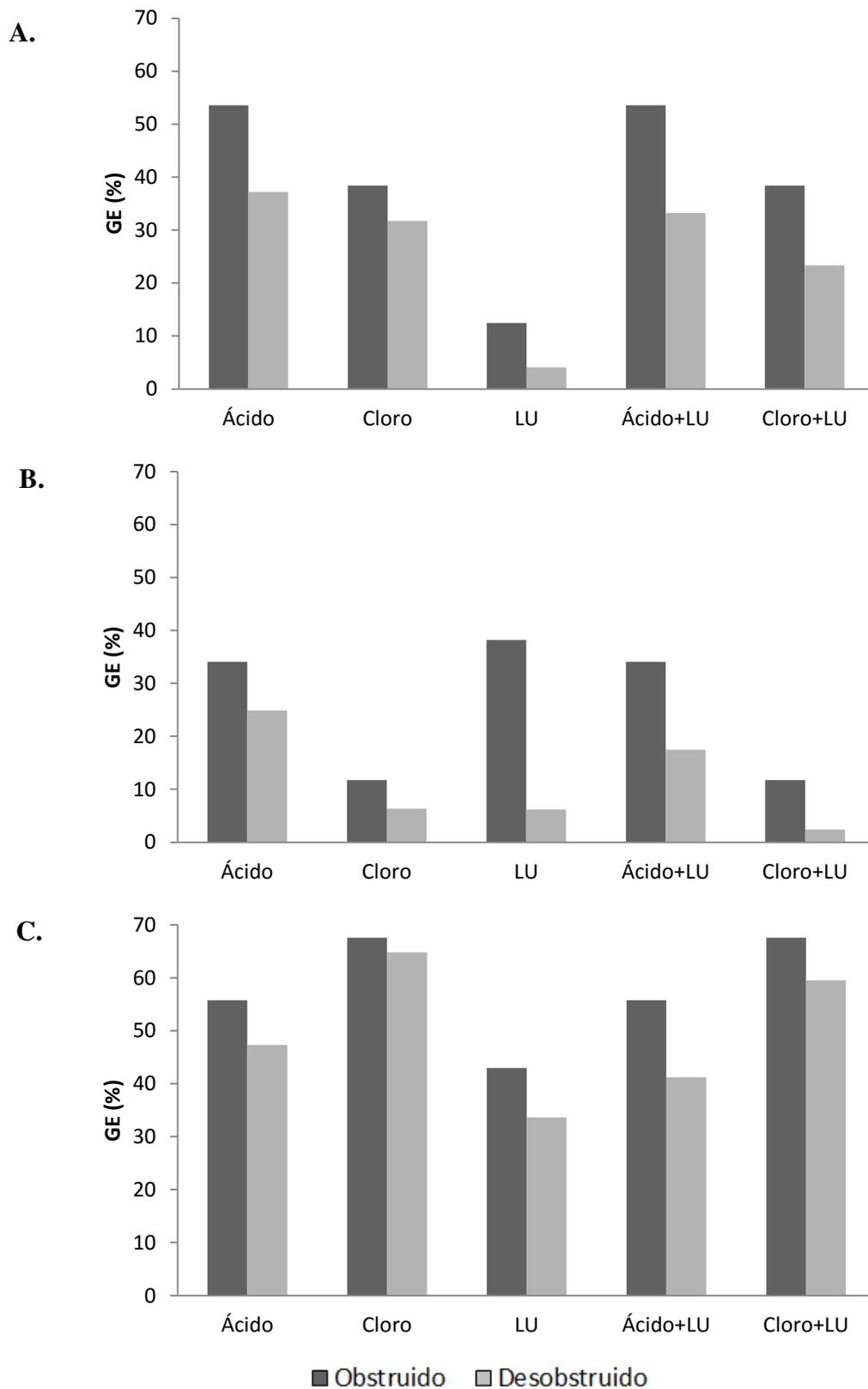


Figura 21. Redução do grau de entupimento (GE) dos gotejadores Taldrip (A), Streamline (B) e Tiran (C) obstruídos com água residual para os tratamentos de desobstrução: acidificação, cloração, lavagem ultrassônica (LU), acidificação+lavagem ultrassônica e cloração+lavagem ultrassônica

Para verificar essas diferenças entre os tratamentos foi realizada a comparação de médias ao nível de 95% de confiança, dos dados de GE após os tratamentos de desobstrução, cujos p-valores estão descritos na Tabela 13.

Tabela 13. P-valor dos dados de grau de entupimento (GE) na comparação de médias dos tratamentos de desobstrução com nível de confiança de 95% dos gotejadores obstruídos com água residuária

Taldrip – AR	Streamline - AR	Tiran - AR
----- p - valor -----		
0,039*	0,120 ^{ns}	0,003*

*Significativo e ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade

Constata-se que houve significância a 5% foi dos dados do GE do Taldrip e Tiran, pois o gotejador Streamline apresentou p-valor acima de 0,05 não sendo significativo na comparação de médias a 5%.

Na Tabela 14 está a estatística de comparação de médias do GE pelo Teste T para os tratamentos de desobstrução aplicados aos gotejadores Tiran, Taldrip e Streamline, que foram obstruídos com água residuária.

Tabela 14. Comparação de médias do grau de entupimento (GE) em função dos tratamentos de desobstrução com ácido, cloro, lavagem ultrassônica, ácido + lavagem ultrassônica e cloro + lavagem ultrassônica pelo teste T a 5% de probabilidade dos gotejadores obstruídos com água residuária

Tratamento/Gotejador	Taldrip – AR*	Streamline – AR ^{ns}	Tiran – AR*
	----- GE (%) -----		
Ácido	37,189 a	24,875	47,304 bc
Cloro	31,692 a	6,340	64,813 a
Ácido+Lav. Ultras.	33,189 a	17,501	41,182 c
Cloro+Lav. Ultras.	23,348 ab	2,426	59,501 ab
Lav. Ultras.	4,071 b	6,194	33,621 c

* significativas e ^{ns} não significativas a 5% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si.

Pelo teste de comparação de médias observou-se na Tabela 14, que houve diferenças significativas nos valores de GE entre os tratamentos de desobstrução nos gotejadores Taldrip e Tiran uma vez que as diferenças entre as médias de GE do gotejador Streamline não foram significativas (p-valor > 0,120), porém menores valores de médias foram para cloro, cloro+lavagem ultrassônica e lavagem ultrassônica.

No gotejador Taldrip o melhor resultado foi do tratamento de lavagem ultrassônica, diferente dos tratamentos de ácido, cloro e ácido+lavagem ultrassônica e igual

ao tratamento de Cloro+lavagem ultrassônica. Mas pode-se perceber que apesar de igual estatisticamente o valor de GE do tratamento de lavagem ultrassônica está abaixo dos outros tratamentos (Tabela 14).

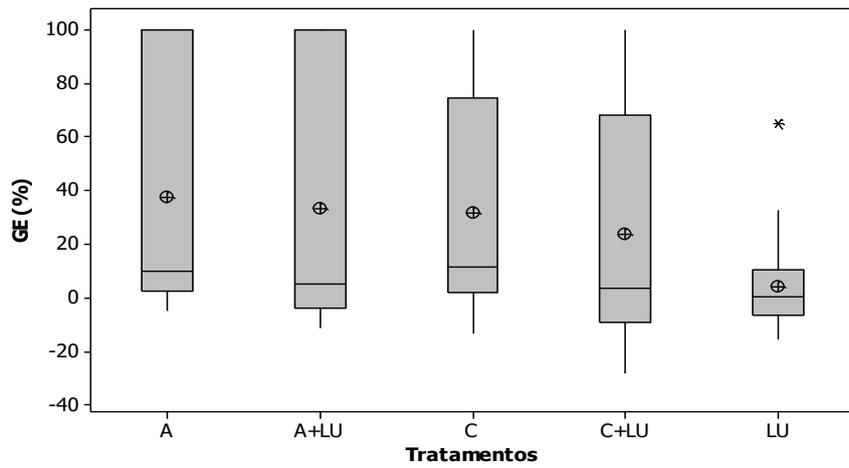
Os autores Teixeira *et al.* (2008) encontraram em seus experimentos com desobstrução melhores resultados quando aplicaram cloro livre a 50mg L^{-1} e ácido nítrico pH 2, já Cararo and Botrel (2007) verificaram melhores resultados de desobstrução com aplicação de cloro residual livre.

Ainda na Tabela 14, verifica-se que o processo de lavagem ultrassônica para a desobstrução de gotejadores obstruídos com água residuária demonstrou ser melhor ou igual aos processos convencionais.

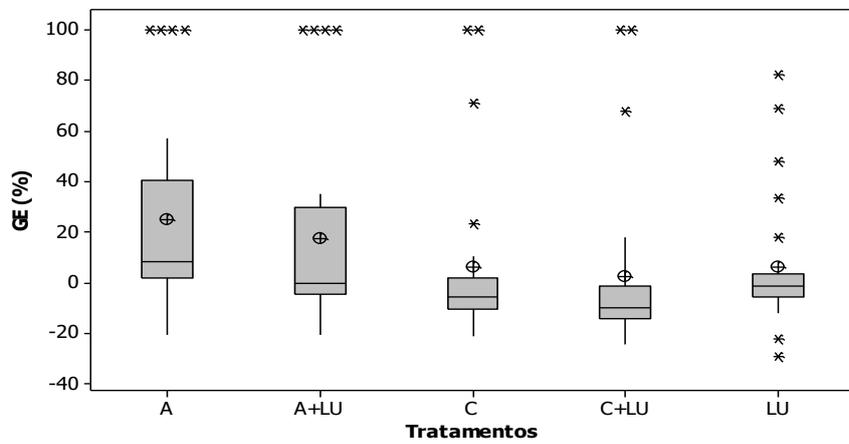
Na Figura 22 está apresentada a distribuição dos dados de GE de cada tratamento em gráficos do tipo BoxPlot. Verifica-se na Figura 22, que os valores de GE dos gotejadores Taldrip e Tiran se encontram praticamente entre o primeiro (Q1) e o terceiro quartil (Q3). Os dados de GE do gotejador Streamline estão dispersos com vários valores discrepantes fazendo com que a média do GE fique fora dos Q1 e Q3.

Nos valores de GE do gotejador Taldrip, os dados estão bastante dispersos, haja que se pode verificar uma grande distancia entre os Q1 e Q3, mas é possível constatar que a concentração de dados está entre o Q1 e a mediana (Q2), ou seja, os valores de GE dos tratamentos estão concentrados próximos ao valor de zero, porém aqueles gotejadores que não foram desobstruídos continuaram com um alto valor de GE, causando a heterogeneidade dos dados. Porém os dados do tratamento de lavagem ultrassônica estão mais homogêneos e simétricos, com valores relativamente baixos de GE, o que demonstra que este processo desobstruiu praticamente todos os gotejadores, com exceção de um que apareceu como um valor discrepante no Boxplot.

A.



B.



C.

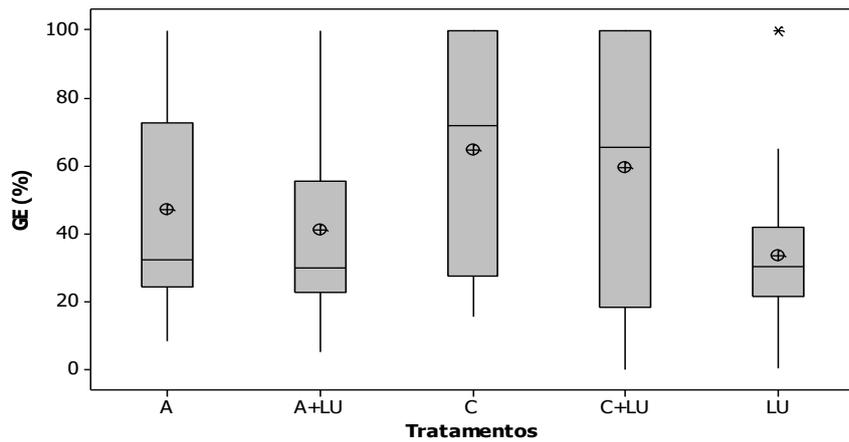


Figura 22. Boxplot dos dados de grau de entupimento (GE) dos tratamentos de ácido (A) cloro (C) lavagem ultrassônica (LU) ácido + lavagem ultrassônica (A+LU) e cloro + lavagem ultrassônica (C+LU) para os gotejadores Taldrip, Streamline e Tiran obstruídos com água residuária

Percebe-se, No gráfico de Boxplot do gotejador Streamline, que há muitos valores discrepantes tornando os dados heterogênicos e assimétricos, com valores de médias fora dos Q1 e Q3 para os tratamentos de cloro, cloro+lavagem ultrassônica e lavagem ultrassônica. Toda esta dispersão dos valores indica que os tratamentos não foram eficientes em todos os gotejadores, pois muitos deles ainda ficaram obstruídos sendo que em alguns tratamentos eles permaneceram com valores de 100% de GE, ou seja, obstruídos totalmente. No processo de lavagem ultrassônica houve valores de GE que ficaram negativos, indicando que a vazão após o tratamento, ultrapassou a vazão inicial do gotejador quando novo, durante o tratamento o gotejador pode ter sofrido alguma alteração em suas características construtivas.

