

DESEMPENHO DE GOTEJADORES APLICANDO PERCOLADO DE ATERRO SANITÁRIO DILUÍDO

**FRANCISCO DE OLIVEIRA MESQUITA¹; SANDRA MARIA CAMPOS ALVES²;
RAFAEL OLIVEIRA BATISTA²; TARCÍSIO BATISTA DANTAS² E LUIZ DI
SOUZA³**

¹ Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, UFERSA, câmpus Pau dos Ferros-RN, BR 226, km 405, Bairro São Geraldo, CEP: 59900-000 – Pau dos Ferros, RN, Brasil. E-mail: mesquitaagro@yahoo.com.br; ² Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, UFERSA câmpus Mossoró-RN, Avenida Francisco Mota, nº 572, Bairro Costa e Silva, CEP: 59625-900-Mossoró, RN, Brasil. E-mail: ettualy@yahoo.com.au, tarcisioemparn@hotmail.com; ³ Departamento de Química, UERN câmpus Mossoró, Rua Professor Antônio Campos, s/n, BR 110, km 48, Bairro Costa e Silva, CEP: 59600-000 - Mossoró, RN, Brasil. E-mail: souzaluizdi@gmail.com

1 RESUMO

O percolado de aterro sanitário possui quantidades apreciáveis de nutrientes que podem ser utilizados na produção de biomassa para fins energéticos. Objetivou-se neste trabalho analisar os indicadores de desempenho de gotejadores aplicando percolado de aterro sanitário diluído, bem como os principais fatores de obstrução e a qualidade do percolado. O experimento foi montado no esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas os tipos de gotejadores (G1-não autocompensante; G2 - autocompensante, G3 - autocompensante e G4 - autocompensante) e nas subparcelas os tempos de operação (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 h), com quatro repetições. A vazão relativa (QR), a redução da vazão relativa (RQR) e os atributos físico-químicos e microbiológicos do percolado de aterro sanitário diluído, foram obtidos a cada 20 h, até completar 160 h de operação em todas as unidades de irrigação. Os valores de QR e RQR do gotejador G1 diferiram estatisticamente dos valores dos gotejadores G2, G3 e G4. O gotejador G1 foi o mais susceptível à obstrução, enquanto os gotejadores G2, G3 e G4 foram mais resistentes ao entupimento.

Palavras-chave: resíduos urbanos, lixiviado, emissores, obstrução.

**MESQUITA, F. O.; ALVES, S. M. C.; BATISTA, R. O.; DANTAS, T. B.; SOUZA, L. D.
PERFORMANCE OF DRIPPERS OPERATING WITH DILUTED LANDFILL
LEACHATE**

2 ABSTRACT

The landfill leachate has appreciable amounts of nutrients that can be used to produce biomass for energy purposes. The objective of this work is to analyze the drip performance indicators applying diluted leachate landfill well as the main obstruction factors and the leachate quality. The experiment was set up on split-plot scheme with kind drippers (G1 - non-pressure compensated; G2 - pressure compensated; G3 - pressure compensated; and G4 - pressure compensated) in the plot and operating times (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 and

160 h) in subplots, with four replications. The relative flow rate (QR), the reduction of relative flow (RQR) and physicochemical and microbiological characteristics of the landfill leachate diluted were obtained every 20 h until the completion of 160 h of operation in all irrigation units. The QR and RQR values of the dripper G1 differed significantly from the values found in G2, G3, and G4 drippers. The G1 dripper was the most susceptible to obstruction while the G2, G3, and G4 drippers were more resistant to clogging.

Keywords: municipal waste, leachate, emitters, clogging.

3 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos urbanos despertam grande preocupação ambiental na sociedade moderna, devido às grandes quantidades geradas e as formas inadequadas de disposição no ambiente, que podem causar sérios problemas como a geração de odores, poluição ambiental e a proliferação de insetos e roedores transmissores de doenças ao ser humano (SETIYANTO et al., 2013).

Entre as tecnologias adotadas para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos, o aterro sanitário se destaca por coletar e tratar o lixiviado e metano gerados, durante o período de operação e desativação deste empreendimento (CELERE et al., 2007). Os lixiviados de aterros sanitários são resultantes da interação entre o processo de biodegradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e da infiltração de águas pluviais que percolam e solubilizam componentes orgânicos e inorgânicos (MATOS et al., 2013).

Segundo Santos e Dias (2012) e Silva et al. (2010), os resíduos sólidos urbanos quando tratados e dispostos de forma planejada e controlada podem ser utilizados como matéria-prima para a construção civil, fabricação de produtos reciclados e nas atividades agrícolas para a composição da matéria orgânica dos adubos, além da irrigação controlada de forrageiras visando a produção de biomassa para fins energéticos.

Um método alternativo para disposição do percolado de aterro sanitário é utilizá-lo como fonte de nutrientes e água para o solo em condições controladas, aplicando-o na forma de irrigação para as culturas produtoras de biomassa, utilizando-se ainda em conjunto, práticas de manejo agronomicamente adequadas para resolver os problemas de qualidade do sistema solo-planta (MATOS et al., 2013).

A irrigação localizada se destaca para aplicação de águas residuárias pela elevada eficiência de aplicação do efluente, minimização do escoamento superficial e da percolação, redução dos teores de sais próximo ao sistema radicular das plantas e prevenção da formação de aerossóis (BATISTA et al., 2010). No entanto, a grande vulnerabilidade da aplicação de águas residuárias pela irrigação localizada, consiste na alta suscetibilidade ao entupimento dos gotejadores em função do nível de tratamento do efluente (BATISTA et al., 2005) e das características internas dos emissores (BATISTA et al., 2013).

Como consequência do entupimento dos gotejadores tem-se a alteração da vazão e a redução da uniformidade de aplicação (DAZHUANG et al., 2009), resultando na perda de eficiência do sistema de irrigação, aumento do custo operacional e redução da produtividade do cultivo agrícola (LIU; HUANG, 2009).

