

DESEMPENHO DE GOTEJADORES OPERANDO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DE LATICÍNIOS EM ESCALA LABORATORIAL

**BLAKE CHARLES DINIZ MARQUES¹; VANESSA TAINARA DA CUNHA¹;
VALÉRIA TATIANY DA CUNHA¹; KETSON BRUNO DA SILVA¹; RAFAEL
OLIVEIRA BATISTA¹**

¹ Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Ufersa câmpus Mossoró-RN, Avenida Francisco Mota, nº 572, Bairro Costa e Silva, CEP: 59.625-900 - Mossoró, RN, Brasil. E-mail: charles@ufersa.edu.br, tainara.vanessa@yahoo.com.br, valeriatatiany@yahoo.com.br, ketsonbruno@hotmail.com, rafaelbatista@ufersa.edu.br

1 RESUMO

A degradação ambiental e a escassez hídrica no semiárido são fatores que contribuem para utilização de águas residuárias na agricultura. A irrigação localizada torna-se o método mais adequado para este fim, devido ao uso eficiente da água. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo monitorar a vazão e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) em unidades de irrigação, dotadas de cinco tipos de gotejadores ($G1 = 1,6 \text{ L h}^{-1}$, $G2 = 2,0 \text{ L h}^{-1}$, $G3 = 2,0 \text{ L h}^{-1}$, $G4 = 1,70 \text{ L h}^{-1}$ e $G5 = 2,0 \text{ L h}^{-1}$) aplicando água residuária de laticínios; e avaliar as características físico-químicas e microbiológica do efluente, quanto ao risco de obstrução. O monitoramento da qualidade da água residuária de laticínios foi realizado a cada 40 h, simultaneamente com a determinação da vazão dos gotejadores e do CUD, totalizando seis amostragens, até o encerramento dos ensaios experimentais, no tempo de operação de 200 h. O gotejador G2 foi o mais suscetível ao entupimento com efluente de laticínios tratado, enquanto o gotejador G5 foi o mais resistente ao entupimento. As características sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, ferro, manganês, cálcio e a presença de microrganismos, interferiram, diretamente nos valores da vazão dos gotejadores e do CUD das unidades de irrigação que operaram com efluente de laticínios tratado.

Palavras-chave: emissores, efluente, obstrução.

**MARQUES, B. C. D.; CUNHA, V. T.; CUNHA, V. T.; SILVA, K. B.; BATISTA, R. O.
DRIPPERS PERFORMANCE OPERATING WITH DAIRY WASTEWATER IN
LABORATORY SCALE**

2 ABSTRACT

Environmental degradation and water scarcity in the semiarid region are factors that contribute to the use of wastewater in agriculture. This study aimed to monitor the flow rate and the distribution uniformity coefficient (CUD) of irrigation units in five types of drippers ($G1 = 1.6 \text{ L h}^{-1}$, $G2 = 2.0 \text{ L h}^{-1}$, $G3 = 2.0 \text{ L h}^{-1}$, $G4 = 1.70 \text{ L h}^{-1}$ and $G5 = 2.0 \text{ L h}^{-1}$) applying wastewater dairy, as well as the physicochemical and microbiological characteristics of the effluent, that represented risk of obstruction. Monitoring of the dairy wastewater quality was performed every 40 h, simultaneously with the determination of the emitter flow rate and CUD, totaling

six samples until the end of the experimental trials, in 200 h of operating time. The dripper G2 was the most susceptible to clogging with treated dairy wastewater, while the drip G5 was the most resistant to clogging. Solid suspended, dissolved solids, iron, manganese, calcium and presence of microorganisms interfered directly on flow rate and CUD of irrigation units that operated with treated dairy effluent.

Keywords: emitters, effluent, clogging.

3 INTRODUÇÃO

A indústria de laticínios representa uma atividade de grande importância na economia brasileira e mundial. O Brasil é o quinto maior produtor mundial de leite, com produção, em 2014, de 35 milhões de toneladas de leite (BRASIL, 2014), sendo superado em termos de produção pela União Européia (144 milhões de toneladas), Estados Unidos da América (93 milhões de toneladas), Índia (60 milhões de toneladas) e China (36 milhões de toneladas).

Andrade (2011) afirmou que o Brasil possui condições para se tornar um dos maiores exportadores de produtos lácteos, devido às suas vantagens tais como disponibilidade de água e de solo e custo de produção competitivo. Entretanto, para que isso se torne uma realidade, as indústrias de laticínios brasileiras devem agregar valor aos seus produtos e buscarem processos de produção mais eficientes e sustentáveis, a fim de tornar seus produtos mais competitivos no mercado externo.

Segundo Brião e Tavares (2012), o processo de limpeza da indústria de laticínios gera elevados volumes de águas residuárias, produzindo cerca de 10 L de efluente por litro de leite processado. Os efluentes líquidos gerados nos processos de produção de laticínios possuem elevados teores de matéria orgânica, gorduras, sólidos suspensos e nutrientes, e são considerados a principal fonte de poluição destas indústrias (ANDRADE, 2011).

A utilização de águas residuárias de laticínios na agricultura é uma alternativa para controle da poluição das águas superficiais e subterrâneas, além da disponibilização de água e fertilizantes para as culturas, ciclagem de nutrientes e aumento na produção agrícola (MATOS et al., 2010).

O método de irrigação por gotejamento é mais recomendado para aplicação de águas residuárias, em razão da elevada eficiência de aplicação do efluente e do baixo risco de contaminação tanto do produto agrícola quanto de operadores no campo, devido à inexistência de aerossóis (BATISTA; OLIVEIRA; MESQUITA, 2014). Nos sistemas de irrigação por gotejamento, entretanto, os emissores apresentam alta suscetibilidade ao entupimento (BATISTA et al., 2011). A sensibilidade ao problema de entupimento varia com as características do gotejador (BATISTA et al., 2009) e com a qualidade da água relacionada aos aspectos físicos, químicos e biológicos (NAKAYAMA; BOMAN; PITTS, 2006).