Ainda na Figura 22 pode-se verificar que os tratamentos do gotejador Tiran também estão dispersos, porém grande parte dos dados se encontra entre os quartis. No tratamento de lavagem ultrassônica os dados ficaram mais homogêneos e simétricos que nos outros tratamentos, em que houve apenas um valor discrepante, que é um gotejador que não foi desobstruído, porém é possível perceber que todos os outros valores se aproximaram da média com o menor valor entre os tratamentos.

Nos gotejadores obstruídos com água residuária, percebeu-se a eficiência do tratamento de lavagem ultrassônica em relação aos outros tratamentos, pois praticamente todos os gotejadores avaliados neste tratamento diminuíram seu GE, ou seja, independente do grau de obstrução em que o gotejador esteja, o processo de lavagem ultrassônica consegue diminuir este valor. Constata-se os outros tratamentos também tiveram efeitos sobre a obstrução mas é possível verificar, pela análise do BoxPlot, que muitos gotejadores permaneceram obstruídos mesmo após a aplicação dos tratamentos.

6.3.1.2. Desobstrução dos gotejadores obstruídos com água residuária em função do tempo de tratamento

Houve diferentes tempos de exposição dos gotejados no processo de cada tratamento de desobstrução. Na aplicação de ácido e cloro os gotejadores ficaram expostos nos tempos de 0, 12, 24 e 36 horas e no tempo de lavagem ultrassônica ficaram expostos no processo durante 0, 5, 15, 30 e 60 minutos e nos processos combinados de ácido+lavagem ultrassônica e cloro+lavagem ultrassônica além do tratamento com o cloro e ácido em diferentes tempos, os gotejadores ficaram mais 15 minutos expostos ao processo de lavagem ultrassônica. Assim foi realizada a comparação dos tempos em cada tratamento e de todos os tempos dos tratamentos de desobstrução.

Na Tabela 15 se encontram os p-valores da análise estatística de comparação de médias a 95% de confiança dos dados de aumento de vazão (Q+) de cada tratamento de desobstrução aplicados aos gotejadores obstruídos com água residuária.

Tabela 15. P-valor dos dados médios de aumento de vazão (Q+) após os diferentes tempos de aplicação em cada tratamento na comparação de médias com confiança de 95% nos gotejadores obstruídos com água residuária.

Gotejador / Tratamento	Ácido	Cloro	Lavagem ultrassônica	Ácido+lavagem ultrassônica	Cloro+Lavagem ultrassônica
	----- p - valor -----				
Taldrip	0,019	0,000	0,007	0,018	0,000
Streamline	0,001	0,000	0,000	0,003	0,000
Tiran	0,000	0,018	0,002	0,000	0,000

Não houve valores acima de p-valor, dos dados de aumento de vazão, acima de 0,05, o que tornam as diferenças ente os dados estatisticamente significativas, ao nível de 95% de confiança (Tabela 15).

Na Tabela 16 são apresentadas as análises estatísticas de comparação de médias do tempo de cada tratamento pelo teste Tukey (0,05) dos gotejadores obstruídos com água residuária. Todas as vazões no tempo T0 foram igualadas a zero sendo possível verificar se o tempo de tratamento foi efetivo estatisticamente ou ficou igual a vazão de 0 Lh⁻¹.

Verifica-se na Tabela 16, que houve diferenças estatísticas em todos os tempos de todos os tratamentos em cada modelo de gotejador pelo teste Tukey (0,05). Porém, no tempo T1 os tratamentos, que foram diferentes de T0 (que aumentaram a vazão do gotejador estatisticamente) foram lavagem ultrassônica no gotejador Tiran, ácido+lavagem ultrassônica nos gotejadores Streamline e Tiran e ácido nos três gotejadores, nos demais tratamentos o T1 não desobstruiu os gotejadores.

Na Tabela 16 observa-se que no gotejador Taldrip os tempos de tratamento que tiveram efeito significativo no aumento de vazão, diferenciando-se da vazão do gotejador obstruído, foram: T1 e T3 no tratamento com ácido, T2 e T3 no tratamento com cloro, T4 nos tratamentos com lavagem ultrassônica e ácido+lavagem ultrassônica e T3 e T4 no tratamento de cloro+lavagem ultrassônica. Percebe-se que no tratamento de ácido T2 é igual ao T0, mas o T1 não é igual ao T0, ou seja, a vazão no tempo T2 diminuiu em relação ao T1, o que pode ter ocorrido devido ao desprendimento de material aderido à parede do tubo e causado, conseqüentemente, a obstrução parcial na avaliação de T2.

Tabela 16. Comparação de médias pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do aumento de vazão (Q+) em função do tempo de tratamento em cada modelo de gotejador obstruídos com água residuária

TALDRIP					
Tratamento	Ácido*	Cloro*	Lav. Ultr*	Áci+ Lav. Ultr*	Clo+ Lav. Ultr*
Tempo**	Valores médios da vazão aumentada (Lh-1)				
T0	0,000 b	0,000 b	0,000 b	0,000 b	0,000 c
T1	0,251 a	0,068 ab	0,017 b	0,251 ab	0,068 bc
T2	0,230 ab	0,139 a	0,070 ab	0,230 ab	0,139 ab
T3	0,256 a	0,101 a	0,083 ab	0,256 ab	0,101 b
T4	-	-	0,133 a	0,318 a	0,227 a
STREAMLINE					
T0	0,000 b	0,000 b	0,000 b	0,000 b	0,000 b
T1	0,180 a	0,015 b	0,115 b	0,180 a	0,015 b
T2	0,155 a	0,082 a	0,108 b	0,155 ab	0,082 a
T3	0,167 a	0,076 a	0,470 a	0,167 ab	0,076 a
T4	-	-	0,464 a	0,238 a	0,131 a
TIRAN					
T0	0,000 b	0,000 b	0,000 b	0,000 b	0,000 b
T1	0,210 a	0,025 ab	0,134 a	0,210 a	0,025 b
T2	0,158 a	0,052 a	0,125 ab	0,158 a	0,052 b
T3	0,163 a	0,052 a	0,176 a	0,163 a	0,052 b
T4	-	-	0,178 a	0,281 a	0,154 a

* significativas e ^{ns} não significativas a 5%. Médias seguidas de mesma letra na coluna em cada modelo de gotejador não diferem entre si.

**Para os tratamentos de ácido e cloro: T0 – 0 horas; T1 – 12 horas; T2 – 24 horas; T3 – 36 horas.

**Para os tratamentos de ácido+lavagem ultrassônica e cloro+lavagem ultrassônica: T0 – 0 horas; T1 – 12 horas; T2 – 24 horas; T3 – 36 horas; T4 - 15 minutos de lavagem ultrassônica.

**Para o tratamento de lavagem ultrassônica: T0 – 0 minutos; T1 – 5 minutos; T2 – 15 minutos; T3 – 30 minutos; T4 – 60 minutos.

No gotejador Streamline (Tabela 16) os melhores tempos em cada tratamento foram T1, T2 e T3 no tratamento com ácido, T2 e T3 no tratamento com cloro, T3 e T4 no tratamento com lavagem ultrassônica T1 e T4 que se diferenciaram estatisticamente do T0 no tratamento com ácido+lavagem ultrassônica e T2, T3 e T4 no tratamento de cloro+lavagem ultrassônica. No tratamento com ácido+lavagem ultrassônica o T1 é estatisticamente diferente de T0 mas o T2 e o T3 não os são, devido, possivelmente ter ocorrido também pelo desprendimento do material de biofilme aderido às paredes dos tubos e ter obstruído os gotejadores devido à ação do ácido, o que levou o T2 e T3 a ter uma vazão estatisticamente igual a T0 e T1 uma vazão maior que T0.

Ainda na Tabela 16 nota-se que os melhores tempos de tratamento para desobstrução os quais aumentaram a vazão dos gotejadores Tiran, foram: T1, T2 e T3 do tratamento com ácido e cloro, T1, T3 e T4 do tratamento de lavagem ultrassônica todos os

tempos foram melhores que o T0 no tratamento com a combinação de cloro+lavagem ultrassônica e apenas o T4 foi melhor estatisticamente do T0 no tratamento com ácido+lavagem ultrassônica. No tratamento de lavagem ultrassônica o T0 é diferente de T1 mas igual a T2, o que deve ter ocorrido devido ao desprendimento de biofilme aderido as paredes dos tubos em virtude da vibração das ondas ultrassônicas do tratamento de lavagem ultrassônica.

Foram realizadas as análises estatísticas dos dados de aumento de vazão dos gotejadores após a aplicação dos tratamentos, comparando todos os tempos de todos os tratamentos, verificando e o melhor tempo e melhor tratamento (Tabela 17).

Tabela 17. Comparação de médias pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do aumento de vazão (Q+) em função do tempo e do tratamento em dos gotejadores obstruídos com água residuária

TALDRIP *			STREAMLINE*			TIRAN*		
**Tratamento - Tempo	Q+ (Lh-1)		**Tratamento - Tempo	Q+ (Lh-1)		**Tratamento - Tempo	Q+ (Lh-1)	
ALU-T4	0,318	A	LU-T3	0,470	A	ALU-T4	0,281	A
A-T3	0,256	AB	LU-T4	0,464	A	A-T1	0,210	AB
ALU-T3	0,256	AB	ALU-T4	0,238	B	ALU-T1	0,210	AB
A-T1	0,251	AB	A-T1	0,180	BC	LU-T4	0,178	ABC
ALU-T1	0,251	AB	ALU-T1	0,180	BC	LU-T3	0,176	ABCD
A-T2	0,230	ABC	A-T3	0,167	BC	A-T3	0,163	ABCD
ALU-T2	0,230	ABC	ALU-T3	0,167	BC	ALU-T3	0,163	ABCD
CLU-T4	0,227	ABC	A-T2	0,155	BC	A-T2	0,158	ABCD
C-T2	0,139	ABC	ALU-T2	0,155	BC	ALU-T2	0,158	ABCD
CLU-T2	0,139	ABC	CLU-T4	0,131	BC	CLU-T4	0,154	ABCD
LU-T4	0,133	ABC	LU-T1	0,115	BC	LU-T1	0,134	BCDE
C-T3	0,101	ABC	LU-T2	0,108	BC	LU-T2	0,125	BCDE
CLU-T3	0,101	ABC	C-T2	0,082	BC	C-T2	0,052	CDE
LU-T3	0,083	ABC	CLU-T2	0,082	BC	C-T3	0,052	CDE
LU-T2	0,070	BC	C-T3	0,076	BC	CLU-T2	0,052	CDE
C-T1	0,068	BC	CLU-T3	0,076	BC	CLU-T3	0,052	CDE
CLU-T1	0,068	BC	C-T1	0,015	C	C-T1	0,025	DE
LU-T1	0,017	BC	CLU-T1	0,015	C	CLU-T1	0,025	DE
A-T0	0,000	C	A-T0	0,000	C	A-T0	0,000	E
C-T0	0,000	C	C-T0	0,000	C	C-T0	0,000	E
LU-T0	0,000	C	LU-T0	0,000	C	LU-T0	0,000	E
ALU-T0	0,000	C	ALU-T0	0,000	C	ALU-T0	0,000	E
CLU-T0	0,000	C	CLU-T0	0,000	C	CLU-T0	0,000	E

* significativas e. ^{ns} não significativas a 5%. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si.

**Tratamentos: LU-T0 = Lavagem ultrassônica 0 minutos; LU-T1 = Lavagem ultrassônica 5 minutos; LU-T2 = Lavagem ultrassônica 15 minutos; LU-T3 = Lavagem ultrassônica 30 minutos; LU-T4 = Lavagem ultrassônica 60 minutos; A-T0 = acidificação em 0 horas; A-T1 = acidificação em 12 horas; A-T2 = acidificação em 24 horas; A-T3 = acidificação em 36 horas; C-T0 = Cloração em 0 horas; C-T1 = Cloração em 12 horas; C-T2 = Cloração em 24 horas; C-T3 = Cloração em

36 horas; ALU-T0 = acidificação em 0 horas; ALU-T1 = acidificação em 12 horas; ALU-T2 = acidificação em 24 horas; ALU-T3 = acidificação em 36 horas; ALU-T4 = mais 15 minutos de lavagem ultrassônica; CLU-T0 = Cloração em 0 horas; CLU-T1 = Cloração em 12 horas; CLU-T2 = Cloração em 24 horas; CLU-T3 = Cloração em 36 horas; CLU-T4 = mais 15 minutos de lavagem ultrassônica.