Segundo Liu e Huang (2009), a vazão relativa (QR) e a redução da vazão relativa (RQR) consideram a razão entre a vazão atual e a vazão de fabricação do gotejador; por este motivo expressão com precisão os níveis de obstrução dos gotejadores que aplicam água

residuária, não tendo uma recomendação de número fixo de linhas laterais ou de gotejadores por linha lateral, para a avaliação do desempenho hidráulico.

Oliver; Hewa & Pezzaniti (2014) obtiveram valores médios de QR de 0,47; 0,63 e 0,79 L h⁻¹ em unidades de aplicação dotadas dos gotejadores E1 (1,60 L h⁻¹), E2 (2,0 L h⁻¹) e E3 (2,3 L h⁻¹), respectivamente, após 3600 h de operação com água residuária doméstica tratada. Enquanto, no estudo desenvolvido por Medeiros et al. (2008), notou-se o entupimento de dois modelos de gotejadores, M1 (1,4 L h⁻¹) e M2 (2,05 L h⁻¹), em função da aplicação de carbonato de potássio, obtiveram ao final do experimento valores de RQR iguais a 52 e 17%, respectivamente.

Diante o exposto, objetivou-se neste trabalho analisar os indicadores de desempenho de gotejadores aplicando percolado de aterro sanitário diluído, bem como os principais fatores de obstrução e a qualidade do percolado.

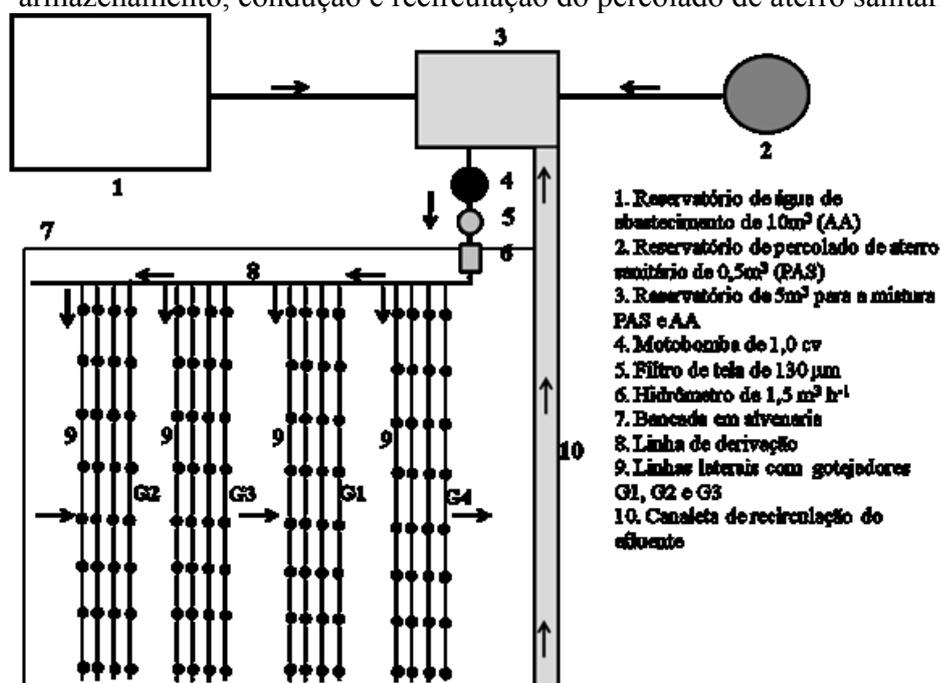
4 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no período de 21 de agosto a 10 de outubro de 2013, na Unidade Experimental de Reuso de Água (UERA), da Universidade Federal Rural do Semi - Árido (UFERSA), em Mossoró-RN.

O experimento foi montado em esquema de parcelas subdivididas, tendo, nas parcelas, os modelos de gotejadores (G1, G2, G3 e G4) e, nas subparcelas, os períodos das avaliações (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 horas), com quatro repetições (cada linha lateral representou uma repetição), conforme a metodologia proposta por Batista et al. (2013).

Para a realização dos ensaios experimentais montou-se uma bancada constituída por um reservatório de 0,5 m³ para armazenamento do percolado de aterro sanitário (PAS), um reservatório de 10 m³ para armazenamento da água da rede de abastecimento (AA), um reservatório de 5,0 m³ para armazenamento da mistura do PAS e da AA e uma plataforma construída em alvenaria e concreto, nas dimensões de 2,0 m de largura por 8,0 m de comprimento, tendo piso impermeabilizado uma canaleta lateral para recirculação do efluente, como apresentado na Figura 1.

Figura 1. Esquema da bancada experimental, destacando todos os seus componentes para armazenamento, condução e recirculação do percolado de aterro sanitário diluído.



Fonte: Arquivos do Pesquisador

No interior da plataforma foram montadas quatro unidades de gotejamento, composta por um conjunto motobomba de 1,0 cv, um hidrômetro de 1,5 m³ h⁻¹, um filtro de tela com aberturas de 130 µm, uma de linha de derivação com diâmetro nominal de 32 mm de PVC e PN 40 e 16 linhas laterais de polietileno, com diâmetro nominal de 16 mm, dotadas de quatro tipos de gotejadores, conforme apresentado na Figura 1.

Na linha de derivação foram instalados 16 conectores com borracha de vedação, onde foram inseridas quatro linhas laterais por tipo de gotejador (cada linha lateral representou uma repetição). Em cada linha lateral foram marcados nove gotejadores para avaliação do desempenho hidráulico, totalizando 144 gotejadores avaliados nas quatro unidades de gotejamento, a cada 20 h até completar o tempo de operação de 160 h. As linhas laterais, com 8 m de comprimento, foram instaladas em nível sobre o piso da plataforma. Na Tabela 1 estão apresentadas as principais informações técnicas dos gotejadores utilizados nos ensaios experimentais.