A formação de biofilme resultante da interação entre mucilagens bacterianas e partículas orgânicas e inorgânicas consiste na principal causa de entupimento de gotejadores que operam com águas residuárias (BATISTA et al., 2008; SILVA et al., 2012; BATISTA; OLIVEIRA; MESQUITA, 2014).

Muitas espécies de bactérias podem causar impactos negativos, como alteração na coloração da água, produção de odores e formação de precipitados e mucilagens. Nas águas residuárias, as bactérias se reproduzem rapidamente com a liberação de estruturas capsulares, excreções extracelulares e nutrientes secundários que podem ser utilizados por outros organismos (NAKAYAMA; BOMAN; PITTS, 2006).

O entupimento de gotejadores prejudica o funcionamento geral do sistema de irrigação, afetando as suas características de operação e exigindo manutenções mais frequentes (BATISTA et al., 2013). Geralmente, a obstrução reduz a vazão do sistema de irrigação por gotejamento, principalmente no segmento final das linhas laterais (RAVINA et al., 1992; RAVINA et al., 1997; BATISTA et al., 2011).

Outro impacto negativo do entupimento de gotejadores consiste na aplicação desuniforme das águas residuárias pelos sistemas de irrigação (BATISTA; OLIVEIRA; MESQUITA, 2014; OLIVER; HEWA; PEZZANITI, 2014; MESQUITA et al., 2015). No entanto, segundo Mesquita et al. (2015), o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) é mais sensível à detecção da obstrução dos gotejadores em relação ao coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).

As informações sobre o desempenho hidráulico de gotejadores que operam com efluentes de laticínios são incipientes tanto no Brasil como no mundo, o que estimula o desenvolvimento de pesquisas nesta área. Neste sentido, o presente trabalho teve por objetivo monitorar a vazão de gotejadores e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) de cinco unidades de irrigação aplicando água residuária tratada de laticínios, bem como analisar as características físico-químicas e microbiológica do efluente que interferem no processo de obstrução.

4 MATERIAL E MÉTODOS

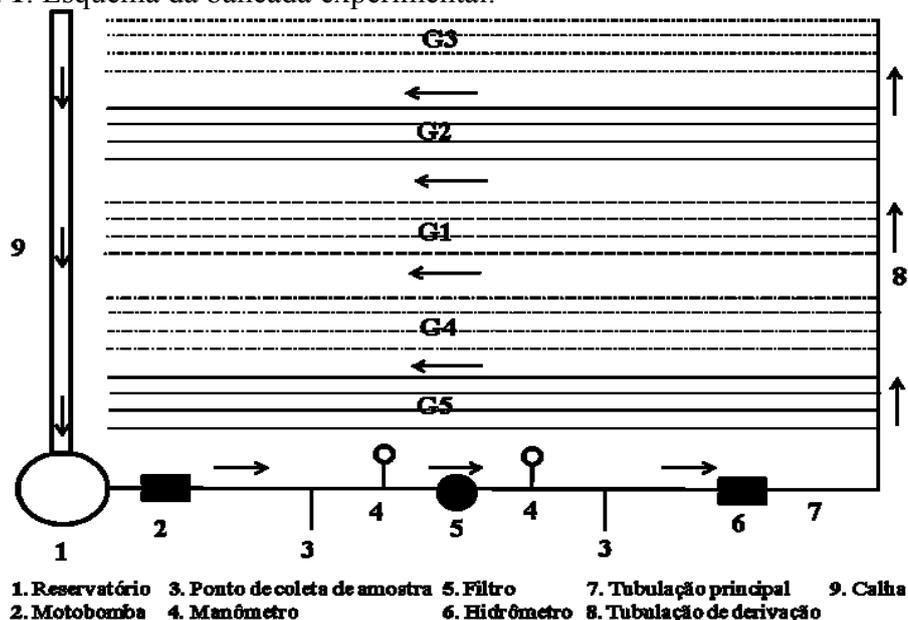
O trabalho foi realizado no Laboratório de Poluição e Degradação do Solo, localizado no Setor de Solos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), cujas coordenadas geográficas de referências são 5° 12' 12,31" S; 37° 19' 27,72" O e 18 m de altitude.

Durante todo o período experimental, a temperatura ambiente no laboratório foi controlada para que a temperatura da água residuária fosse mantida dentro da faixa de $23 \pm 3^\circ\text{C}$, recomendada pela NBR ISO 9261 (ABNT, 2006). Outra justificativa para a adoção dessa faixa de temperatura do fluido é que segundo Pizarro Cabello (1990), as temperaturas compreendidas entre 20 e 30 °C favorecem a formação de muco microbiano, com elevado potencial de obstrução para gotejadores.

Para a realização dos ensaios, uma bancada experimental com 1,4 m de largura por 2,5 m de comprimento foi montada, totalizando uma área útil de 3,5 m², onde foram casualizadas as cinco unidades de irrigação. A recirculação da água residuária na bancada foi obtida por meio de uma declividade de 2,0% no sentido do comprimento da bancada.

Esta bancada, em escala laboratorial, foi composta por um reservatório plástico de 0,062 m³, uma motobomba centrífuga de 0,5 cv, um filtro de tela com aberturas de 130 μm , dois manômetros analógicos, dois pontos para coleta de amostras do efluente, um hidrômetro de 1,5 m³ h⁻¹, uma tubulação principal em PVC de 32 mm, uma tubulação de derivação em PVC de 50 mm e cinco unidades de irrigação por gotejamento, sorteadas ao acaso, como apresentado na Figura 1. Cada unidade de irrigação foi composta por quatro linhas laterais de 16 mm com um tipo específico de gotejador, totalizando 20 linhas laterais na bancada.

Figura 1. Esquema da bancada experimental.



Fonte: Elaboração dos autores.

Por meio das informações fornecidas pelos catálogos dos fabricantes (Tabela 1) é possível conhecer as características dos cinco tipos de gotejadores, utilizados nos ensaios experimentais com água residuária tratada de laticínios.