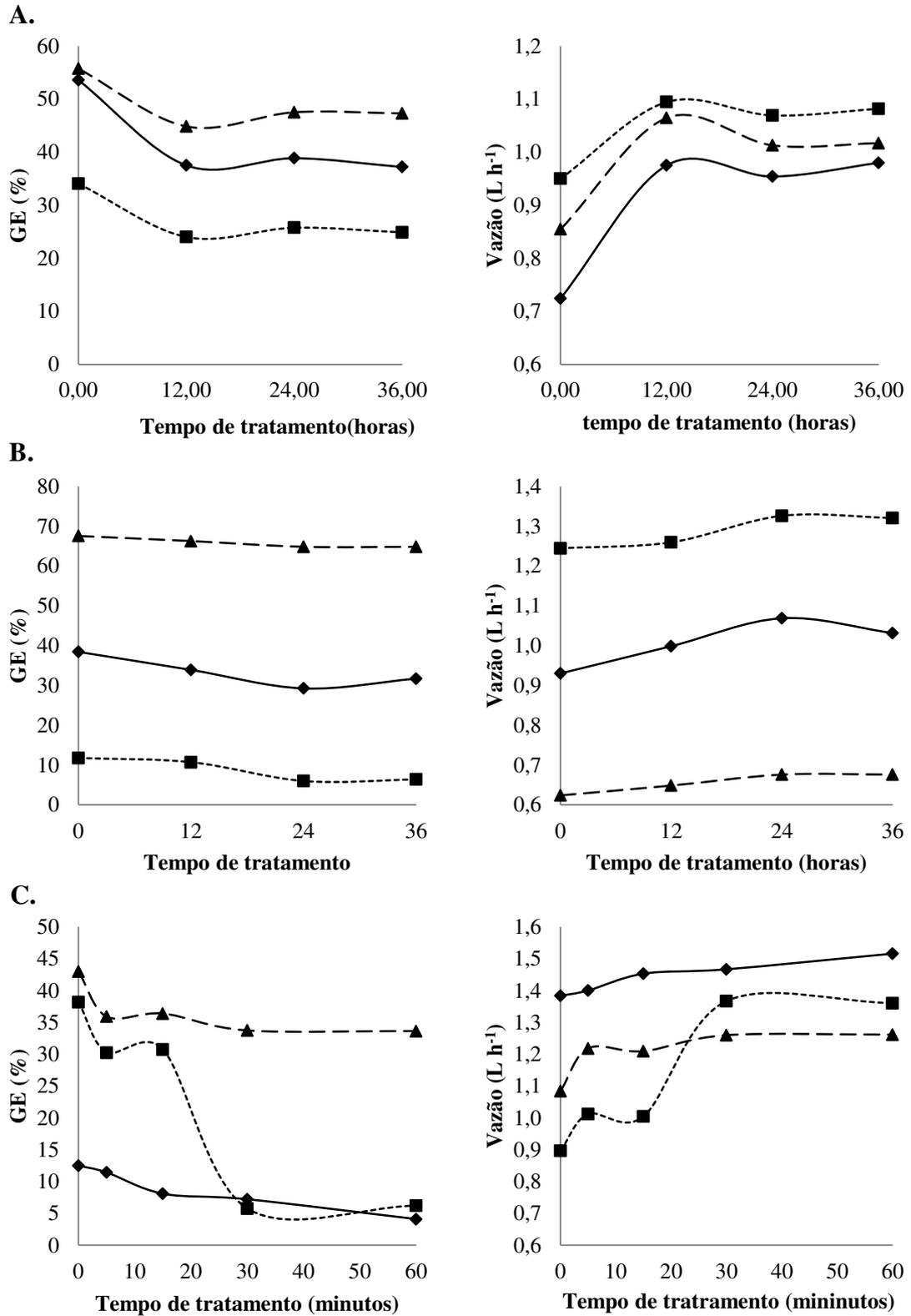
Estatisticamente, os tratamentos que proporcionaram os maiores aumentos de vazão dos gotejadores foram a lavagem ultrassônica nos tempos T3 e T4, chegando a aumentar 0,46 e 0,47 Lh⁻¹, respectivamente, sendo os melhores tratamentos no gotejador Streamline. Os tratamentos com ácido fosfórico a pH 2 e ácido+lavagem ultrassônica também estão entre os melhores tratamentos estatisticamente, nos gotejadores Taldrip e Tiran (Tabela 17).

No gotejador Taldrip pode-se verificar, na Tabela 17, que os tratamentos de acidificação nos tempos T1, T2, T3, ácido+lavagem ultrassônica nos tempos T1, T2, T3 e T4, cálcio nos tempos T2 e T3, Cálcio+lavagem ultrassônica nos tempos T2, T3 e T4, e lavagem ultrassônica nos tempos T3 e T4 são estatisticamente iguais apresentando os melhores resultados para aumentar a vazão do gotejador obstruído, é possível assim, fazer uma relação do custo benefício e utilizar um destes métodos nos tempos apropriados para a desobstrução.

Na análise estatística do gotejador Tiran os tratamentos com melhores resultados, sendo iguais estatisticamente, foram ácido nos tempos T1, T2 e T3, ácido+lavagem ultrassônica nos tempos T1, T2, T3 e T4, cloro+lavagem ultrassônica no tempo T4 e lavagem ultrassônica nos tempos T3 e T4 (Tabela 17). Assim, a utilização de qualquer um destes métodos aumentará estatisticamente a vazão do gotejador Tiran, no entanto, a lavagem ultrassônica é um método mecânico que não interfere quimicamente na água, no solo e nas plantas, uma vez que produtos químicos podem causar algum efeito indesejável (VIEIRA *et al.*, 2004).

O processo de lavagem ultrassônica isolado e/ou combinado com os tratamentos convencionais de desobstrução de gotejadores, como ácido e cloro, têm grande potencial para serem eficientes na desobstrução de gotejadores obstruídos com água residuária, apresentando aumento significativo de vazão dos gotejadores. A lavagem ultrassônica deve ser estudada com maior aprofundamento para esta aplicação pois há grande potencial para se tornar um dos melhores métodos de desobstrução de gotejadores, mesmo porque já possui ampla aplicação na indústria com desempenhos satisfatórios, para limpezas em diferentes configurações de peças com furos, entranhas, ranhuras etc. (ENGE SOLUTIONS ULTRASSONIC, 2015) e consegue atingir o grau de 100% de limpeza (COTELL, *et al.*, 1994).

Na Figura 23 são apresentados os dados de GE e de vazão dos gotejadores Taldrip, Streamline e Tiran diante dos tempos de aplicação dos tratamentos de desobstrução.



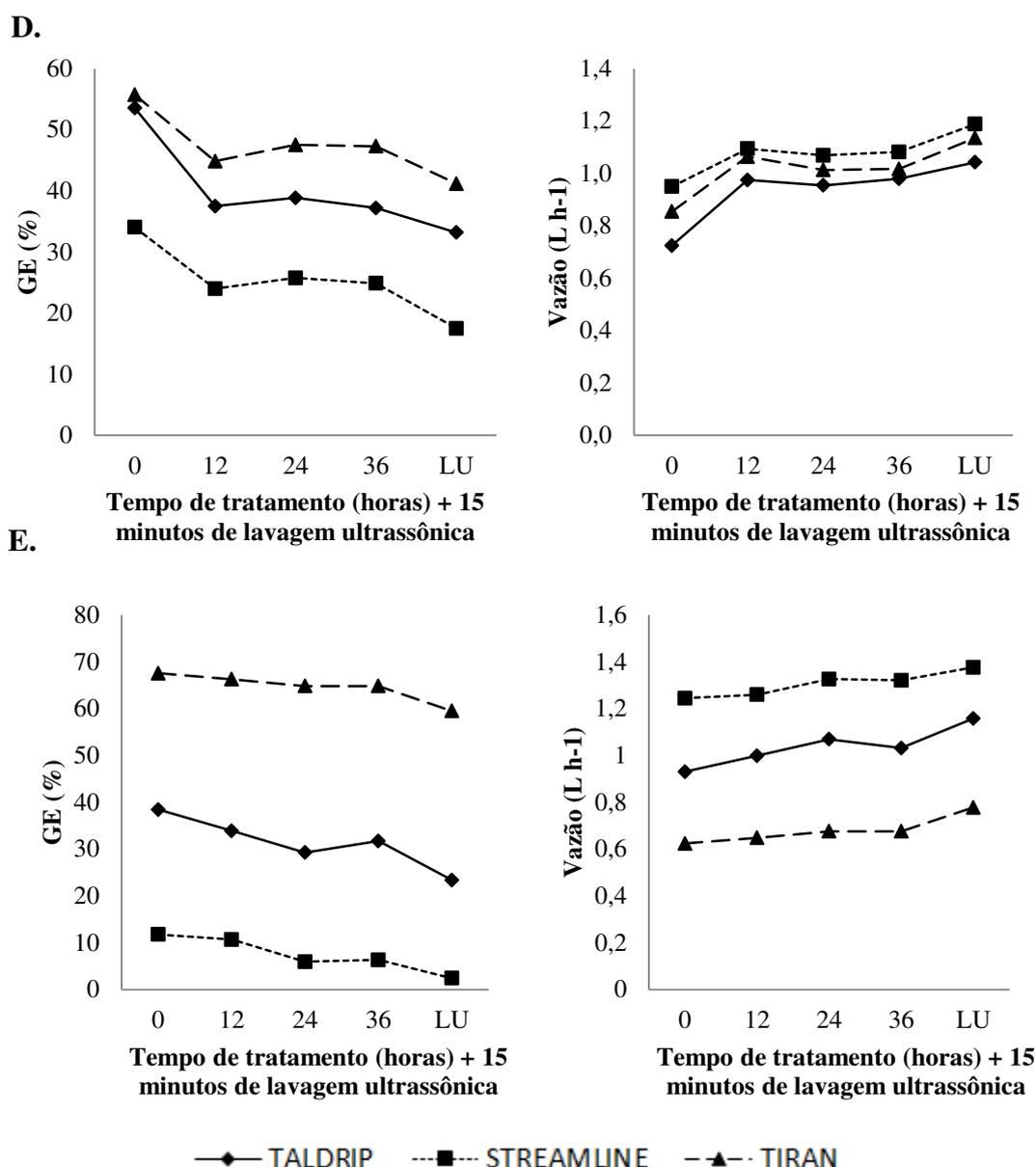


Figura 23. Grau de entupimento (GE) e vazão dos gotejadores diante dos tempos de tratamentos de desobstrução de: A) acidificação; B) cloração; C) lavagem ultrassônica; D) acidificação+lavagem ultrassônica e; E) cloração+lavagem ultrassônica, funcionando com água residuária

Na Figura 23A, observa-se que a aplicação de ácido fosfórico sofreu diminuição no grau de entupimento, e conseqüentemente, no aumento da vazão após sua primeira aplicação com tempo de espera de 12 horas, com redução do GE de 34 para 24%, 53 para 37% e 55 para 44% respectivamente para os gotejadores Streamline, Taldrip e Tiran.

Na Figura 23B os gotejadores submetidos ao tratamento com cloro livre tiveram seus efeitos mais acentuados nos gotejadores Taldrip e Streamline cujo valores de GE passaram de 38 para 31% e de 11 para 6%, respectivamente. Teixeira *et al.*, (2008) e Cararo and Botrel (2007), verificaram, estudando a desobstrução de gotejadores de

irrigação localizada, que o cloro livre teve melhor resultado que os tratamentos de ácido nítrico e aplicação de ar comprimido no sistema.

Na Figura 23C, observou-se com o tratamento de lavagem ultrassônica, que os gotejadores tiveram melhoria em suas vazões e redução no grau de entupimento, porém o gotejador Streamline sofreu uma redução muito alta do GE, de 38 para 6%, sendo observado que o processo ultrassônico pode chegar à desobstrução de 100% conforme relatam Cotel *et al.*(1994) e Pereira *et al.*, (2010).

Pode-se verificar na Figura 23D e na Figura 23E, que mesmo após o processo de limpeza com acidificação e cloração, a lavagem ultrassônica aumentou a vazão dos gotejadores de irrigação, mostrando ser mais eficiente no processo de limpeza, diante dos tratamentos de ácido e cloro.

6.3.2. Desobstrução dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio

Depois que os gotejadores passaram pelo processo de obstrução utilizando água com elevado teor de cálcio funcionando durante 1200 horas, foram aplicados os tratamentos de desobstrução de ácido fosfórico a pH 2, cloro livre, lavagem ultrassônica, combinação de acidificação+lavagem ultrassônica e cloração+lavagem ultrassônica.

6.3.2.1. Desobstrução dos gotejadores com água com elevado teor de cálcio em função dos tratamentos

Na Figura 24 são apresentados os valores de GE dos gotejadores obstruídos e desobstruídos pelos dos cinco tratamentos de desobstrução.

Observa-se na Figura 24, que os tratamentos sobre o gotejador Tiran não teve efeito devido à não obstrução do mesmo pelo cálcio, apresentando valores negativos de GE, ou seja, houve aumento de vazão em relação à vazão inicial de caracterização dos gotejadores. No entanto, nos gotejadores Streamline e Taldrip os efeitos dos tratamentos foram notórios, sendo maiores no gotejador Taldrip.