Tabela 1. Gotejadores (G) utilizados nos ensaios experimentais, destacando o fabricante (F), o dispositivo de autocompensão (DA), a vazão nominal (Q), o coeficiente de vazão (k), o 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* (L.h ⁻¹)	k*	x*	A (mm ²)	L (mm)	CV _f *	P* (kPa)	EE* (m)
G1	Plastro Hydrodrip Super	Não	1,65	0,53	0,48	4,0**	37**	± 5	60 - 150	0,30
G2	Netafim PCJ-CNJ	Sim	2,00	2,00	0,00	2,0*	35*	± 7	50 - 400	0,80
G3	Netafim PCJ-CNJ	Sim	4,00	4,00	0,00	2,0*	35*	± 7	50 - 400	0,80
G4	Netafim PCJ-CNJ	Sim	8,00	8,00	0,00	2,0*	35*	± 7	50 - 400	0,80

Fonte: Arquivos do Pesquisador

Nota: * e ** informações obtidas nos catálogos dos fabricantes e informações medidas com auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, respectivamente. 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 autolimpeza, que aumentam a sua resistência ao entupimento. CNJ - sistema anti-drenante.

O percolado (PAS) foi transportado de um reservatório superficial, situado no aterro sanitário de Mossoró-RN, por meio de um recipiente plástico com capacidade armazenadora para 1 m³. Enquanto, a água de abastecimento (AA) foi oriunda da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), a qual foi armazenada em um reservatório de concreto de 10 m³.

Durante o período experimental, o PAS foi diluído em AA, na proporção de 1:3, no reservatório de 5,0 m³, para ser aplicado nas quatro unidades de gotejamento, quatro horas por dia, até completar 160 h.

Em cada linha lateral das unidades de irrigação foram fixados nove gotejadores, espaçados a cada 0,80 m e 0,30 m entre as linhas laterais, totalizando 144 gotejadores em todo sistema, para a avaliação do desempenho hidráulico. A cada 20 h de operação das unidades de gotejamento mediu-se a vazão dos 144 gotejadores fixados por linha lateral. Na medição da vazão dos gotejadores utilizaram-se coletores plásticos de 200 mL e proveta de 100 mL. Quantificou-se o volume aplicado de efluente pelos gotejadores, durante três minutos, conforme recomendado pela NBR ISO 9261 (ABNT, 2006). 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.

Na determinação do desempenho hidráulico das unidades de irrigação utilizou-se como indicadores a vazão relativa (QR) e a redução da vazão relativa (RQR), apresentado nas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$QR = \frac{q_a}{q_i} \quad (2)$$

em que:

QR - vazão relativa, L h⁻¹;
 q_a - vazão atual, L h⁻¹; e
 q_i - vazão do fabricante, L h⁻¹.

$$RQR = 100 \left(\frac{q_i - q_a}{q_i} \right) \quad (3)$$

em que:

RQR - Redução da vazão relativa, %;
 q_i - vazão inicial, L h⁻¹; e
 q_a - vazão atual, L h⁻¹.

A pressão de serviço foi mantida, diariamente, no valor de 140 kPa utilizando-se um manômetro analógico de glicerina, graduado de 0 a 400 kPa, com classe de exatidão de ±1% de fundo de escala.

No período experimental, realizaram-se nove determinações das características físico-químicas e microbiológicas do percolado de aterro sanitário diluído, inerentes ao risco de obstrução de gotejadores. Para isto, as amostras foram coletadas a cada 20 h, após o sistema de filtragem, sendo posteriormente armazenadas em recipientes esterilizados, à temperatura de 4°C em caixa isotérmica com gelo, até o momento da realização das análises em laboratórios da UFERSA.

No Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) e no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) do Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas da UFERSA foram medidos os valores de potencial hidrogeniônico (pH), com peagâmetro de bancada; e da condutividade elétrica (CE) expressa em dS m⁻¹, com condutivímetro de bancada; as concentrações de ferro total (Fe) e manganês total (Mn) em mg L⁻¹, por espectrofotometria de absorção atômica; as concentrações de cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) em mmol L⁻¹, pelo método titulométrico. As concentrações dos sólidos suspensos (SS) e dos sólidos totais (ST), em mg L⁻¹, foram obtidas pelo método gravimétrico, enquanto as concentrações dos sólidos dissolvidos (SD), em mg L⁻¹, foram obtidas pela diferença de sólidos totais e sólidos suspensos.

Enquanto, no Laboratório de Inspeção de Produtos de Origem Animal (LIPOA), também, da UFERSA foram detectados e quantificados os níveis populacionais dos coliformes totais (CT), empregando a técnica dos tubos múltiplos.

Deve-se ressaltar que todo o procedimento de coleta, armazenamento e análises das amostras seguiram as recomendações técnicas do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (RICE; BAIRD & CLESCERI, 2012).

Decorrida as 160 h de operação das unidades de gotejamento, efetuou-se o corte e abertura em quatro linhas laterais, sendo uma de cada tipo de gotejador; selecionando-se o

último gotejador avaliado de cada linha para retirada de amostras do material que ocasionou a obstrução e, paralelamente, realizou-se o registro fotográfico dos mesmos, por meio de câmera digital Sony, com resolução de 2.0 megapixels.

Os gotejadores com biofilme foram armazenados em frascos esterilizados de 60 mL e encaminhados ao Laboratório de Histologia e Embriologia da UFERSA, onde se realizou a identificação e caracterização dos agentes biológicos ocasionadores da bioincrustação, com o auxílio de uma câmera Olympus DP72, possuindo resolução de 12.8 megapixels, acoplada a um microscópio óptico da marca Olympus BX51. Amostras do biofilme foram distribuídas em lâminas de microscopia óptica, sendo analisadas ao microscópio óptico com objetiva de 100x.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), empregando-se o teste F a 5% de probabilidade. Para o fator qualitativo tipo de gotejadores, as médias foram comparadas, utilizando-se o teste Tukey, a 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo tempo de operação, os modelos de regressão simples e múltipla foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, aplicando-se o teste t num nível de até 10%, no coeficiente de determinação ($\geq 60\%$) no processo em estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, encontra-se o resumo da análise de variância dos valores de QR e RQR das unidades de irrigação, no esquema de parcelas subdivididas. Verificou-se, nas variáveis QR e RQR, que a interação G x T foi significativa a 1% de probabilidade, tendo valores de CV das subparcelas de 5,20 e 124,70%, respectivamente. O maior valor do CV das subparcelas para a RQR é atribuído a grande sensibilidade deste indicador a ocorrência de obstrução nos gotejadores.