Tabela 1. Gotejadores (G) utilizados nos ensaios experimentais, destacando o fabricante (F), o dispositivo de autocompensação (DA), a vazão nominal (Q), o coeficiente de vazão (k), expoente da vazão que caracteriza o regime de escoamento (x), a área de filtragem (A), o comprimento do labirinto (L), o coeficiente de variação de fabricação (CV_f), a faixa de pressão recomendada (P) e o espaçamento entre emissores (EE).

G	F	DA*	Q^1* (L h ⁻¹)	k*	x*	A* (mm ²)	L* (mm)	CV_f^* (%)	P* (kPa)	EE* (m)
G1	Netafim Streamline	Não	1,60	0,57	0,45	17,0	13	± 7	65 – 100	0,30
G2	Netafim Tiran	Não	2,00	0,69	0,46	70,0	75	± 7	100 – 300	0,40
G3	Netafim PCJ CNJ	Sim	2,00	2,00	0,00	2,0	35	± 7	50 – 400	0,20
G4	NaanDanJain TalDrip	Não	1,70	0,56	0,46	6,0**	44**	± 5	50 – 300	0,20
G5	Netafim Super Typhoon	Não	1,60	0,53	0,48	34,0	23	± 7	60 – 100	0,30

Nota: ¹ Vazão nominal dos gotejadores na pressão de serviço de 100 kPa; * informações obtidas nos catálogos dos fabricantes. PCJ – este mantém uma vazão uniforme mesmo sob diferentes pressões de entrada, assegurando uma distribuição exata da água e nutrientes, além disto, o emissor possui amplas seções de passagem da água e constante atuação do mecanismo de auto-limpeza, que aumentam a sua resistência ao entupimento. CNJ - sistema anti-drenante; e ** informações medidas com auxílio de um parquímetro digital com precisão de 0,01 mm.

Fonte: Elaboração dos autores.

A água residuária de laticínios utilizada nos ensaios experimentais foi oriunda de um empreendimento localizado em Mossoró-RN. Os principais produtos obtidos neste empreendimento são leite pasteurizado, bebida láctea, doce de leite, requeijão, queijo coalho, queijo minas frescal e manteiga do sertão. No processamento destes produtos e na sanitização do empreendimento geram-se, diariamente, 35 m³ de efluente (LIMA et al., 2013).

A água residuária é transportada em tubulação de PVC, com diâmetro nominal de 150 mm, até o gradeamento, tipo fino, com espaçamento entre barras de 20 mm e área de seção transversal de 0,50 m² (1,0 m de largura por 0,5 m de comprimento); passando por um decanto-flotador para a remoção da gordura; e, em seguida, o efluente é lançado em uma lagoa facultativa aerada com área superficial de 300 m² (10 m de largura por 30 m de comprimento), profundidade de 2,0 m, dois agitadores e tempo de detenção hidráulico de 17 dias; por fim, o efluente é aplicado via sistema de irrigação por sulcos, na fertirrigação do capim elefante (LIMA et al., 2013). Este sistema de tratamento possibilita remoção média de 79, 56 e 56% das características Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio e óleos e graxas.

No presente trabalho utilizou-se a água residuária de laticínios proveniente da lagoa facultativa aerada. Para minimizar a descaracterização da água residuária de laticínios, a mesma foi coletada duas vezes por semana para os ensaios na bancada experimental.

As unidades de irrigação funcionaram oito horas por dia, cinco dias por semana, no período de 6 de novembro a 11 de dezembro de 2014, até completar o tempo de funcionamento total de 200 h; com base no trabalho de Cunha et al. (2006), que alcançaram elevados níveis de obstrução de gotejadores mediante tempo de operação de 144 h.

Ressalta-se que no tempo de operação de 0 h o coeficiente de variação de vazão do fabricante não ultrapassou a faixa limite de 7% recomendada pela NBR ISO 9261 (ABNT, 2006).

Os dados de vazão foram obtidos de 20 gotejadores identificados por unidade de irrigação, seguindo a recomendação de Capra e Scicolone (1998), que recomendaram no mínimo 16 gotejadores para avaliação do desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento com problemas de entupimento.

A vazão de cada gotejador foi determinada com 20 repetições, coletando-se o volume aplicado durante três minutos, conforme recomendado pela NBR ISO 9261 (ABNT, 2006). Com o uso de dois registros de gaveta, a pressão de serviço foi mantida em 100 ± 10 kPa e medida, diariamente, com manômetro graduado de 0 a 700 kPa. O cálculo da vazão (Q) foi obtido empregando-se a Equação 1.

$$Q = \frac{V}{1000 \cdot t} \cdot 60 \quad (1)$$

em que;

Q - vazão do gotejador, L h⁻¹;

V - volume de efluente coletado, mL; e

t - tempo de coleta do efluente, min.

Com os dados de vazão de 20 gotejadores, calculou-se o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) de cada uma das cinco unidades de irrigação, apresentado na Equação 2.

$$\text{CUD} = 100 \cdot \frac{q_{25\%}}{q} \quad (2)$$

em que:

CUD - coeficiente de uniformidade de distribuição, %;

$q_{25\%}$ - valor médio dos 25% menores valores de vazões dos gotejadores, L h⁻¹; e

q - vazão média dos gotejadores, L h⁻¹.

O monitoramento da qualidade da água residuária de laticínios foi realizado a cada 40 h, simultaneamente com a determinação da vazão dos gotejadores e do CUD, totalizando seis amostragens até o encerramento dos ensaios experimentais, no tempo de operação de 200 h. Determinaram-se as características físico-químicas e microbiológicas da água residuária de laticínios, seguindo as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (RICE; BAIRD; CLESCERI, 2012). As amostras de água residuária de laticínios foram coletadas a jusante do sistema de filtragem.

As análises físico-químicas compreenderam a determinação dos valores de pH (peagâmetro), condutividade elétrica (condutivímetro), sólidos suspensos (gravimetria), sólidos dissolvidos (gravimetria), cálcio (titulometria), magnésio (titulometria), ferro (espectrofotometria de absorção atômica) e manganês (espectrofotometria de absorção atômica).

Nas análises microbiológicas utilizou-se o teste comercial, auto-análise Colilert (AC), baseado na tecnologia dos substratos definidos.