O efeito do tratamento da lavagem ultrassônica obteve a maior amplitude do GE, sendo este o tratamento que mais desobstruiu, onde houve a diminuição de 33 e 30% do GE do Taldrip e Streamline respectivamente. A lavagem ultrassônica ainda conseguiu fazer a desobstrução total do gotejador Taldrip chegando ao GE de 0% (Figura 24A e Figura 24B). O gotejador Tiram apresentou alguns valores negativos de GE mesmo após

serem operados por 1200 horas com água com cálcio, pois desde o início ele não apresentou sinais de obstrução.

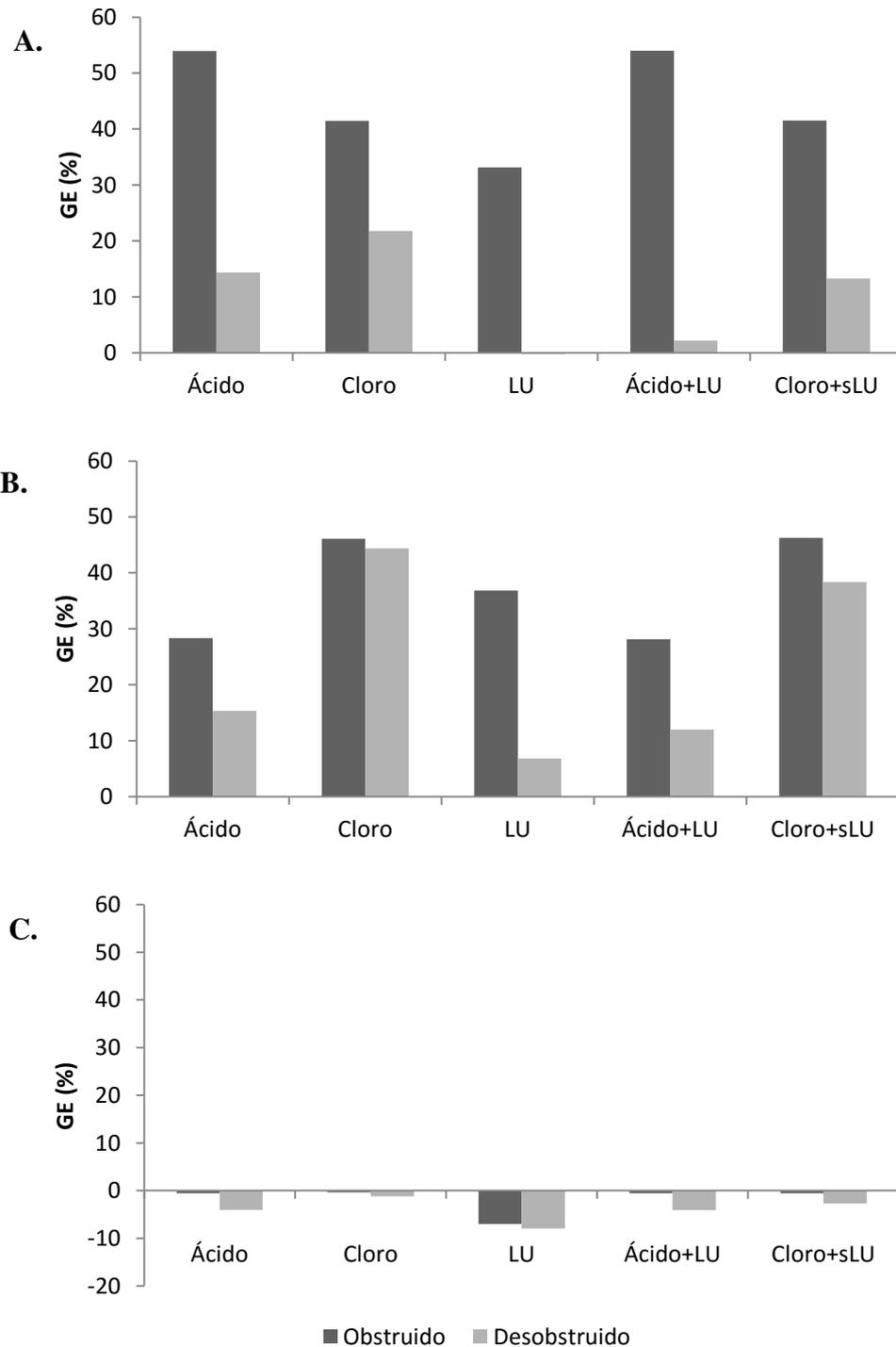


Figura 24. Redução do grau de entupimento (GE) dos gotejadores Taldrip (A) Steramline (B) e Tiran (C) obstruídos com água com elevado teor de cálcio para os tratamentos de desobstrução: acidificação, cloração, lavagem ultrassônica (LU), acidificação+lavagem ultrassônica e cloração+lavagem ultrassônica

Outro tratamento que correspondeu, de modo satisfatório, foi a combinação do ácido com lavagem ultrassônica atingindo a valores de GE de 2 e 16%, para os gotejadores Taldrip e Streamline, respectivamente. Assim é possível observar que o tratamento de desobstrução com o processo de lavagem ultrassônica diminui muito os valores de GE em relação aos outros tratamentos. Também é possível verificar que o processo de lavagem ultrassônica na desobstrução dos gotejadores funcionando com água com elevado teor de cálcio é mais eficiente que a desobstrução dos gotejadores funcionando com água residuária, principalmente quando se comparam os resultados com os de outros tratamentos.

Para verificar o efeito dos tratamentos foi realizada uma análise estatística de comparação de médias entre os dados de GE, com confiança de 95%, em que os p-valores estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 P-valor dos dados de grau de entupimento (GE) na comparação de médias dos tratamentos de desobstrução com nível de confiança de 95% dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio

Taldrip	Streamline	Tiran
----- p - valor -----		
0,068 ^{ns}	0,003*	0,007*

*Significativo e ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade

Verifica-se na Tabela 18 que para comparação de médias do gotejador Taldrip não houve significância com p-valor de 0,068 mas para os gotejadores Streamline e Tiram o p-valor foi de 0,003 e 0,007, respectivamente.

Na Tabela 19 estão apresentadas as diferenças estatísticas dos dados de GE de cada tratamento de desobstrução em cada modelo de gotejador com teste t de comparação de médias a 5% de significância.

Verifica-se na Tabela 19, que os menores valores de GE são gerados pelo processo de desobstrução de lavagem ultrassônica, porém estatisticamente para o gotejador Taldrip, a diferença não foi significativa, o que é possível verificar que o tratamento de lavagem ultrassônica é igual aos demais tratamentos. No gotejador Steramline a lavagem ultrassônica apresentou o menor resultado, porém foi estatisticamente igual ao tratamento de desobstrução de ácido e ácido+lavagem ultrassônica, indicando que quando se utiliza ácido para fazer a limpeza deste gotejador não é necessário ter o auxílio da lavagem ultrassônica porque são iguais estatisticamente, mas também indica que pode ser utilizada apenas a lavagem ultrassônica mostrando que este processo tem potencial de ser utilizado

com eficácia em desobstrução de gotejadores. Os valores de GE dos gotejadores Tiram foram negativos em todos os tratamentos, porém estatisticamente o único valor diferente, que foi o menor valor de GE dos tratamentos foi da lavagem ultrassônica.

Tabela 19. Comparação de médias do grau de entupimento (GE) em função dos tratamentos de desobstrução com ácido, cloro, lavagem ultrassônica, ácido + lavagem ultrassônica e cloro + lavagem ultrassônica pelo teste T a 5% de probabilidade dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio

Tratamento/Gotejador	Taldrip ^{ns}	Streamline*	Tiran*
	----- GE -----		
Ácido	14,382	15,316 b	-4,049 a
Cloro	21,802	44,381 a	-1,152 a
Ácido+Lav. Ultras.	2,208	11,99 b	-4,082 a
Cloro+Lav. Ultras.	13,299	38,368 a	-2,719 a
Lav. Ultras.	-0,223	6,848 b	-7,928 b

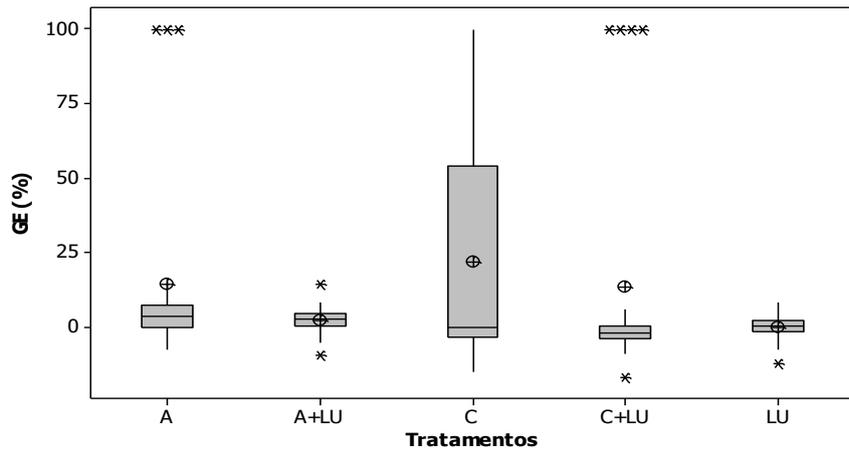
* significativas e ^{ns} não significativas a 5%. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si.

Na Figura 25 é possível verificar dispersão, simetria, homogeneidade, pontos discrepantes e médias dos dados de GE com a análise dos gráficos de BoxPlot, em função dos tratamentos de desobstrução.

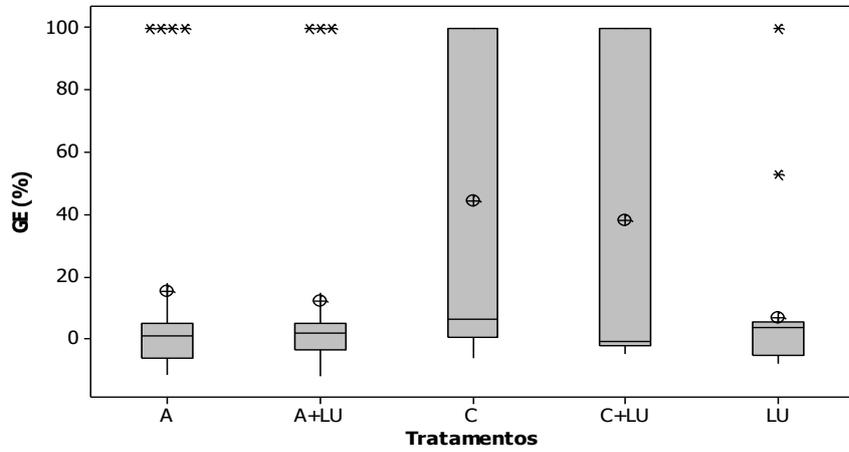
Os valores de GE do gotejador Taldrip se encontram concentrados entre o primeiro (Q1) e o terceiro quartil (Q3), porém há dados discrepantes nos tratamentos com ácido e cloro+lavagem ultrassônica com valores de 100% significando que estes gotejadores continuaram obstruídos totalmente, mesmo após os tratamentos, estes valores alteram a média dos tratamentos que ficaram fora dos limites dos Q1 e Q3. Nos tratamentos de ácido+ lavagem ultrassônica e lavagem ultrassônica houve poucos valores discrepantes, os quais estão próximos a concentração de dados, significando que estes tratamentos conseguiram desobstruir os gotejadores e deixá-los em determinado padrão de vazão. O tratamento com cloro foi o mais disperso, porém não apresentou pontos discrepantes (Figura 25).

No gotejador Streamline os tratamentos de cloro e cloro+lavagem ultrassônica estão totalmente dispersos, com variação de 0 a 100 e -2 a 100 respectivamente, entre o Q1 e Q3, mostrando que os tratamentos não foram eficientes em todos os gotejadores. Já para os tratamentos de ácido, ácido+lavagem ultrassônica e lavagem ultrassônica, os dados estão mais homogêneos, porém há pontos discrepantes que elevaram a média de GE acima do Q3. Todos os pontos discrepantes estão localizados na parte superior do gráfico, indicando que estes gotejadores ainda permanecem obstruídos após os tratamentos (Figura 25).

A.



B.



C.