Tabela 2. Resumo da análise de variância das variáveis QR (decimal) e RQR (%), no esquema de parcelas subdivididas

Fontes de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	
		QR	RQR
Tipo de gotejadores (G)	3	0,19**	1884,23**
Resíduo (a)	9	0,015	154,05
Tempo de operação (T)	8	0,0097**	97,33**
G x T	24	0,011**	109,44**
Resíduo (b)	99	0,025	24,99
CV das parcelas (%)		12,93	309,60
CV das subparcelas (%)		5,20	124,70

Fonte: Arquivos do Pesquisador

** Significativo à 1% de probabilidade pelo teste F. CV - coeficiente de variação.

Para o fator qualitativo tipos de gotejadores (G), compararam-se as médias das variáveis QR e RQR, como observado na Tabela 3. As variáveis QR e RQR apresentaram diferenças estatísticas do gotejador G1 em relação aos gotejadores G2, G3 e G4. Este fato evidencia a maior sensibilidade à obstrução do gotejador G1, devido provavelmente ao maior comprimento de labirinto (Tabela 1) em relação aos demais gotejadores, corroborando com o estudo desenvolvido por Ravina et al. (1992) com gotejadores aplicando água residuária doméstica tratada. Neste caso, o maior comprimento do labirinto do gotejador G1

provavelmente favoreceu tanto a sedimentação de partículas quanto a adesão de bactérias com parede celular hidrofóbica, resultando no desenvolvimento de biofilme. Semelhantemente Cararo et al. (2006) verificaram aumento linear do nível de entupimento com o comprimento do labirinto dos emissores. Por outro lado, a maior resistência ao entupimento dos gotejadores G2, G3 e G4 está relacionada ao mecanismo de auto-limpeza inerente aos tipos de gotejadores, devido à atuação da membrana de autocompensão. Segundo Resende; Coelho & Piedade (2000), nos gotejadores autolimpantes, o mecanismo de auto-limpeza é projetado para expelir qualquer partícula que possa causar o entupimento, pelo incremento da pressão diferencial, que faz com que o diafragma aumente, momentaneamente, o volume do corte transversal da saída de água para expulsar as partículas do emissor. No trabalho conduzido por Silva et al. (2013) com água residuária do processamento da castanha de caju, foram ensaiados os mesmos tipos de gotejadores (G1 - 1, 6 L h⁻¹, G2 - 2,0 L h⁻¹ e G3 - 4,0 L h⁻¹). Estes autores evidenciaram que o gotejador G1 foi o mais sensível à obstrução em relação aos gotejadores G2 e G3, devido ao maior comprimento de labirinto que favoreceu a formação de biofilme.

Tabela 3. Comparação entre as médias dos valores de QR (decimal) e RQR (%) para os tipos de gotejadores.

Gotejadores	QR*	RQR*
G1	0,85b	14,68a
G2	1,01a	-1,23b
G3	0,99a	0,63b
G4	0,98a	1,95b
DMS (%)	0,077	7,65

Fonte: Arquivos do Pesquisador

* Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna, não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey. DMS - Diferença mínima significativa.

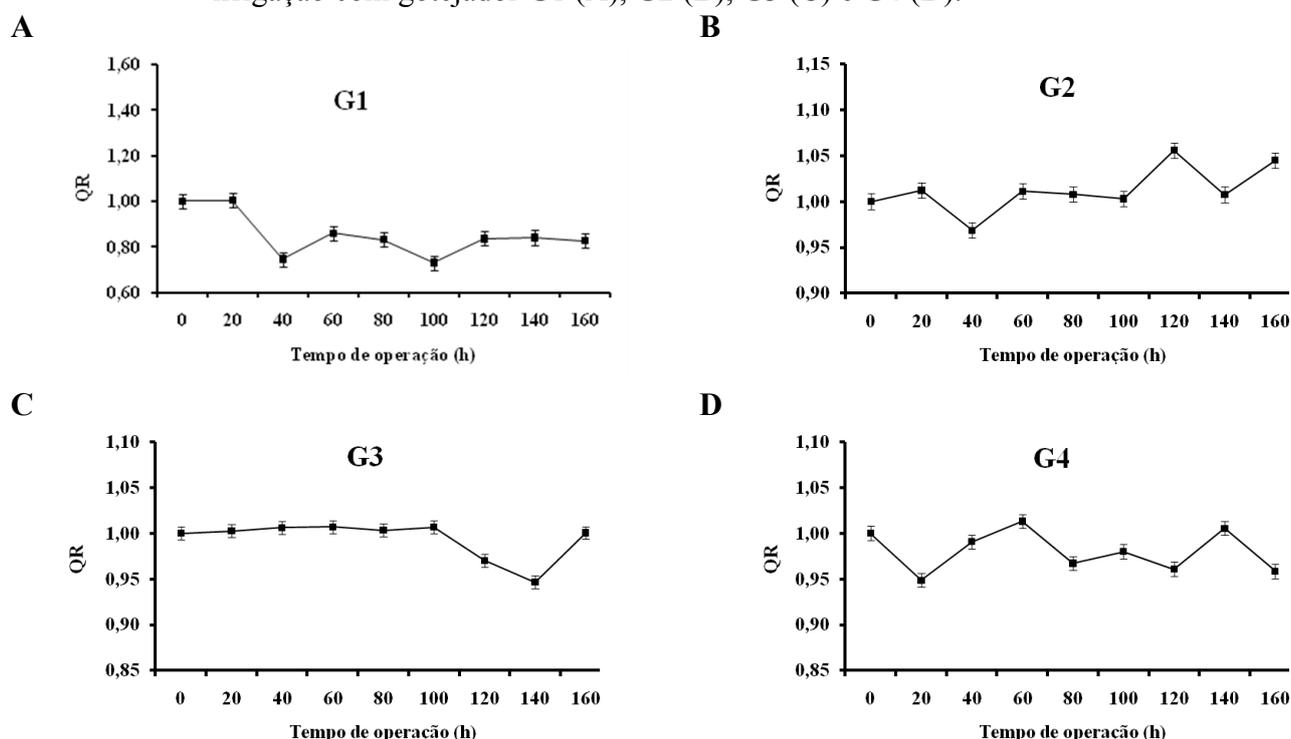
Evidenciaram-se, na Figura 2, os valores da vazão relativa (QR), ao longo do tempo de operação, das unidades de irrigação dotadas dos gotejadores G1, G2, G3 e G4. Valores de QR iguais a 1 (QR = 1,00) evidenciam ausência de entupimento nos gotejadores; os valores de QR superiores a 1 (QR > 1,00) mostram danos causados na membrana de autocompensão dos gotejadores G2, G3 e G4 provavelmente, devido: a) ao aquecimento do efluente dentro dos emissores anti-drenantes, nos momentos em que o sistema não estava operando, resultando em dilatação dos componentes dos gotejadores (CARARO et al., 2006); e) à deterioração do dispositivo de autocompensão pela ação de atividade microbiana (RAVINA et al., 1992); e os valores de QR inferiores a 1 (QR < 1,00) indicam obstrução acarretando redução na vazão dos gotejadores, pois ocorre o estreitamento das dimensões internas do emissor com biofilme, resultando na redução da área de seção transversal de escoamento, como evidenciado nos estudo de Batista et al. (2013) e Silva et al. (2013).