Os dados de qualidade da água residuária de laticínios foram analisados com o auxílio de estatística descritiva por meio da determinação da média e do desvio padrão.

Os dados de vazão e do CUD foram avaliados por meio da análise de regressão; onde os modelos de regressão simples foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, aplicando-se o teste “t” a 10% de probabilidade, no coeficiente de determinação (R²) e no processo em estudo. A relação entre os dados de qualidade da água residuária e da vazão dos gotejadores e do CUD das unidades de irrigação foram estudadas por meio de regressões múltiplas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estabelecendo comparação entre os tempos de operação inicial (0 h) e final (200 h), houve redução nos valores de Q e CUD das unidades de irrigação de 8 e 10%, 31 e 29%, 21 e 10%, 14 e 10% e 7 e 15%, respectivamente, para os gotejadores G1, G2, G3, G4 e G5, como observado na Tabela 2 e na Figura 2.

Tabela 2. Valores médios e desvio padrão dos 20 dados de vazão (Q) dos gotejadores G1, G2, G3, G4 e G5 operando com água residuária tratada de laticínios e respectivos valores do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) das cinco unidades de irrigação.

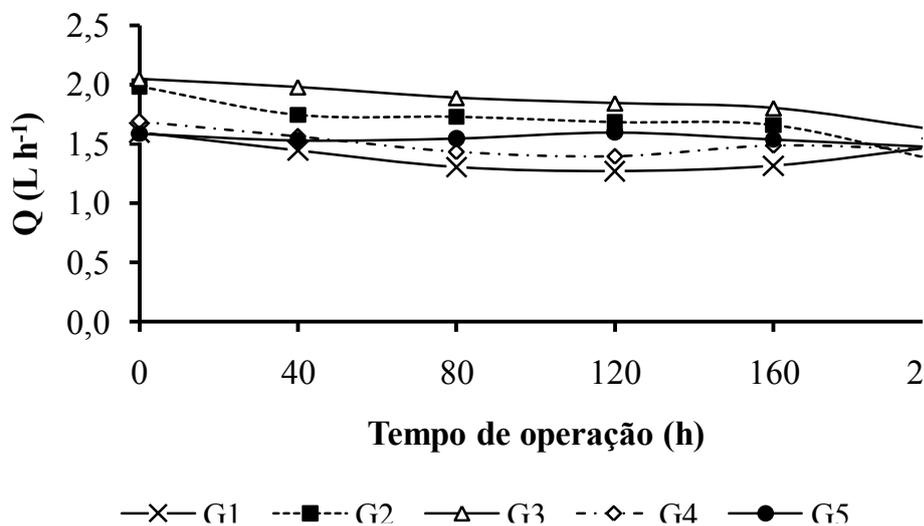
Tempo de operação (h)	Q (L h ⁻¹)				
	G1	G2	G3	G4	G5
0	1,60±0,0 4	1,98±0,0 3	2,05±0,0 5	1,69±0,0 4	1,59±0,0 3
40	1,44±0,0 3	1,74±0,1 6	1,98±0,0 6	1,56±0,0 6	1,53±0,0 3
80	1,30±0,0 8	1,73±0,1 8	1,89±0,1 1	1,43±0,0 3	1,54±0,0 5
120	1,27±0,1 4	1,68±0,2 0	1,84±0,1 0	1,39±0,0 9	1,60±0,0 7
160	1,31±0,1 8	1,66±0,1 9	1,80±0,1 3	1,49±0,1 3	1,54±0,0 5
200	1,47±0,1 8	1,37±0,2 8	1,62±0,1 6	1,45±0,1 4	1,47±0,2 9
Tempo de operação (h)	CUD (%)				
	G1	G2	G3	G4	G5
0	97	98	97	97	98
40	98	87	96	95	97
80	92	84	93	97	96
120	89	83	94	92	95
160	85	82	90	87	97
200	87	70	88	87	83

Fonte: Elaboração dos autores.

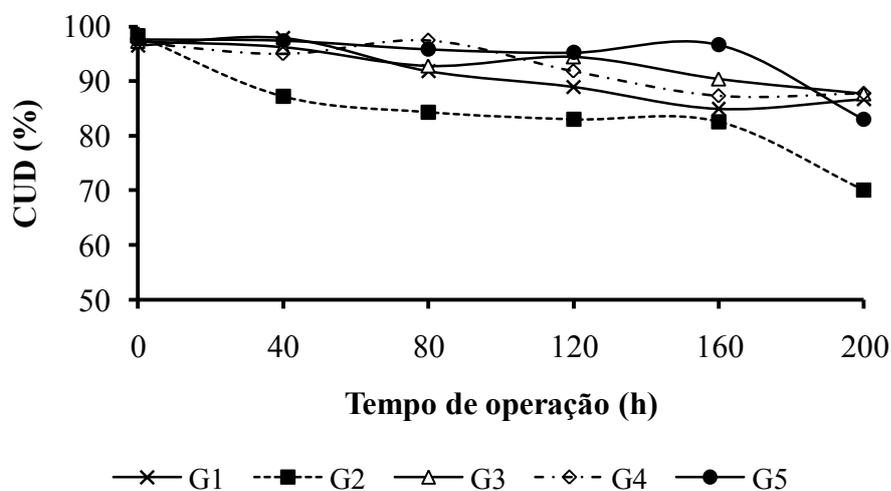
Verificou-se, na Figura 2 e Tabela 2, que no tempo de funcionamento inicial (0 h), os valores médios de CUD nas unidades de irrigação foram de 97, 98, 97, 97 e 98% para os gotejadores G1, G2, G3, G4 e G5, respectivamente. Estes valores foram classificados por Merriam e Keller (1978) como excelentes, por serem superiores ao limite de 90%. Enquanto no tempo de operação final (200 h), os valores de CUD foram de 88, 88, 87 e 83% para os gotejadores G1, G3, G4 e G5, classificados como bons ($80 < \text{CUD} < 90\%$) por Merriam e Keller (1978) e o valor médio do CUD para o gotejador G2 foi de 70%, classificado como razoável ($70 < \text{CUD} < 80\%$).