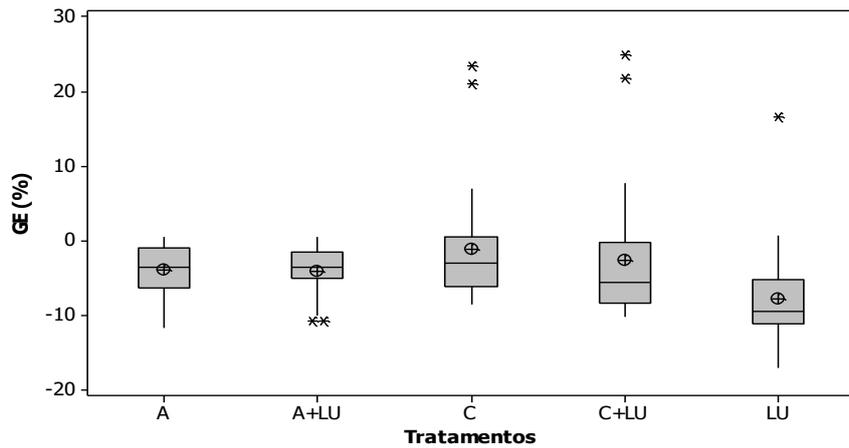


Figura 25. Boxplot dos dados de grau de entupimento (GE) dos tratamentos de ácido (A), cloro (C), lavagem ultrassônica (LU) ácido + lavagem ultrassônica (A+LU) e cloro + lavagem ultrassônica (C+LU) para os gotejadores Taldrip (A) Streamline (B) e Tiran (C) obstruídos com água com elevado teor de cálcio

No gotejador Tiran não houve aumento do grau de entupimento, cujo os dados permaneceram bastante homogêneos e concentrados ao redor da média, apesar de haver pontos discrepantes em alguns tratamentos. Os pontos discrepantes correspondem aos poucos gotejadores que obstruíram com água com elevado teor de cálcio, mostrando que o gotejador Tiran é resistente ao entupimento com precipitados de cálcio.

Dessa forma, pode-se verificar que em gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio, a eficiência do tratamento de lavagem ultrassônica em relação aos outros tratamentos é de igual para melhor, principalmente no gotejador Streamline, em que o tratamento de lavagem ultrassônica, além de ser mais eficiente conseguiu desobstruir praticamente todos os gotejadores deixando-os em um mesmo nível de vazão.

6.3.2.2. Desobstrução dos gotejadores com elevado teor de cálcio em função dos tempos de tratamentos

Assim como no experimento com água residuária, houve diferentes tempos de exposição dos gotejadores aos tratamentos de desobstrução do experimento usando água com elevado teor de cálcio. Foi realizado uma análise de comparação de médias do aumento de vazão após o tempo de cada tratamento com confiança de 95% dos valores de GE. Na Tabela 20 se encontram os valores dos p-valores dos dados de aumento de vazão após cada tratamento verificando a significância da comparação das médias.

Tabela 20. P-valor dos dados médios de aumento de vazão (Q+) após os diferentes tempos de aplicação em cada tratamento na comparação de médias com confiança de 95%, nos gotejadores ostruídos com água com elevado teor de cálcio

Gotejador / Tratamento	Ácido	Cloro	Lav. ultr	Áci+Lav ultr	Clo+Lav. ultr
----- p - valor -----					
Taldrip	0,001	0,039	0,012	0,000	0,015
Streamline	0,049	0,017	0,003	0,084	0,034
Tiran	0,481	0,000	0,014	0,549	0,000

Verifica-se na Tabela 20, que os tratamentos não significativos na comparação de médias entre os tempos de aplicação dos tratamentos foram, ácido (0,481) e ácido+lavagem ultrassônica (0,549) para o gotejador Tiran. Os demais tempos dos tratamentos foram significativos na comparação das médias de aumento de vazão.

Para verificar as diferenças foi realizada uma análise de comparação das médias do aumento de vazão dos gotejadores após a aplicação dos tratamentos em tempos

diferentes. A comparação de médias foi feita pelo teste Tukey a 5% de significância para cada modelo de gotejador, conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21. Comparação de médias pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do aumento de vazão (Q+) em função do tempo de tratamento em cada modelo de gotejador obstruídos com com água com elevado teor de cálcio

TALDRIP					
Tratamento	Ácido	Cloro	Lav. Ultras.	Áci+lav. Ultr.	Clo+lav. Ultr.
**Tempo	Valores médios do aumento de vazão dos gotejadores (Lh-1)				
T0	0,000 b	0,000 b	0,000 b	0,000 b	0,000 b
T1	0,344 ab	0,115 ab	0,432 ab	0,344 ab	0,115 ab
T2	0,569 a	0,257 ab	0,533 a	0,569 a	0,257 ab
T3	0,602 a	0,297 a	0,551 a	0,602 a	0,297 ab
T4	-	-	0,507 a	0,788 a	0,427 a
STREAMLINE					
T0	0,000 b	0,000 b	0,000 b	0,000 a	0,000 b
T1	0,113 ab	0,028 ab	0,137 ab	0,113 a	0,028 ab
T2	0,184 ab	0,033 a	0,457 a	0,184 a	0,033 ab
T3	0,236 a	0,025 ab	0,445 a	0,236 a	0,025 ab
T4	-	-	0,429 a	0,227 a	0,112 a
TIRAN					
T0	0,000 ^{ns}	0,000 a	0,000 b	0,000 ^{ns}	0,000 bc
T1	0,029 ^{ns}	-0,032 b	0,008 ab	0,029 ^{ns}	-0,032 c
T2	0,039 ^{ns}	0,000 a	0,026 ab	0,039 ^{ns}	0,000 bc
T3	0,064 ^{ns}	0,016 a	0,035 a	0,064 ^{ns}	0,016 ab
T4	-	-	0,017 ab	0,065 ^{ns}	0,042 a

* significativas e ^{ns} não significativas a 5%. Médias seguidas de mesma letra na coluna em cada modelo de gotejador não diferem entre si.

**Para os tratamentos de ácido e cloro: T0 – 0 horas; T1 – 12 horas; T2 – 24 horas; T3 – 36 horas.

**Para os tratamentos de ácido+lavagem ultrassônica e cloro+lavagem ultrassônica: T0 – 0 horas; T1 – 12 horas; T2 – 24 horas; T3 – 36 horas; T4 - 15 minutos de lavagem ultrassônica.

**Para o tratamento de lavagem ultrassônica: T0 – 0 minutos; T1 – 5 minutos; T2 – 15 minutos; T3 – 30 minutos; T4 – 60 minutos

Na Tabela 21, constata-se que não houve diferença estatística entre os tempos T1, T2 e T3 para os tratamentos de ácido e cloro. Também não houve diferença estatística entre os tempos T1, T2, T3 e T4 nos tratamentos de lavagem ultrassônica, ácido+ lavagem ultrassônica e cloro+lavagem ultrassônica. Isso indica que, independente do tempo que o gotejador for exposto aos tratamentos, ele vai ter o mesmo aumento de vazão. Entretanto os tempos dos tratamentos que diferenciaram de T0 foram T2 e T3 do tratamento de ácido, T3 do tratamento com cloro, T2, T3 e T4 do tratamento com lavagem ultrassônica e ácido+lavagem ultrassônica e T4 do tratamento com cloro+lavagem ultrassônica.

No gotejador Streamline, a partir do T2 no tratamento de lavagem ultrassônica, começou a diferenciar de T0, aumentando estatisticamente a vazão deles (Tabela 21). Também se verificou que não houve diferença estatística entre os tempos de tratamento de ácido+lavagem ultrassônica, sendo a vazão de T0 até T4 iguais, ou seja, não ocorreu estatisticamente desobstrução dos gotejadores neste tratamento.

Ainda na Tabela 21, verificou-se que o tratamento com lavagem ultrassônica teve melhor resultados no T3 que foi estatisticamente diferente de T0 e no tratamento de cloro+lavagem ultrassônica apenas quando aplicou o processo de lavagem ultrassônica (T4) que o valor de aumento de vazão ficou estatisticamente diferente de T0. Neste gotejador verificou-se que o desempenho do processo de lavagem ultrassônica para desobstrução dos gotejadores foi eficaz.

O tempo de tratamento para a desobstrução dos gotejadores obstruídos com de água com elevado teor de cálcio e com água residuária é diferente, podendo ser mais eficiente dependendo do tempo de exposição e de cada tratamento. Desta maneira é possível economizar tempo e produtos químicos no tratamento, se a escolha do tratamento e do seu tempo de aplicação for correta, também é possível verificar o tempo de lavagem ultrassônica ideal para a desobstrução de gotejadores, podendo ser realizado o dimensionamento de projetos para este processo.

Alguns trabalhos de desobstrução foram realizados por Karaca and Uçan (2013) que verificaram que gotejadores obstruídos com CaCO_3 , podem ser desobstruídos com diferentes concentrações de ácido clorídrico, porém constataram que concentrações até 10 ppm de ácido podem recuperar o desempenho hidráulico de sistemas que sofreram diminuição na vazão menor que 10%. Outros autores que estudaram desobstrução de gotejadores foram Teixeira *et al.* (2008) os quais aplicaram diferentes doses de cloro (10 e 50 mg L^{-1}) e ácido nítrico a pH 2, e obtiveram os melhores resultados com aplicação de 50 mg L^{-1} de cloro livre.

Na Tabela 22 estão os valores do aumento de vazão de todos os tempos dos tratamentos e a comparação de médias pelo teste Tukey a 5% de significância.

Nota-se na Tabela 22, que os melhores tempos e tratamentos do gotejador Taldrip são todos iguais estatisticamente, exceto os tratamentos em T0 e T1, para cálcio e cálcio+lavagem ultrassônica, assim, é possível afirmar que, estatisticamente, quaisquer uns destes tratamentos podem desobstruir e elevar a vazão do gotejador Taldrip. Porém é observa-se que o aumento de vazão com o tempo T4 (tempo de lavagem ultrassônica) do tratamento com ácido+lavagem ultrassônica foi de $0,788 \text{ Lh}^{-1}$ que é 46% da vazão nominal

do gotejador (1,7 Lh⁻¹). Mesmo que os tratamentos com lavagem ultrassônica também tenham alcançado valores significativos de aumento de vazão sendo 0,43; 0,53; 0,55 e 0,50 L h⁻¹ para os tempos de T1, T2, T3 e T4 respectivamente, mostrando o potencial que este processo tem para ser utilizado em desobstrução de gotejadores de irrigação localizada.

Tabela 22. Comparação de médias pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade, do aumento de vazão (Q+) em função do tempo e do tratamento em cada modelo de gotejador obstruídos com água com elevado teor de cálcio

TALDRIP - AC			STREAMLINE - AC			TIRAN - AC		
Tratamento / Tempo	Q+(Lh ⁻¹)		Tratamento / Tempo	Q+(Lh ⁻¹)		Tratamento / Tempo	Q+(Lh ⁻¹)	
ALU-T4	0,788	A	LU-T2	0,457	A	ALU-T4	0,065	A
A-T3	0,602	AB	LU-T3	0,445	A	A-T3	0,064	A
ALU-T3	0,602	AB	LU-T4	0,429	AB	ALU-T3	0,064	A
A-T2	0,569	AB	A-T3	0,236	ABC	CLU-T4	0,042	A
AS-T2	0,569	AB	ALU-T3	0,236	ABC	A-T2	0,039	A
LU-T3	0,551	ABC	ALU-T4	0,227	ABC	ALU-T2	0,039	A
LU-T2	0,533	ABC	A-T2	0,184	ABC	LU-T3	0,035	A
LU-T4	0,507	ABC	ALU-T2	0,184	ABC	A-T1	0,029	A
LU-T1	0,432	ABC	LU-T1	0,137	ABC	ALU-T1	0,029	A
CLU-T4	0,427	ABC	A-T1	0,113	BC	LU-T2	0,026	A
A-T1	0,344	ABC	ALU-T1	0,113	BC	LU-T4	0,017	A
ALU-T1	0,344	ABC	CLU-T4	0,112	BC	C-T3	0,016	A
C-T3	0,297	ABC	C-T2	0,033	C	CLU-T3	0,016	A
CLU-T3	0,297	ABC	CLU-T2	0,033	C	LU-T1	0,008	A
C-T2	0,257	ABC	C-T1	0,028	C	A-T0	0,000	A
CLU-T2	0,257	ABC	CLU-T1	0,028	C	C-T0	0,000	A
C-T1	0,115	BC	C-T3	0,025	C	C-T2	0,000	A
CLU-T1	0,115	BC	CLU-T3	0,025	C	LU-T0	0,000	A
A-T0	0,000	C	A-T0	0,000	C	ALU-T0	0,000	A
C-T0	0,000	C	C-T0	0,000	C	CLU-T0	0,000	A
S-T0	0,000	C	LU-T0	0,000	C	CLU-T2	0,000	A
ALU-T0	0,000	C	ALU-T0	0,000	C	C-T1	-0,032	A
CLU-T0	0,000	C	CLU-T0	0,000	C	CLU-T1	-0,032	A

* significativas e. ^{ns} não significativas a 5%. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si.

**Tratamentos: LU-T0 = Lavagem ultrassônica 0 minutos; LU-T1 = Lavagem ultrassônica 5 minutos; LU-T2 = Lavagem ultrassônica 15 minutos; LU-T3 = Lavagem ultrassônica 30 minutos; LU-T4 = Lavagem ultrassônica 60 minutos; A-T0 = acidificação em 0 horas; A-T1 = acidificação em 12 horas; A-T2 = acidificação em 24 horas; A-T3 = acidificação em 36 horas; C-T0 = Cloração em 0 horas; C-T1 = Cloração em 12 horas; C-T2 = Cloração em 24 horas; C-T3 = Cloração em 36 horas; ALU-T0 = acidificação em 0 horas; ALU-T1 = acidificação em 12 horas; ALU-T2 = acidificação em 24 horas; ALU-T3 = acidificação em 36 horas; ALU-T4 = mais 15 minutos de lavagem ultrassônica; CLU-T0 = Cloração em 0 horas; CLU-T1 = Cloração em 12 horas; CLU-T2 = Cloração em 24 horas; CLU-T3 = Cloração em 36 horas; CLU-T4 = mais 15 minutos de lavagem ultrassônica.