Utilizando a classificação proposta por Capra e Scicolone (1998), constatou-se que os valores de QR para os quatro tipos de gotejadores, em todos os tempos de operação, foram superiores a 79%, sendo classificados como elevados.

Notou-se para o gotejador G1, após 20 h de operação, que todos os valores de QR foram inferiores a 1,00, indicando entupimento dos gotejadores que resulta na redução de vazão; tendo valor mínimo no tempo de operação de 102 h, quando se deriva e iguala a zero a equação de regressão, que relaciona os dados de QR e tempo de operação, para o gotejador G1 (Tabela 3). Já no gotejador G2, os valores de QR foram superiores a 1,00 em quase todos os tempos de operação, exceto às 0 e 40 h; evidenciou-se que houve o predomínio do aumento

da vazão, em função da acumulação de biofilme na membrana de autocompensação do gotejador. Para o gotejador G3, verificou-se que houve aumento da vazão ($QR > 1$) dos gotejadores às 40, 60 e 100 h, enquanto às 120 e 140 ocorreu redução da vazão ($QR < 1$) dos gotejadores, esta oscilação nos valores de QR é atribuída à dinâmica de formação do biofilme. No gotejador G4, os valores de QR foram inferiores a 1,00 na maioria dos tempos de operação, exceto às 0, 60 e 140 h, destacando a predominância do aumento na vazão dos gotejadores. Em condições experimentais diferentes, Oliver; Hewa & Pezzaniti (2014) obtiveram valores médios de QR de 0,47, 0,63 e 0,79 nas unidades de irrigação com gotejadores E1 ($1,60 \text{ L h}^{-1}$), E2 ($2,0 \text{ L h}^{-1}$) e E3 ($2,3 \text{ L h}^{-1}$), respectivamente, após 3600 h de operação com água residuária doméstica tratada.

Figura 2. Valores médios de QR (decimal), ao longo do período de operação, nas unidades de irrigação com gotejador G1 (A), G2 (B), G3 (C) e G4 (D).