Figura 2. Valores de Q (A) e do CUD (B) das unidades de irrigação dotadas dos gotejadores G1, G2, G3, G4 e G5 operando com água residuária tratada de laticínios, ao longo do tempo de operação.

A.



B.



Fonte: Elaboração dos autores.

Na Tabela 3 estão apresentadas as equações de regressão ajustadas às variáveis Q e CUD, em função dos tempos de operação, para as unidades de irrigação dotadas dos gotejadores G1, G2, G3, G4 e G5.

Tabela 3. Equações de regressão de Q e do CUD em função do tempo de avaliação (T) e respectivos coeficientes de determinação (R²).

Gotejador	Equação	R ²
Vazão média dos gotejadores (Q em L h⁻¹)		
G1	$\hat{Q} = 1,619 - 0,0632 * T^{0,5} + 0,00337^0 T$	0,76
G2	$\hat{Q} = 1,932 - 0,00239 ** T$	0,83
G3	$\hat{Q} = 2,059 - 0,00196 ** T$	0,95
G4	$\hat{Q} = 1,687 - 0,00409 ** T + 0,0000153 * T^2$	0,88
G5	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,545$	-
Gotejador	Equação	R ²
Coefficiente de uniformidade de distribuição (CUD em %)		
G1	$\hat{CUD} = 97,662 - 0,0651 ** T$	0,85
G2	$\hat{CUD} = 95,439 - 0,112 ** T$	0,85
G3	$\hat{CUD} = 97,734 - 0,0459 ** T$	0,88
G4	$\hat{CUD} = 98,149 - 0,0541 ** T$	0,80
G5	$\hat{CUD} = \bar{CUD} = 94,313$	-

Nota: **, * e ⁰ Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste “t”; Q - Vazão dos gotejadores, L h⁻¹; e T - Tempo de avaliação, h.

Fonte: Elaboração dos autores.

O modelo raiz quadrada foi o que melhor representou a relação entre os dados da vazão média em função dos tempos de avaliação para a unidade de irrigação dotada do gotejador G1, sendo o valor do coeficiente de determinação de 0,76. Enquanto, para as unidades de irrigação com os gotejadores G2 e G3, o modelo linear foi o que melhor se ajustou aos dados de vazão em função dos tempos de avaliação, tendo coeficientes de determinação de 0,83 e 0,95, respectivamente. Já com relação à unidade de irrigação dotada do gotejador G4, o modelo quadrático foi o que melhor representou a relação entre os dados de vazão média e os tempos de avaliação, tendo coeficiente de determinação de 0,88. Para a unidade de irrigação dotada do gotejador G5, os valores da vazão média não foram alterados, significativamente, pelo tempo de avaliação.

Observando a relação entre os dados de CUD e T das unidades de irrigação, o modelo de regressão que melhor se ajustou foi o linear, para os gotejadores G1, G2, G3 e G4, apresentando valores de R² de 0,85, 0,85, 0,88 e 0,80, respectivamente. Enquanto para a unidade de irrigação dotada do gotejador G5, o modelo nulo (média) foi o que melhor se ajustou a relação entre os dados de CUD e T.

Na Tabela 4 estão apresentadas as equações de regressão linear múltipla, ajustadas à variável vazão média em função das características físico-químicas (SS, pH, SD, Fe, Mn e Ca) da água residuária tratada de laticínios, para os gotejadores G1, G2, G3, G4 e G5 das unidades de irrigação.

Tabela 4. Equação de regressão múltipla de vazão dos gotejadores (Q) e do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) em função das características físico-químicas da água residuária tratada de laticínios.

Gotejador	Equação	R ²
Vazão média dos gotejadores (Q em L h⁻¹)		
G1	$\hat{Q} = 1,099 - 0,0294^{**}Fe + 8,342^{**}Mn + 0,0145^{**}Ca - 0,078^{**}Mg$	0,99
G2	$\hat{Q} = 2,269 - 3,275^0 Mn - 0,104^0 pH + 0,000415^{**}SS$	0,97
G3	$\hat{Q} = 1,948 - 0,123^{**}Fe - 0,0412^* pH + 0,000432^{**}SS$	0,99
G4	$\hat{Q} = 2,015 + 0,05550Fe + 2,709^0 Mn - 0,0994^* pH + 0,0150^0 Ca$	0,99
G5	$\hat{Q} = 1,697 + 0,0875^{**}Fe - 0,464^0 Mn - 0,0150^{**}Ca - 0,000134^{**}SD$	0,99
Gotejador	Equação	R ²
Coefficiente de uniformidade de distribuição (CUD em %)		
G1	$C\hat{U}D = 78,974 + 7,962^* Fe - 164,943^0 Mn + 2,551^{**}Ca$	0,97
G2	$C\hat{U}D = 66,654 + 0,0182^{**}SS$	0,90
G3	$C\hat{U}D = 90,442 + 0,00759^{**}SS - 0,00298^{**}SD$	0,99
G4	$C\hat{U}D = 89,739 + 10,387^* Fe - 368,535^* Mn + 1,762^* Ca$	0,90
G5	$C\hat{U}D = 145,570 - 168,990^0 Mn - 6,838^{**}CT$	0,84

Nota: **, * e ⁰ Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste “t”. SS - sólidos suspensos, mg L⁻¹; SD – sólidos dissolvidos, mg L⁻¹; Fe – Ferro total, mg L⁻¹; Mn - Manganês total, mg L⁻¹; pH – potencial hidrogeniônico; Ca - Cálcio, mmol_e L⁻¹; Mg – magnésio, mmol_e L⁻¹; e CT – coliformes totais, log₁₀(NMP 100 mL⁻¹).

Fonte: Elaboração dos autores.