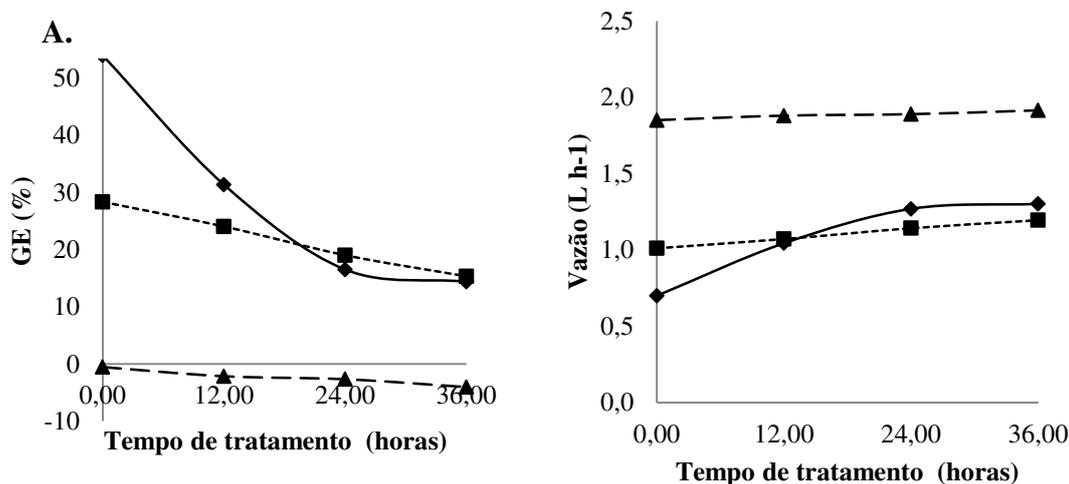
No gotejador Streamline (Tabela 22) pode-se perceber que os melhores tratamentos, estatisticamente iguais, são: Lavagem ultrassônica nos tempos T1, T2, T3 e

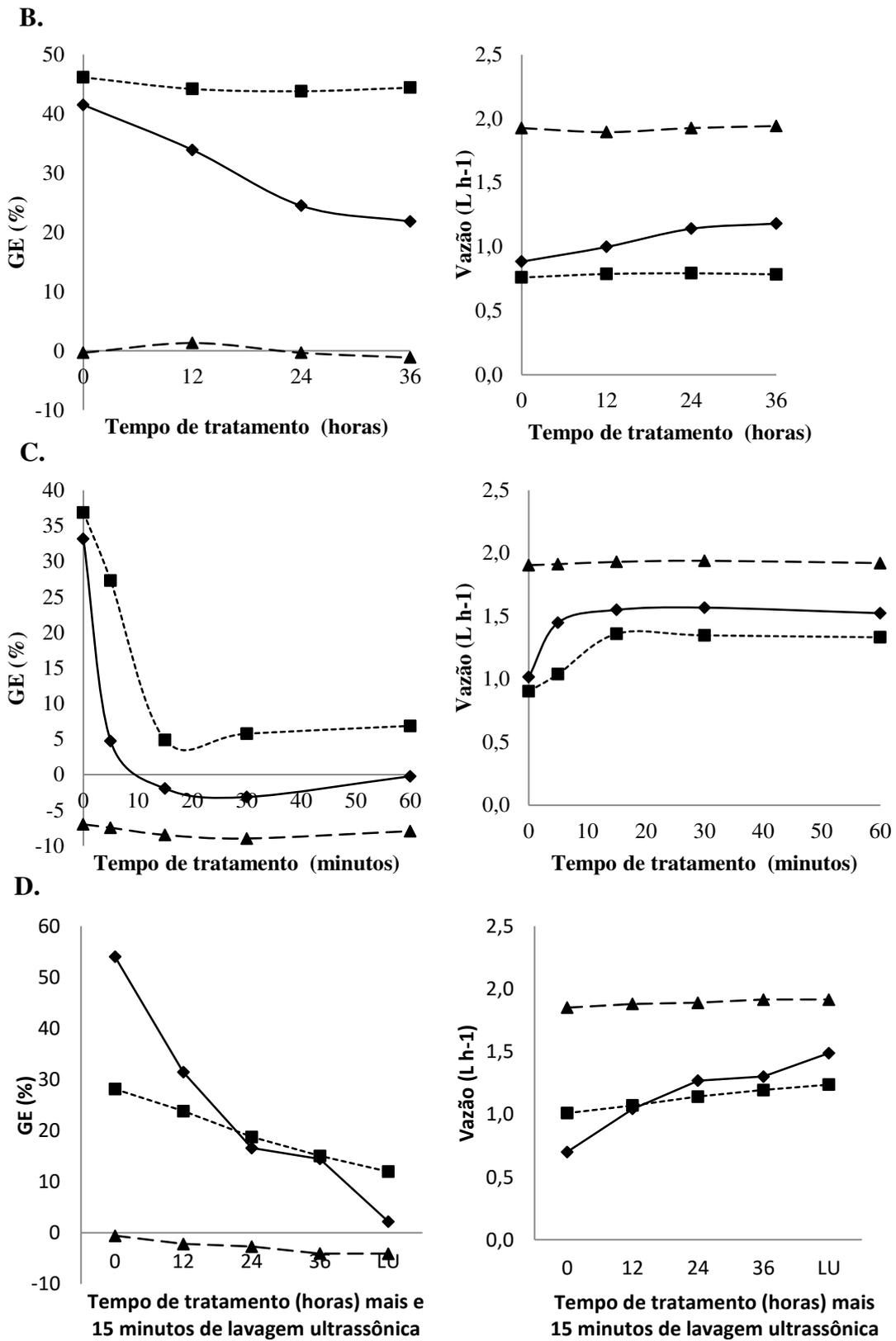
T4, ácido+lavagem ultrassônica nos tempos T2, T3 e T4 (tempo de lavagem ultrassônica) e ácido nos tempos T2 e T3. Também se verifica que o processo de lavagem ultrassônica é eficiente estatisticamente para este gotejador, chegando a aumentar a vazão em mais de $0,400 \text{ Lh}^{-1}$ e quando aliado a processos químicos de desobstrução, como o ácido, também pode se tornar mais eficiente. No gotejador Tiran não houve diferença estatística de desobstrução, haja visto que o gotejador não chegou a se obstruir da mesma forma como os demais gotejadores.

Outras formas alternativas que estão sendo estudadas para se utilizar no processo de desobstrução de gotejadores constituem-se no uso de bactérias. Eroglu *et al.* (2012) estudaram a desobstrução de gotejadores obstruídos com precipitados químicos de CaCO_3 aplicando bactérias de desobstrução. Sahin *et al.* (2005) verificaram que estirpes bacterianas podem ser utilizadas como agentes de antiobstrução em tratamentos de gotejadores dos sistemas de irrigação por gotejamento obstruído de forma biológica.

E possível verificar que o processo de lavagem ultrassônica, que é uma forma alternativa de desobstrução, tem grande potencial para ser implementado em grandes sistemas podendo recuperar 100% do desempenho hidráulico do sistema.

Na Figura 26 está sendo apresentado o desempenho dos tratamentos aplicados aos gotejadores obstruídos com precipitados químicos de cálcio.





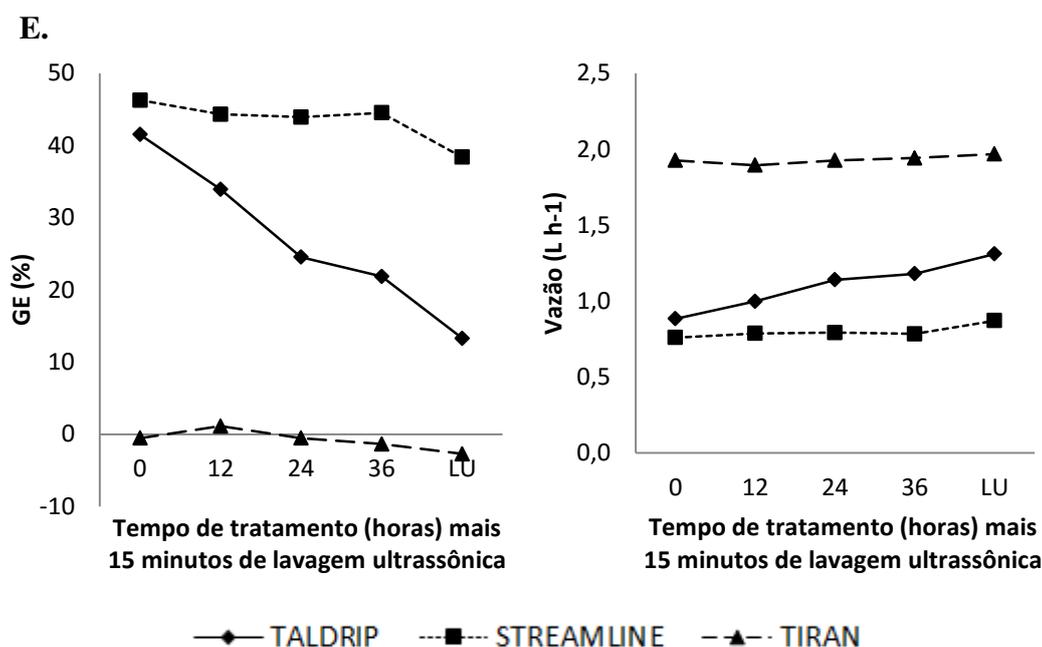


Figura 26. Grau de entupimento (GE) e vazão dos gotejadores para os tratamentos de desobstrução: (A) acidificação; B) cloração; C) lavagem ultrassônica; D) acidificação+lavagem ultrassônica e; E) cloração+lavagem ultrassônica, funcionando com água com elevado teor de água com cálcio.

Verificou-se na Figura 26, que o gotejador Tiran, não sofreu influência dos tratamentos, de vez que este gotejador não foi obstruído pelo cálcio, assim é possível perceber que em alguns valores a vazão foi maior que a vazão inicial de caracterização.

Na aplicação de cloro livre o gotejador Streamline também não sofreu mudança diante do tratamento, porém ele estava obstruído. Já os gotejadores submetidos ao tratamento com ácido fosfórico sofreram redução do GE e aumento de vazão. As reduções, com aplicação de ácido, foram de 28 para 15% e 54 para 14% respectivamente para Streamline e Taldrip (Figura 26B).

O processo de lavagem ultrassônica promoveu redução nos valores de GE após 15 minutos de 36 para 5% para o gotejador Streamline e o Taldrip se desobstruiu totalmente, demonstrando que não é necessário realizar uma lavagem ultrassônica por longos períodos para que seja realizada a limpeza completa do sistema (Figura 26C). O resultado de 100% de desobstrução está de acordo com os autores Cotel *et al* (1994) e Pereira *et al* (2010), que relatam que a lavagem ultrassônica pode atingir 100% de limpeza em peças com furos, entranhas, cavidades etc.

Na Figura 26D e E, é possível verificar que a aplicação combinada de acidificação e cloração com lavagem ultrassônica reduziu os valores de GE dos gotejadores. Com o tratamento de acidificação+lavagem ultrassônica o GE do gotejador Taldrip se reduziu de 54 para 2% e com o tratamento de cloração+lavagem ultrassônica reduziu de 41 para 13%.

Verifica-se ainda que mesmo após 36 horas de acidificação e cloração a lavagem ultrassônica de 15 minutos diminuiu os valores de GE de 15 para 2% e 21 para 13% respectivamente no gotejador Streamline. Percebe-se, mais uma vez, que a lavagem ultrassônica é um processo com potencial de limpeza dos gotejadores podendo recuperar em até 100% do desempenho hidráulico.

6.3.2.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das paredes do labirinto dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio após o tratamento de lavagem ultrassônica

Na Figura 27 estão as imagens obtidas pelo MEV do material aderido às paredes dos gotejadores após serem obstruídos com água residuária e água com elevado teor de cálcio e após o tratamento de lavagem ultrassônica, realizadas pelo MEV. Um detalhe na Figura 27 é que, no mesmo gotejador Taldrip, em sua forma construtiva havia dois tamanhos de entranhas do labirinto, assim, as imagens da Figura 27E e Figura 27F foram feitas com a parte menor e a imagem da Figura 27D da parte maior, o que acarretou na diferença do tamanho das imagens.