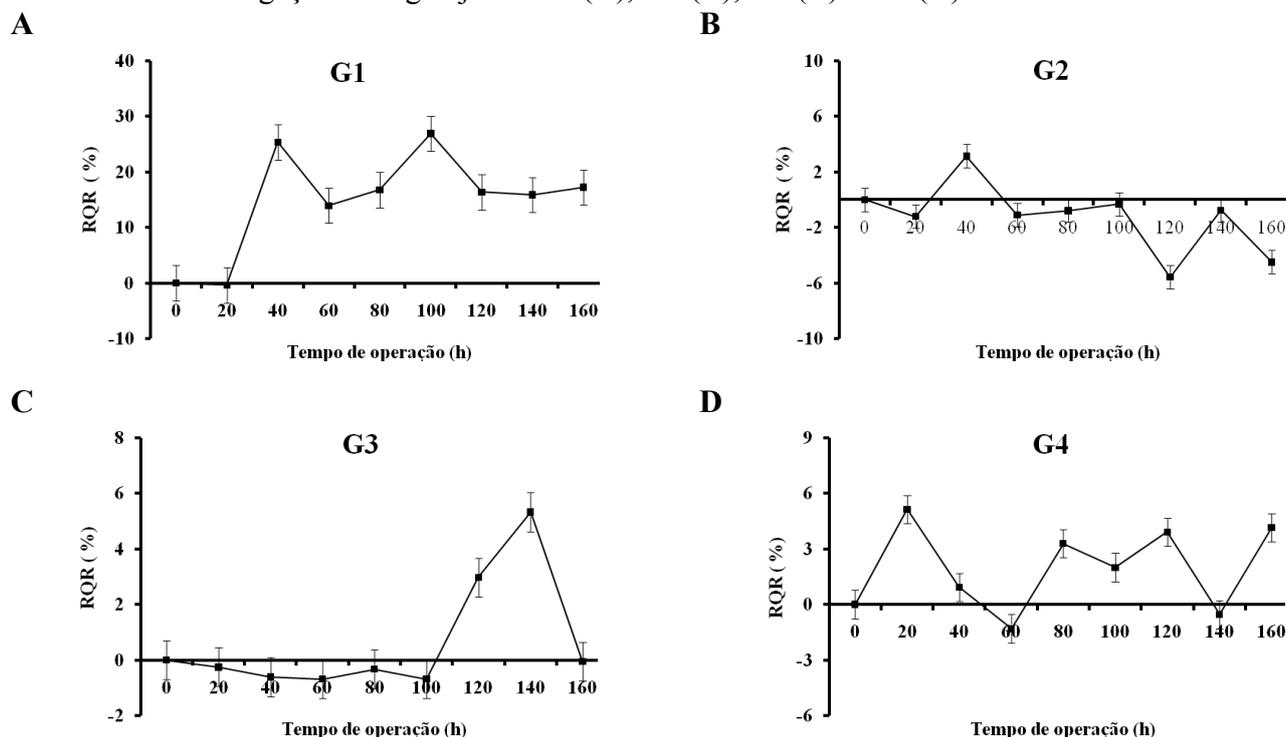


Fonte: Arquivos do Pesquisador

Estão apresentados na Figura 3, os valores médios de RQR das unidades de irrigação dotadas dos gotejadores G1, G2, G3 e G4, ao longo do período de operação. Valores de RQR superiores a zero ($RQR > 0$) indicam entupimento dos gotejadores pela redução na vazão dos gotejadores, enquanto valores de RQR inferiores a zero ($RQR < 0$) expressão obstrução dos gotejadores em função do aumento da vazão dos gotejadores.

Para o gotejador G1, predominaram valores superiores a zero de RQR, após 20 h de operação das unidades de irrigação, tendo valor máximo de RQR às 102 h, quando se deriva e iguala a zero a equação de regressão, que relaciona os dados de RQR e tempo de operação, para o gotejador G1 (Tabela 3). No gotejador G2, os valores de RQR foram inferiores a zero em todos os tempos de operação, exceto as 0 e 40 h. Já no gotejador G3, houve o predomínio dos valores inferiores a zero de RQR, exceto nos tempos de operação de 0, 120 e 140 h. Para o gotejador G3, quase todos os valores de RQR foram superiores a zero, com exceção dos tempos de operação 0, 60 e 140 h.

Figura 3. Valores médios de RQR (%), ao longo do período de operação, nas unidades de irrigação com gotejador G1 (A), G2 (B), G3 (C) e G4 (D).



Fonte: Arquivos do Pesquisador

Na Tabela 4 apresentam-se os modelos de regressão ajustados às variáveis QR e RQR em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação, para os tipos de gotejadores (G1, G2, G3 e G4). Observou-se, na Tabela 4 para o gotejador G1, que o modelo quadrático foi o que melhor representou a relação entre a variável QR e o T, sendo o valor do coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,60. Enquanto, os valores de QR nos demais gotejadores não foram modificados, significativamente, por T, demonstrando que o modelo nulo (média) foi o que melhor se ajustou aos dados. O modelo quadrático, também, foi o que melhor se ajustou à relação entre os dados de RQR e T das unidades de irrigação dotadas do gotejador G1, com valor R^2 igual a 0,60. Por outro lado, para os gotejadores G2, G3 e G4, não houve efeito significativo do T sobre os dados do RQR, indicando que o modelo nulo (média) foi o que melhor se ajustou aos dados. Liu e Huang (2009) avaliaram os níveis de entupimento de gotejadores operando com água residuária doméstica tratada e, encontraram relação linear entre os valores de RQR e a percentagem de gotejadores completamente entupidos para dois modelos de gotejadores E1 (2,83 L h⁻¹) e E2 (1,88 L h⁻¹), sendo os valores de R^2 de 0,71 e 0,87, respectivamente. Em outro estudo, Cararo et al. (2006), observou-se relações lineares entre o RQR e o T, nas unidades de irrigação que operaram com água residuária doméstica tratada, durante 373 h.

Tabela 4. Equações de regressão dos valores QR (decimal) e RQR (%) em função do tempo de operação (T) e respectivos coeficientes de determinação (R²)

Gotejadores	Variável QR	
	Equação de regressão	R ²
G1	$\hat{Q}R = 1,006 - 0,00428^* T + 0,0000209^* T^2$	0,60
G2	$\hat{Q}R = \bar{Q}R = 1,012$	-
G3	$\hat{Q}R = \bar{Q}R = 0,994$	-
G4	$\hat{Q}R = \bar{Q}R = 0,981$	-

Gotejadores	Variável RQR	
	Equação de regressão	R ²
G1	$R\hat{Q}R = -0,643 + 0,428^* T - 0,00209^* T^2$	0,60
G2	$PR\hat{Q} = PR\bar{Q} = -1,232$	-
G3	$PR\hat{Q} = PR\bar{Q} = 0,633$	-
G4	$PR\hat{Q} = PR\bar{Q} = 1,953$	-

Fonte: Arquivos do Pesquisador

Nota: * Significativo à 5% de probabilidade pelo teste “t”. T - tempo de operação, em h.

As equações de regressão lineares múltiplas foram ajustadas, somente, para o gotejador G1, pois os demais gotejadores não apresentaram oscilações significativas dos valores de QR e RQR, ao longo do tempo de operação. Neste sentido, a Tabela 5 apresenta as equações de regressão lineares múltiplas ajustadas às variáveis QR e RQR em função das características física (SS), químicas (SD, Fe, Mn, Ca²⁺) do percolado de aterro sanitário diluído, para o gotejador G1.