Na unidade de irrigação dotada do gotejador G1, houve relação linear entre as características Fe, Mn, Ca e Mg e os dados de Q, apresentando coeficiente de determinação (R²) de 0,99. Com relação à unidade de irrigação dotada do gotejador G2, foi evidenciada relação linear entre as características Mn, pH e SS e os valores de Q, apresentando R² de 0,97. Para a unidade de irrigação dotada do gotejador G3, ocorreu efeito linear das características Fe, pH e SS na alteração dos valores de Q, possuindo R² de 0,99. Já na unidade de irrigação dotada do gotejador G4, notou-se relação linear entre as características Fe, Mn, pH e Ca e os dados de Q, tendo R² de 0,99. Na unidade de irrigação dotada do gotejador G5, houve relação linear entre as características Fe, Mn, Ca e SD e os dados de Q, tendo R² de 0,99.

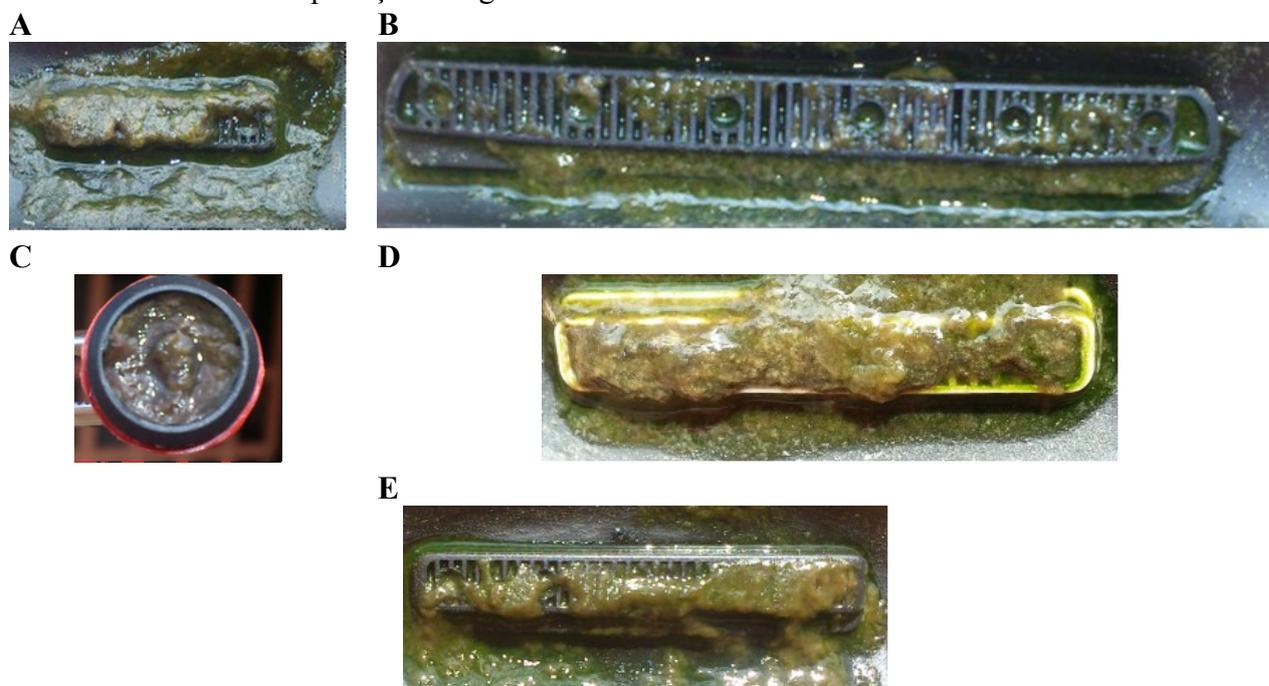
Nos gotejadores G1 e G4, observou-se que houve efeito linear das características Fe, Mn e Ca sobre os dados de CUD nas unidades de irrigação, apresentando valores de R² iguais a 0,97 e 0,90, respectivamente. Enquanto, no gotejador G2 houve efeito linear apenas da característica SS sobre os dados de CUD, tendo R² de 0,90; e para o gotejador G3 ocorreu efeito linear das características SS e SD sobre os dados de CUD, tendo R² de 0,99. Já no gotejador G5 houve relação linear das características Mn e CT e os dados de CUD, apresentando R² de 0,84.

Decorrida as 200 h de operação das unidades de irrigação, realizou-se a abertura de gotejadores para avaliação visual do biofilme ocasionador de obstrução, como apresentado na Figura 3. Segundo Oliver, Hewa e Pezzaniti (2014), o biofilme é um composto de secreções microbianas e partículas em suspensão presente em águas residuárias. No trabalho desenvolvido por Dazhuang et al. (2009), a análise por microscopia eletrônica de varredura revelou, na matriz do biofilme de gotejadores que operaram com água residuária, partículas aderidas em polissacarídeos extracelulares, além ainda da presença de sedimentos formados no labirinto dos emissores; o tipo de emissor exerce influencia na estrutura e diversidade da comunidade biológica presente no biofilme.

Evidenciou-se que houve a formação de biofilme, de coloração castanho claro com tonalidade esverdeada, nas áreas de filtração dos gotejadores G1, G2, G4 e G5 (Figuras 3A 3B, 3D e 3E) e sobre a membrana de autocompensação do gotejador G3 (Figura 3C). Este fato acarretou, ao longo do período experimental, redução na vazão dos gotejadores, devido ao entupimento parcial e total das seções internas de escoamento dos emissores.

Estes resultados indicaram que o gotejador G2 foi o mais sensível à obstrução com água residuária tratada de laticínios, devido ao maior comprimento de labirinto (75 mm) em relação aos demais gotejadores utilizados (G1, G3, G4 e G5). No entanto, o gotejador G5 foi o mais resistente ao entupimento com água residuária tratada de laticínios, provavelmente em função do menor comprimento de seu labirinto (23 mm). Em geral, as características físico-químicas e microbiológicas da água residuária tratada de laticínios potencializaram o entupimento parcial e total dos gotejadores, resultando diminuição nos valores de Q e do CUD.

Figura 3. Formação de biofilme nos gotejadores G1 (A), G2 (B), G3 (C), G4 (D) e G5 (E) após 160 h de aplicação de água residuária de laticínios.



Fonte: Elaboração dos autores.