Verifica-se na Figura 27, o quanto havia de partículas e material aderido às paredes dos gotejadores e a diferença entre a deposição do material de água residuária e água com cálcio. Liu *et al.* (2012), verificaram, ao analisar o material de gotejadores de irrigação localizada, que existem partículas de diferentes tamanhos e porosidade, ou seja, com estruturas desorganizadas e diferentes.

Os gotejadores obstruídos com água residuária possuem uma estrutura de biofilme na forma de camadas mais regulares, já os gotejadores que foram obstruídos com água com cálcio possuem precipitados e materiais em forma de flóculos aderido à parede dos gotejadores (Figura 27B, Figura 27E e H).

Com o processo de lavagem ultrassônica verifica-se nas Figura 27C, F e I, uma redução do material aderido às paredes dos gotejadores, visto que tal processo emite ondas de ultrassom que contribuem para o desprendimento de praticamente todas as partículas aderidas às paredes dos gotejadores, podendo, segundo ENGE SOLUTIONS ULTRASSONIC (2015) promover a limpeza total do material da superfície desejada.

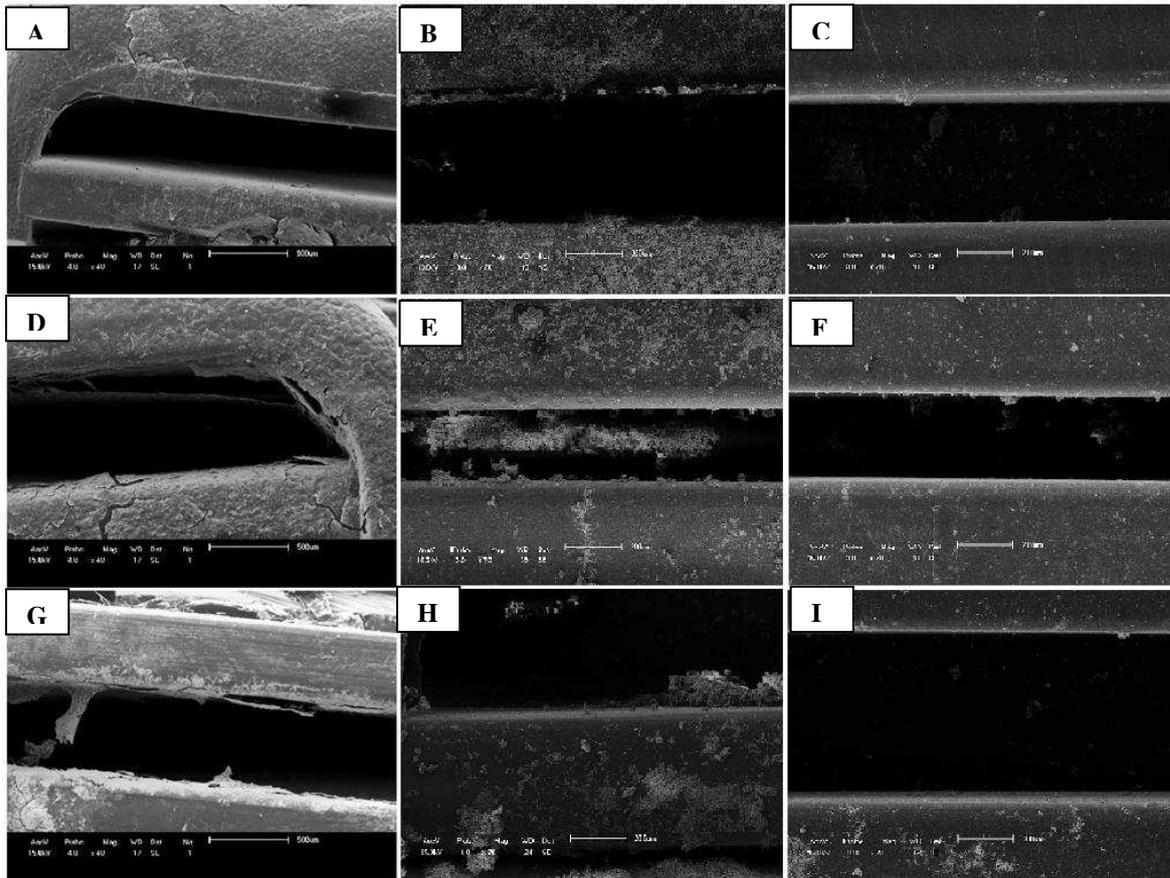


Figura 27. Imagens das paredes dos labirintos dos gotejadores Streamline (A, B e C), Taldrip (D, E e F) e Tiran (G, H e I) após a obstrução com água residuária (A, D e G, aumentado 40x), água com elevado teor de cálcio (B, E e H aumentado 70x) e após o tratamento de lavagem ultrassônica dos gotejadores obstruídos com água com elevado teor de cálcio (C, F e I, aumentado 70x)

Segundo Pereira (2010) a lavagem ultrassônica tem a capacidade de realizar limpezas nas mais complexas estruturas, como entranhas, furos, cavidades, fendas etc, tal como nas entranhas dos gotejadores. Como pode-se verificar nas superfícies dos gotejadores que passaram pelo processo de lavagem ultrassônica, praticamente não há material sobre a superfície dos gotejadores (Figura 27C, F e I) verificando que este é um processo com potencial para ser utilizado na desobstrução.

Devido às características de funcionamento do processo de lavagem ultrassônica foi possível observar que ele tem grande potencial na limpeza de gotejadores removendo da superfície das paredes o material aderido em decorrência do funcionamento do sistema com água de baixa qualidade.

7. CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados neste trabalho chegou-se as seguintes conclusões:

Na fase de obstrução os gotejadores teve seu desempenho hidráulico alterados de maneira diferente, operando com água residuária e operando com água com cálcio durante as 1200 horas de operação, sendo todos obstruídos parcialmente pelos dois tipos de água, exceto o gotejador Tiram funcionando com água com elevado teor de cálcio.

A água com elevado teor de cálcio obstruiu mais rapidamente os gotejadores do que a água residuária.

Entre os tratamentos de desobstrução de gotejadores funcionando com água residuária, os melhores resultados encontrados, foi com o processo de lavagem ultrassônica, o qual aumentou os valores de vazão para os gotejadores Taldrip, Streamline e Tiram.

O tempo de tratamento de desobstrução com acidificação, cloração e lavagem ultrassônica influencia no aumento de vazão dos gotejadores

Os tratamentos de lavagem ultrassônica e a combinação do tratamento de ácido+lavagem ultrassônica apresentaram os melhores resultados na desobstrução dos gotejadores obstruídos com água residuária.

Em relação ao aumento de vazão após os tratamentos dos gotejadores obstruídos com precipitados de cálcio, os melhores resultados foram encontrados nos tratamentos com ácido, ácido+lavagem ultrassônica e lavagem ultrassônica.

O processo de lavagem ultrassônica é potencialmente um tratamento eficiente para desobstrução de gotejadores obstruídos com água residuária e água com cálcio, mostrando resultados similares e até mesmo melhores que os tratamentos convencionais com aplicação de ácido e cloro.

8. RECOMENDAÇÕES

Deve ser estudada uma maneira prática para aplicar o processo de lavagem ultrassônica na limpeza dos gotejadores, uma vez que os gotejadores devem ser retirados do campo para passar pelo tanque de água do ultrassom.

Recomensa-se o estudo de diferentes combinações do tempo de aplicação e da associação da aplicação do ácido com lavagem ultrassônica e da aplicação de cloro com lavagem ultrassônica também, uma vez que a combinação desses tratamentos pode ser uma alternativa com potencial para desobstrução de gotejadores.

Deve-se tomar cuidado com a limpeza das linhas laterais após os tratamentos de desobstrução, pois o material desprendido das paredes pode obstruir gotejadores já desobstruídos, foi observado que alguns gotejadores diminuíram a vazão após os tratamentos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Requisitos mínimos para elaboração de projeto de sistema de irrigação localizada. São Paulo, p. 9, 2006.
- ACWUA – Arab Countries Water Utility Association. Wastewater Reuse in Arab Countries. ACWUA Report, *ACWUA Working Group on Wastewater Reuse*, mar. 2010. Disponível em <http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/356/mod_page/content/118/Jordan_Summary-Report-CountryCasestudies_final.pdf>, acesso em 29 de mar. de 2013.
- AHMED, B. A. O.; YAMAMOTO, T.; FUJIYAMA, H.; MIYAMOTO, K. Assessment of emitter discharge in microirrigation system as affected by polluted water. *Irrigation Drainage System*, v. 21, p. 97-107, 2007.
- ALBUQUERQUE, A. C.; ANDRADE, C.; NEVES, B. **Biocorrosão – da integridade do biofilme à integridade do material**. *Corrosão e Proteção de Materiais*, v. 33, p. 18 - 23, 2014.
- ALMEIDA, O. A. Qualidade de água para irrigação. Cruz das almas, EMBRAPA mandioca e fruticultura, 2010.
- ALVAREZ, V. M., LEYVA, J. C., VALERO, J. F., GÓRRIZ, B. M. Economic assessment of shadecloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management*, Murcia, n96, p.1351-1359, 2009.
- AMERASINGHE, P.; BHARDWAJ, R.M.; SCOTT, C.; JELLA, K.; MARSHALL, F. Urban wastewater and agricultural reuse challenges in India. Colombo, Sri Lanka: *International Water Management Institute (IWMI) Research Report 147*. P.36. 2013. Disponível em < www.iwmi.org/Publications/IWMI_Research_Reports/index.aspx>, acesso em 29 de mar. de 2013.
- ARAGUÉS, R., ALBERTO, F., CUCHÍ, J.A., MACHÍN, J. Calidad de água para Riego. I. Criterios generales. Zaragoza: ITEA, (ITEA 37) P. 3-17. 1979.
- ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Design and installation of micro irrigation systems. St. Joseph, 6 p. 2008.
- ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Field evaluation of micro irrigation systems. St. Joseph, p. 792-7. 1996.
- ASAE Standards, 1993. Design and installation of microirrigation systems. Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1994. *Water quality for agriculture*, FAO Irrigation and Drainage Paper: 29, Rev.1, Rome.
- AYERS, R. S., WESTCOT, D. W. **A qualidade de água na agricultura**. Tradução de H. R. Gheyi; J. F. de Medeiros; F. V. A. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1991. 208p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).
- AYERS, R. S., WESTCOT, D. W. A. **Calidad del água para la agricultura**. Roma: FAO, 1976, 174p. (Estudios FAO: Riegos y Drenajes, 29).
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).

- BATISTA R. O.; SOUZA J. A. R.; FERREIRA D. C.; Influência da aplicação de esgoto doméstico tratado no desempenho de um sistema de irrigação. *Rev. Ceres*, Viçosa, v.57, n.1, p. 018-022, jan/fev, 2010.
- BATISTA, R. O.; COSTA, F. G. B.; LOPES, H. S. S.; COELHO, D. C. L.; PAIVA, M. R. F. C. Efeito das características do esgoto doméstico na uniformidade de aplicação de sistemas de irrigação por gotejamento. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 24, p. 137-144, 2011.
- BATISTA, R. O.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T.; MANTOVANI, E. C. Efeito do efluente de lagoa de maturação em gotejadores com e sem tratamento químico, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.62-65, 2005.
- BATISTA, R. O.; SOARES, A. A.; SOUZA, J. A. R. Modelos empíricos da irrigação localizada com esgoto sanitário tratado. *Engenharia na Agricultura*. V.16, P. 369-377, 2008.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.
- BRAUER, R. L.; CRUZ, R. L.; VILLAS BÔAS, R. L.; PLETSCHE, T. A. Avaliação da uniformidade de aplicação de água em gotejadores em função do teor de ferro. *Irriga*, Botucatu, v. 16, n. 1, p. 21-20, 2011.
- BRESSAN, D. F., PEREIRA, F. F. S., ORNELLAS, M., ALVES, M. C. G., LOZANO, M. R. L. O reúso de água na agricultura: teorias e práticas. In: OLIVEIRA, E. L. *Manual de utilização de águas residuárias em irrigação*. Editora Fepaf, Botucatu, SP, ed. 1, 120p, 2012.
- BURGUETE J.; ZAPATA N.; GARCÍA-NAVARRO P.; MAIKAKA M.; Playan M.; MURILLO J. Fertigation in furrows and level furrow systems. I: model description and numerical tests. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 135, p. 401-412, 2009.
- BUSATO, C. C. M.; SOARES, N. A. Desempenho de gotejadores, utilizando água de baixa qualidade química e biológica. *Biosci. J.*, v. 26, p. 739-746, 2010.
- CAMARGO, A. P.; MOLLE, B.; TOMAS, S.; FRIZZONE, J. A. Assessment of clogging effects on lateral hydraulics: proposing a monitoring and detection protocol. *Irrigation Science*, v. 32, p. 181 - 191, 2014.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.70, p. 355-365, 1998.
- CARARO, D. C.; BOTREL, T. A. Uso de cloração e ar comprimido no controle do entupimento de gotejadores ocasionado pela aplicação de água residuária. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, p. 336-345, 2007.
- CARR, G., POTTER, R. B., NORTCLIFF, S. Water reuse for irrigation in Jordan: Perceptions of water quality among farmers. *Agricultural Water Management*, V. 98, I. 5, p.847-854, mar. 2011.