Tabela 5. Equações de regressão lineares múltiplas ajustadas às variáveis QR (decimal) e RQR (%) em função das características físico-químicas (SS, Mn, Fe e Ca²⁺) do percolado de aterro sanitário diluído, para o gotejador G1

Gotejador	Variável QR	
	Equação de regressão	R ²
G1	$\hat{Q}R = 1,149 + 0,000977^* SS + 12,802^* Mn - 2,234^* Fe + 0,878^0 Ca^{2+}$	0,83

Gotejador	Variável RQR	
	Equação de regressão	R ²
G1	$R\hat{Q}R = -15,310 - 0,0986^* SS - 127,6880^* Mn + 222,755^* Fe - 86,775^0 Ca^{2+}$	0,84

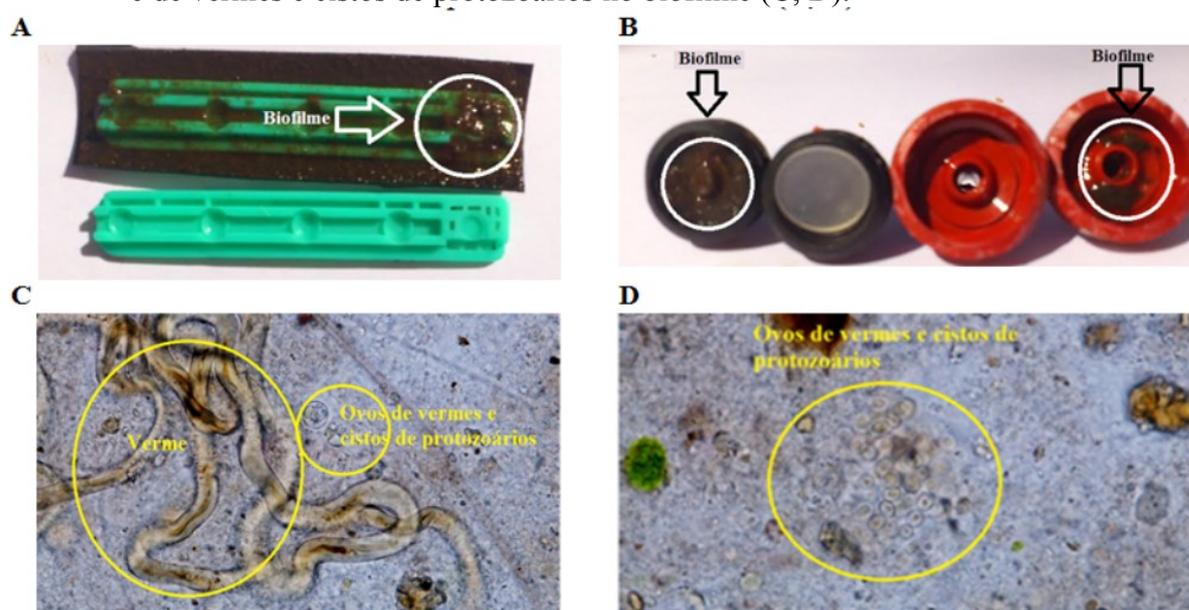
Fonte: Arquivos do Pesquisador

Nota: * e ⁰ Significativo à 5 e 10% pelo teste “t”, respectivamente. SS - sólidos suspensos, em mg L⁻¹; Mn - manganês total, em mg L⁻¹; Fe - ferro total, em mg L⁻¹; e Ca²⁺ - cálcio, em mmol_c L⁻¹.

O biofilme de coloração castanho escuro apresentou maior adesão na área de filtração dos gotejadores e na câmara da membrana de autocompensão (Figuras 4A e 4B), corroborando com as imagens registradas por Silva et al. (2013) de gotejadores obstruídos com biofilme, resultante da aplicação de água residuária do processamento da castanha de caju. Constatou-se nos gotejadores entupidos o desenvolvimento de biofilme complexo, resultante provavelmente da interação entre os fatores físico-químico-biológicos (Figuras 4C e 4D). Ravina et al. (1992), também, encontraram biofilme aderido no labirinto e na

membrana de autocompensão dos gotejadores. Em outro estudo de Batista et al. (2006), houve a formação de biofilme nos gotejadores que aplicaram água residuária doméstica terciária, resultante da interação entre mucilagens bacterianas e algas. Os referidos autores afirmaram, ainda, que as bactérias dos gêneros *Clostridium*, *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Enterobacter* formaram um muco microbiano, no qual se aderiram partículas, principalmente de origem orgânica, representadas por células de algas vivas ou em decomposição, pertencentes aos grupos *Cyanophyta* (gênero *Chlorococcus*), *Euglenophyta* (gêneros *Euglena* e *Phacus*) e *Chlorophyta* (gêneros *Selenastrum*, *Scenedesmus* e *Sphaerocystis*).

Figura 4. Imagens dos gotejadores G1 (A) e G2 (B) com o material ocasionador da obstrução e de vermes e cistos de protozoários no biofilme (C, D).



Fonte: Arquivos do Pesquisador

Na Tabela 6 estão apresentados os valores das características físico-químicas e microbiológicas do percolado de aterro sanitário diluído, ao longo do período experimental.

O valor médio do pH encontra-se dentro da faixa de 7,0 a 7,5 proposta por Nakayama et al. (2006) que classifica o risco de obstrução de gotejadores como moderado, em função da precipitação de elementos químicos.

Tabela 6. Valores das características físico-químicas e microbiológicas do percolado de aterro sanitário diluído, obtidos a cada 20 h até completar o tempo de operação de 160 h

Características	Tempo de operação (h)									Média e desvio padrão
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	
pH	6,90	7,13	7,24	7,40	7,33	7,37	7,86	7,88	7,92	7,45±0,36
CE (dS m ⁻¹)	2,54	1,91	2,10	1,91	3,19	2,93	3,30	3,56	3,76	2,80±0,71
SS (mg L ⁻¹)	38	43	68	120	108	234	380	447	502	216±183
SD (mg L ⁻¹)	288	360	868	1325	2373	3310	4135	5467	6125	2695±2193
Fe (mg L ⁻¹)	0,55	0,68	0,70	0,78	0,85	0,95	1,02	1,02	1,12	0,85±0,19
Mn (mg L ⁻¹)	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03± 0,01
Ca ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	0,74	0,75	0,90	1,06	1,26	1,35	1,40	1,42	1,52	1,16± 0,30
Mg ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	1,32	1,39	1,46	1,61	2,23	2,49	2,18	2,34	2,44	1,94± 0,48
CT (NMP 100 mL ⁻¹)	23	3	3	9	43	3	93	3	3	20,33± 30

Fonte: Arquivos do Pesquisador

Nota: CE - Condutividade elétrica; SS - sólidos suspensos; Fe - ferro total; Mn - Manganês total; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; CT – coliformes totais; e NMP – Número mais provável.