Fatos similares ocorreram nos trabalhos apresentados por Cunha et al. (2006) com água residuária do cafeeiro, Batista et al. (2008) com água residuária doméstica terciária, Silva et al. (2014) com água residuária do processamento da castanha de caju e Batista, Oliveira e Mesquita (2014) com água residuária de suinocultura, onde houve a formação de biofilme complexo, resultante da interação entre bactérias e partículas orgânicas e inorgânicas, que comprometeram a vazão dos gotejadores ensaiados.

As características físico-químicas e microbiológicas da água residuária de laticínios tratada, ao longo do período de operação das unidades de irrigação por gotejamento estão apresentadas na Tabela 5. O desvio padrão destas variáveis é atribuído às variações na composição do efluente, pois vários produtos lácteos são produzidos no experimento semanalmente, bem como ao regime de sanitização que emprega distintos produtos químicos.

Tabela 5. Valor médio e desvio padrão das características físico-químicas e microbiológica da água residuária de laticínios, ao longo do período experimental.

Características	Média	Desvio padrão
pH	7,85	0,52
CE (dS m ⁻¹)	1,88	0,31
Sólidos suspensos (mg L ⁻¹)	965	474
Sólidos dissolvidos (mg L ⁻¹)	1550	470
Cálcio (mmol _c L ⁻¹)	3,38	2,04
Magnésio (mmol _c L ⁻¹)	1,70	0,84
Ferro total (mg L ⁻¹)	1,286	0,948
Manganês total (mg L ⁻¹)	0,050	0,016
Coliformes totais (NMP 100 mL ⁻¹)	1,87x10 ^{6*}	7,36*

Nota: *Média e desvio padrão geométrico.

Fonte: Elaboração dos autores.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2011), o valor médio do pH da água residuária de laticínios tratada encontra-se dentro da faixa de 5 a 9, estabelecida para lançamento de efluentes tratados em corpos hídricos receptores. Este resultado foi superior ao valor médio de pH de 7,59 e 7,70 encontrados por Schmitt (2011) em efluentes de laticínios tratados por processos combinados de coagulação, floculação, adsorção e ultrafiltração; e por Lima et al. (2013) em efluentes de laticínios tratados por gradeamento, decanto-flotador e lagoa facultativa aerada. Segundo Nakayama, Boman e Pitts (2006), o valor médio do pH foi superior ao limite de 7,50, indicando risco severo de obstrução de gotejadores em função da maior suscetibilidade a formação de precipitados.

O valor médio da condutividade elétrica da água residuária de laticínios tratada foi inferior ao limite de 3,0 dS m⁻¹ proposto para uso agrícola de água residuária (CEARÁ, 2002). Este resultado foi superior a faixa de 0,21 a 1,01 dS m⁻¹ encontrada por Abrahão (2006) em estudo com água residuária de laticínios. A condutividade elétrica média da água residuária tratada de laticínios encontra-se dentro da faixa de 0,8 a 3,1 dS m⁻¹ estabelecida por Capra e Scicolone (1998), classificando o risco de obstrução de gotejadores como moderado.

A concentração média dos sólidos suspensos da água residuária tratada de laticínios foi bem superior ao limite de 50 mg L⁻¹ como estabelecido na Portaria nº 154 do Estado do Ceará (CEARÁ, 2002) para lançamento de efluentes tratados em corpo hídrico receptor. Além disso, o teor médio dos sólidos suspensos foi superior ao valor limite de 100 mg L⁻¹ estabelecido por Nakayama, Boman e Pitts (2006), classificando o risco de obstrução de gotejadores como severo. O resultado obtido foi superior a concentração média de sólidos suspensos de 28 e 540 mg L⁻¹ encontradas por Lima et al. (2013) e Schmitt (2011), respectivamente, em estudos com água residuária de laticínios.

A concentração média de sólidos dissolvidos encontra-se dentro da faixa de 500 a 2000 mg L⁻¹ estabelecida por Nakayama, Boman e Pitts (2006) onde o risco de obstrução de gotejadores foi classificado como moderado. Este resultado difere do valor médio de sólidos dissolvidos de 680 mg L⁻¹ obtido por Schmitt (2011) em estudo com água residuária de laticínios.

O teor médio do cálcio foi superior ao valor de 3,20 mmol_c L⁻¹ encontrado por Lima et al. (2013) em experimento com água residuária tratada de laticínios. Segundo Capra e Scicolone

(1998), esse valor médio foi inferior ao limite de $12,5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, classificando o risco de obstrução de gotejadores como baixo.

A concentração média do magnésio foi superior ao valor de $0,70 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ obtido por Lima et al. (2013) com água residuária doméstica tratada. Além disso, o valor médio do magnésio foi superior ao limite de $2,0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ que classifica o risco de obstrução de gotejadores como baixo (CAPRA; SCICOLONE, 1998).

O teor médio do ferro total presente na água residuária tratada de laticínios encontra-se dentro da faixa de $0,2$ a $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ estabelecida por Nakayama, Boman e Pitts (2006), a qual classifica o risco de obstrução de gotejadores como moderado. Este valor médio atende aos padrões de lançamento de água residuária tratada em corpo hídrico, onde o limite máximo para o ferro total é de $15,0 \text{ mg L}^{-1}$ (BRASIL, 2011). O valor médio do ferro total foi inferior a $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ não contribuindo, segundo Ayers e Westcot (1999), para a acidez e a indisponibilidade do fósforo e do molibdênio no solo.

A concentração média de manganês na água residuária tratada de laticínios de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ foi inferior ao limite de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ estabelecido para o lançamento de efluentes tratados em corpos hídricos receptores (BRASIL, 2011), e a $0,20 \text{ mg L}^{-1}$ que segundo Ayers e Westcot (1999) não representa riscos de toxicidade para cultivos agrícolas em solos ácidos. O manganês representa baixo risco de obstrução de gotejadores, pois o seu valor médio foi menor que $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ (NAKAYAMA, BOMAN; PITTS, 2006).