- CAVALCANTE, L. F. **Sais e seus problemas nos solos irrigados**. Areia: UFPB, 2000. 71 p.
- CHRISTOFIDIS, D. Os efeitos multiplicadores da agricultura irrigada. *Item*, Brasília v: 82, 2009.
- CIRELLI, A. F.; ARUMÍ J. L.; RIVERA D.; BOOCHS P. W.; Environmental effects of irrigation in arid and semi-arid. *Regions Chilean J. Agric. Res.*, vol. 69 (Suppl. 1) Dec. 2009.
- COTELL, C.M.; SPRAGUE, J.A.; SMIDT, F.A.; **ASM Handbook**, Volume 5 / Surface Engineering: The Materials Information Society.
- CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, N. F.; L. MOURA, M. F.; TEIXEIRA, M. B.; FILHO, R. R. G. Variabilidade temporal da uniformidade de distribuição em sistema de gotejamento. *Revista Brasileira de Agricultura irrigada*, v. 7, p. 248 – 257, 2013.
- 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-MG, v. 27, n. 150, p 155-162, 1980.
- DONEEN, L. D. Water quality for irrigated agriculture. In: POLJAKOFF-MAYBER, A.; GALE, J. (Ed.). *Plant in saline environments*. New York: Springer Valley, 1975. P. 56-76. (Ecological Studies, 15).
- ENGE SOLUTIONS ULTRASONIC. Tecnologia de Limpeza por Ultrassom. Disponível em < <http://www.engesolutions.com.br/files/Folder%20Ultrassom%20Industrial.pdf>> acesso em maio de 2015.
- EROGLU, S., SAHIN, U., YUNC, T., SAHIN, F. Bacterial application increased the flow rate of CaCO₃-clogged emitters of drip irrigation system. *Journal of Environmental Management* 98, p. 37 – 42. 2012.
- FAVETTA, G. M.; BOTREL, T. A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. *Scientia Agrícola*, v.58, p.427-430, 2001.
- FERERES, E.; ORGANS, F.; GONZALEZ-DUGO, V. Reflections on food security under scarcity. *Journal of Experimental Botany*. Oxford, v. 62, n 12, p. 4079-4086, 2011
- FERREIRA, K. C. D., LOPES, F. B., ANDRADE, E. M., MEIRELES, A. C. M., SILVA, G. S. Adaptação do índice de qualidade de água da National Sanitation Foundation ao semiárido brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, v. 46, n. 2, p. 277-286, abr-jun, 2015.
- FIGUEIREDO, V. B. MEDEIROS, J. F. ZOCOLER, J. L. SOBRINHO, J. S. Evapotranspiração da cultura da melancia irrigada com água de diferentes salinidades. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 29, n. 02, p.231-240, abr. 2009.
- GAMRI, S.; SORIC, A.; TOMAS, S.; MOLLE ,B.; ROCHE, N. Biofilm development in micro-irrigation emitters for wastewater reuse. *Irrigation Science*, v. 32, p. 77 - 85, 2014.

- GHUNMI, L. A., ZEEMAN, G., FAYYAD, M., LIER, V.J.B. Grey water treatment in a series anaerobic - aerobic system for irrigation. *Bioresourse Technology*, Amann, n.101, p.41-50, 20 ago. 2009.
- HAMAN DAROTA Z. Causes and Prevention of Emitter Plugging In Microirrigation Systems. Séries: BUL258, Agricultural and Biological Engineering Department, UF/IFAS Extension. October 2014.
- HILLS, J. D., NAWAR, F. M., WALLWE, P. M. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity. *Transactions of the ASAE*, St, Joseph, v. 32, n. 4 p 1202-1206, 1989.
- KALAVROUZOTIS I. K.; ARAMBATZIS C. ; KALFOUNTZOS D. ; VARNAVAS S. P. ; Wastewater Reuse Planning in Agriculture: The Case of Aitolokarnania, Western Greece. *Water*, v. 3, p. 988-1004, Oct. 2011.
- KARACA, O. F. and UÇAN, K. Elimination of lime causing clogging in emitters by chemical methods in drip irrigation. *African Journal of Agricultural Research*. Vol. 8(13) pp. 1136-1143, 11 April, 2013.
- KARSTEN SCHACHT, K., MARSCHNER, B. Treated wastewater irrigation effects on soil hydraulic conductivity and aggregate stability of loamy soils in Israel. *J. Hydrol. Hydromech.* V.63, n.1, p.47-54, 2015.
- KIDDER, G. and E. A. HANLON, Jr. 2012. Neutralizing Excess Bicarbonates from Irrigation Water. SL-142. Gainesville: University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences. <http://edis.ifas.ufl.edu/ss165> .
- LI, Y. K.; LIU, Y. Z.; LI, G. B.; XU, T. W.; LIU, H. S.; REN, S. M.; YAN, D. Z.; YANG, P. L. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters. *Irrigation Science*, v 30 p. 43-56, 2012.
- LIU, G & McAVOY, G. How to Reduce Clogging Problems in Fertigation. Horticultural Sciences Department, UF/IFAS Extension, University of Florida, doc, HS1202, 2012. <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/HS/HS120200.pdf>.
- LIU, GUODONG AND MCAVOY, GENE. **How to Reduce Clogging Problems in Fertigation**. HS1202, series of the Horticultural Sciences Department, UF/IFAS Extension . JANUARY, 2015.
- LIU, H.; HUANG, G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 96, n. 5, p.745-756, 2009.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARTTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: UFV, 2006. 328 p.
- MARTINS, C. C.; SOARES, A. A.; RAMOS, M. M.; REIS, E. F. Aplicação de cloro orgânico no tratamento de tubo gotejador utilizado na irrigação com água ferruginosa utilizado na irrigação com água ferruginosa. *Maringá*, v. 32, p. 01 - 05, 2010.
- MEDEIROS, J. F. **Qualidade de água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo GAT nos Estados do RN, PB e CE**. 1992. 173p.

- Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1992.
- MEDEIROS, S.S.; GHEYI, H. R.; SOARES, F. A. L.. Cultivo de flores com o uso de água residuária e suplementação mineral. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 30, n. 6, Dec. 2010
- MENEZES, M. AND BICUDO, C. E. M. coords. Lista de espécies: algas. In: Forzza, rc., org., et al. instituto de pesquisas jardim botânico do Rio de Janeiro. Catálogo de plantas e fungos do Brasil [online]. Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro, v.1, 2010. p. 262-451.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. CONAMA: Resolução número 357, de 17 de março de 2005
- MOJIRI A.; AMIROSSADAT Z. Effects of urban wastewater on accumulation of heavy metals in soil and corn (*Zea Mays L.*) with sprinkler irrigation method. *Asian Journal of Plant Sciences*. v. 10, n 3, p. 233-237, 2011.
- MÖLLER, M.; WEATHERHEAD, E. K. Evaluating drip irrigation in commercial tea production in Tanzania. *Irrigation and Drainage Systems*, Netherlands, v. 21 p. 17-34, 2007.
- MUYEN Z.; MOORE G. A.; WRIGLEY R. J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agricultural Water Management*. v 99, n 1, p 33-41, Aug. 2011
- NAKAYAMA, F. S., BUCKS, D. A. **Trickle irrigation for crop production: Design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier Science, 1986. 383p.
- NAKAYAMA, F. S.; BOMAN, B. J.; PITTS, D. MAINTENANCE. IN: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production: Design, Operation, and Management**. Amsterdam: Elsevier, 2006, cap. 11, p. 389-430
- NAKAYAMA, F.S. Water analysis and treatment techniques for control emitter plugging. In: Proceedings Irrigation Association Conference, Portland, Oregon, 1982.
- NIU, W., LIU, L., CHEN, X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. *Irrig Sci* v.31, p.545–555, 2013.
- PATIL, S. S.; NIMBALKAR, P. T.; JOSHIA, J.; Hydraulic Study, Design & Analysis of Different Geometries of Drip Irrigation Emitter Labyrinth. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, v.2, p.455 - 462, 2013.
- PEREIRA A.H.A. Limpeza ultrassônica: overview e estado da arte. Relatório Técnico RT-ATCP-02, ATCP Engenharia Física, São Carlos, SP – Brasil, 2010
- PEREIRA B.F.F.; HE Z.L.; STOFFELLA P.J.; MELFI A.J. reclaimed wastewater: effects on citrus nutrition. *Agricultural Water Management*. v 98, n 12, p.1828-1833, Jul. 2011,
- PIZZARO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF). Goteo, microaspersión y exudación**. 3 ed. Ver. Y amp. Madrid: Mundi-Prensa. 1996. 513p.

- PUSKAR, A.; The use of High-intensity Ultrasonics: Elsevier Scientific Publishing Company – 1982. Citado por: Pereira A.H.A. Limpeza ultrassônica: overview e estado da arte. Relatório Técnico RT-ATCP-02, ATCP Engenharia Física, São Carlos, SP – Brasil, 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*, Edição Especial, p. 368 - 379, 2012.
- RIBEIRO, T. A. P; AIROLDI, R. P. S; PATERNIANI, J. E. S; SILVA, M. J. M. Variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, n3, p.295-301, 2005.
- ŞAHIN, Ü.; ANAPALI, Ö.; DÖNMEZ, M. F.; ŞAHIN, F. Biological treatment of clogged emitters in a drip irrigation system. *Journal of Environmental Management*, v.76, p.338-341, 2005.
- SCHACHT, K., MARSCHNER, B. Treated wastewater irrigation effects on soil hydraulic conductivity and aggregate stability of loamy soils in Israel. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(1), 47-54, 2015.
- SILVA, I. N., FONTES, L. O., TAVELLA, L. B., OLIVEIRA, J. B., OLIVEIRA, A. C. Qualidade de água na irrigação. *Revista: Agropecuária científica no semi-árido- ACSA*. v.07, n 03, p. 01 – 15. 2011.
- SOUZA J. A. R.; MOREIRA D. A.; Efeitos da aplicação de esgoto sanitário submetidos a diferentes níveis de tratamento em sistemas de irrigação localizada. *Engenharia Ambiental -Espírito Santo do Pinhal*, v. 9 ,n. 2, p. 145-158, abr/jun. 2012.
- SZEKUT, F. D., SANTOS, D. B. dos, AZEVEDO, C. A. V. de, KLEIN, M. R. K., RIBEIRO, M. D. and MEDEIROS, S. M. de S. Emitter clogging in drip irrigation using treated domestic wastewater. *Journal of Food, Agriculture & Environment* Vol.13 (3&4):60-66. 2015.
- SZEKUT, F. D. **Obstrução de gotejadores com uso de esgoto doméstico tratado e água de abastecimento**. 2015. 110f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – CTRN – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2015.
- TARCHITZKY, J.; RIMON, A.; KENIG, E.; DOSORETZ, C. G.; CHEN, Y. Biological and chemical fouling in drip irrigation systems utilizing treated wastewater. *Irrigation Science*, v.31, p. 1277 - 1288, 2013.
- TEIXEIRA, M. B.; MELO, F. R.; COELHO, R. D.; NETO, R. O.; AGUIAR RIBEIRO P. A. Tratamento para desentupimento de gotejadores convencionais. *Irriga*, Botucatu, v. 13, p. 235-248, 2008.
- TELTSCH, B.; JUANICO, M.; AZOV, Y.; HARMI, I. B.; SHELEF, G. The clogging capacity of reclaimed wastewater: a new quality criterion for drip irrigation. *Water Science Technology*, Amsterdam, v. 24, n.9, 1991.

UNIQUE. Tecnologia Ultrasonica. Disponível em <
<http://www.unique.ind.br/ultrasom.html>> acesso em maio de 2015.

VALE, H. S. M., ARRUDA, L. E. V., COSTA, D. O., COSTA, F. G. B., BATISTA, R. O. Potencial de entupimento de um sistema de irrigação por gotejamento operando com esgoto doméstico tratado. *Water Resources and Irrigation Management*, v.2, n.1, p.63-70, 2013.

VEDACHALAM S. and MANCL M. K. Water resources and wastewater reuse: perception of students at Ohio State University campus. *Ohio Journal of Science.Columbus*, v. 110, n 5, p. 104-113, May. 2012.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, J.G.F.; RAMOS, M.M.; SILVA, C.M. Recuperação de gotejadores obstruídos devido à utilização de águas ferruginosas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, p.1-6, 2004.

VON SPERLING, M. **Introdução á qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Editora UFMG, Belo Horizonte, MG, ed. 3, 452p, 2005

ZHAO, H.; XU, D.; GAO, B. Uncertainty assessment of measurement in variation coefficient of drip irrigation emitters flow rate. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, v. 63, p. 805 - 812, 2014.

ZHOU, B., LI, Y., PEI, Y., LIU, Y., ZHANG, Z., JIANG, Y. Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation. *Irrigation Science*, 31: p.1251–1263, 2013.