Na água residuária de laticínios tratada, o nível médio populacional de coliformes totais encontra-se dentro da faixa de 1×10^4 a 5×10^4 bactérias por mL, estabelecida por Nakayama, Boman e Pitts (2006), classificando o risco de obstrução de gotejadores como moderado. Este resultado foi inferior ao nível populacional de $9,7 \times 10^5$ bactéria por mL, obtido por Batista, Oliveira e Mesquita (2014) em água residuária tratada de suinocultura.

6 CONCLUSÕES

Ao longo do período experimental, houve redução nos valores da vazão e do coeficiente de uniformidade de distribuição das unidades de irrigação dotadas dos cinco tipos de gotejadores, em função do entupimento por biofilme.

O gotejador G2 foi o mais suscetível ao entupimento com água residuária tratada de laticínios, enquanto o gotejador G5 foi o mais resistente ao entupimento.

O risco de obstrução de gotejadores da água residuária tratada de laticínios foi classificado como moderado, para as características condutividade elétrica, sólidos dissolvidos, ferro total e população de bactérias, e como severo, para as características pH e sólidos suspensos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, S. S. **Tratamento de água residuária de laticínios em sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras**. 2006. 124 f. Tese (Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ANDRADE, L. H. **Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reúso**. Belo

Horizonte, MG: UFMG, 2011. 214 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Equipamentos de irrigação agrícola - Emissores e tubos emissores - Especificações e métodos de ensaio.** ABNT NBR ISO 9261. São Paulo: ABNT, 2006. 17p.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura.** Campina Grande: UFPB, 1999. 153p.

BATISTA, R. O.; SOARES, A. A.; SOUZA, J. A. R.; BATISTA, R. O. Modelos empíricos da irrigação localizada com esgoto sanitário tratado. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.16, n.3, p.369-377, 2008.

BATISTA, R. O.; SOARES, A. A.; MARIN, O. L. Z.; SOUZA, J. A. R.; LEITE, C. V.; MOREIRA, D. A. Taponamiento de goteros y del filtro de discos con agua residual sanitaria de una laguna de maduración. **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, Medellín, v. 62, p. 4957-4966, 2009.

BATISTA, R. O.; SOARES, A. A.; MOREIRA, D. A.; FEITOSA, A. P.; BEZERRA, J. M. Influência de diferentes qualidades de esgoto doméstico na vazão de gotejadores. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, p. 128-134, 2011.

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

BATISTA, R. O.; OLIVEIRA, A. F. M.; MESQUITA, F. O. Desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento operando com água residuária da suinocultura. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 26, n. 1, p. 75-88, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho. Brasília, 16 maio 2011. n. 92, p. 1-89.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Conjuntura mensal – leite e derivados.** Brasília: CONAB, 2014.10p. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_08_08_17_49_39_leitejulho2014.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015.

BRIÃO, V. B.; TAVARES, C. R. G. Ultrafiltração de efluente da indústria de laticínios para recuperação de nutrientes: efeito da pressão e da velocidade tangencial. **Brazilian Journal Food Technology**. Campinas, v. 15, n. 4, p. 352-362, 2012.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 70, p. 355-365, 1998.

CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Estado do Ceará. **Portaria nº 154, de 22 de julho de 2002**. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. Diário Oficial do Estado, v.5 , n.187 , 4p. , 2002. Disponível em: <http://antigo.semace.ce.gov.br/integracao/biblioteca/legislacao/conteudo_legislacao.asp?cd=95>. Acesso em: 17 jan. 2015.

CUNHA, F. F.; MATOS, A. T.; BATISTA, R. O.; LO MONACO, P. A. Uniformidade de distribuição em sistemas de irrigação por gotejamento utilizando água residuária da despolpa dos frutos do cafeeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 1, p. 143-147, 2006.

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

LIMA, V. I. A.; ALVES, S. M. C.; OLIVEIRA, J. F.; BATISTA, R. O.; PINHEIRO, J. G.; DI SOUZA, L. Desempenho do sistema de tratamento de água residuária de laticínios e os efeitos de sua disposição em ARGISSOLO. **Water Resources and Irrigation Management**, Cruz das Almas, v.2, n.2, p.93-101, 2013.

MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; BORGES, A. C.; MATOS, M. P. Influência da taxa de carga orgânica no desempenho de sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.15, n.1, p.83-92, 2010.

MESQUITA, F. O.; SILVA, K. B.; DI SOUZA, L.; DANTAS, T. B.; BATISTA, R. O. Uniformidade de aplicação de percolado de aterro sanitário diluído em unidades de irrigação por gotejamento. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 11, n. 1, 145-156, 2015.

NAKAYAMA, F. S; BOMAN, B. J.; PITTS, D. Maintenance. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. (Eds.). **Microirrigation for crop production: Design, Operation, and Management**. Amsterdam: Elsevier, 2006, cap. 11, p. 389 - 430.

OLIVER, M. M. H.; HEWA, G. A.; PEZZANITI, D. Bio-fouling of subsurface type drip emitters applying reclaimed water under medium soil thermal variation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 133, p. 12-23, 2014.

PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación**. 2. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1990. 471 p.

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

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G.; YECHIALY, Z.; LEV, Y. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 33, p. 127-137, 1997.

RICE, E. W.; BAIRD, R. B.; CLESCERI, A. D. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington: APHA, AWWA, WPCR, 2012. 1496p.

SCHMITT, D. M. F. **Tratamento de águas residuárias da indústria do laticínios pelos processos combinados coagulação/floculação/adsorção/ultrafiltração utilizando sementes de Moringa Oleífera como coagulante**. 2011. 105 f. Dissertação (Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo.

SILVA, K. B.; BATISTA, R. O.; SILVA, S. K. C.; DIAS, N. S.; COSTA, M. S. Efeito de distintas pressões de serviço na determinação da vazão em sistemas de irrigação por gotejamento operando com efluente do processamento da castanha de caju. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, Patos, v.8, n.4, p 89-96, 2012.

SILVA, K. B.; SILVA JÚNIOR, M. J.; BATISTA, R. O.; SANTOS, D. B.; BATISTA, R. O.; LEMOS FILHO, L. C. A. Irrigação por gotejamento com água residuária tratada da indústria da castanha de caju sob pressões de serviço. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.35, n.2, p. 695-706, 2014.