Analisando a Portaria nº 154/2002 (CEARÁ, 2002), o valor médio da condutividade elétrica foi inferior ao limite de 3,0 dS m⁻¹ proposto para uso agrícola de água residuária. Utilizando o critério proposto por Capra e Scicolone (1998), o valor médio da condutividade elétrica encontra-se dentro da faixa limite de 1,0 a 4,5 dS m⁻¹, indicando risco moderado para obstrução de gotejadores.

Os sólidos suspensos e dissolvidos apresentaram teores superiores a 100 mg L⁻¹ e 2.000 mg L⁻¹, respectivamente, indicando severo risco de obstrução de gotejadores, conforme os critérios propostos por Nakayama et al. (2006). Segundo Moreira e Braga (2009), elevados teores de sólidos dissolvidos indicam o surgimento de líquido proveniente da decomposição de resíduos sólidos.

O teor médio do ferro total encontra-se na faixa de 0,2 a 1,5 mg L⁻¹, tendo risco de obstrução de gotejadores classificado como moderado, em função da formação de precipitados (NAKAYAMA; BOMAN; PITTS, 2006).

Para o manganês total a concentração média foi inferior ao valor de 0,1 mg L⁻¹ que classifica o risco de obstrução de gotejadores como baixo (NAKAYAMA; BOMAN; PITTS, 2006).

Os valores médios de cálcio e magnésio foram inferiores aos valores limites de 12,5 mmol_c L⁻¹ e de 2,0 mmol_c L⁻¹, indicando baixo risco de obstrução de gotejadores, conforme os critérios estabelecidos por Capra e Scicolone (1998).

Com relação ao risco de obstrução ocasionado pela população bacteriana, o mesmo foi classificado como baixo, conforme proposto por Nakayama; Boman & Pitts (2006).

6 CONCLUSÕES

1) Os valores de QR e RQR indicaram maior obstrução dos gotejadores em função do aumento da vazão dos gotejadores para os emissores não-compensante e ficou comprovado danos causados na membrana de gotejadores autocompensão.

2) pelos parâmetros avaliados desse trabalho, o gotejador G1 (não autocompensante) foi o mais susceptível à obstrução, enquanto os gotejadores G2, G3 e G4 (autocompensantes) foram mais resistentes ao entupimento em relação à aplicação de percolado de aterro sanitário diluído.

3) Houve diferença estatística dos níveis de obstrução do gotejador G1 em relação aos demais, indicando menor suscetibilidade ao entupimento dos gotejadores G2, G3 e G4;

4) No percolado diluído, os atributos físico-químicos que mais interferiram no processo de obstrução foram os sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, pH, condutividade elétrica e ferro total;

5) A bioincrustação resultante da interação entre os atributos físico-químicos e biológicos do percolado ocasionou entupimento parcial dos gotejadores e, conseqüentemente, redução no desempenho hidráulico das unidades gotejadoras;

6) O percolado de aterro sanitário diluído apresentou risco de obstrução de gotejadores classificado como severo para os sólidos suspensos e dissolvidos, no entanto, moderado para o pH, condutividade elétrica e ferro total.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 9261**: equipamentos de irrigação agrícola: emissores e tubos emissores: especificações e métodos de ensaio. São Paulo, 2006. 17 p.

BATISTA, R. O. et al. Alteração na vazão de gotejadores tipo fita utilizados na aplicação de água residuária da despolpa de frutos do cafeeiro. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 2, p. 69-73, 2005.

BATISTA, R. O. et al. Suscetibilidade ao entupimento de gotejadores mediante a aplicação de esgoto sanitário tratado. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 14, n. 2, p. 81-87, 2006.

BATISTA, R. O. et al. Vazão de gotejadores utilizados na fertirrigação com água residuária de suinocultura. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 18, n. 5, p. 413-418, 2010.

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

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.

CARARO, D. C. et al. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 22, p. 251-257, 2006.

CEARÁ. Portaria nº154, de 22 de Julho de 2002. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. **Diário Oficial do Estado do Ceará**, Fortaleza, 2002. Disponível em: <http://www.semace.ce.gov.br/biblioteca/legislacao/conteudo_legislacao.asp?cd=95>. Acesso em: 28 dez. 2013. DOE - 01.10.2002

CELERE, M. S. et al. Metais presentes no chorume coletado no aterro sanitário de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, e sua relevância para saúde pública. **Caderno de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 939-947, 2007.

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.

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

MATOS, A. T. et al. Produtividade e composição química do capim-tifton 85 submetido a diferentes taxas de aplicação do percolado de resíduo sólido urbano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n.1, p. 188-200, 2013.

MEDEIROS, P. R. F. et al. Dinâmica do entupimento de gotejadores em função da aplicação de carbonato de potássio. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 288-297, 2008.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. Anomalias de cargabilidade em aterro de resíduos sólidos domiciliares. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 55-62, 2009.

NAKAYAMA, F. S.; BOMAN, B. J.; PITTS, D. Maintenance. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. (Ed.). **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.

RAVINA, I. et al. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimer wastewater. **Irrigation Science**, New York, v. 13, p. 129-139, 1992.

RESENDE, S. R.; COELHO, D. R.; PIEDADE, S. M. S. Suscetibilidade de gotejadores ao entupimento de causa biológica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 368-375, 2000.

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

SANTOS, M. C. L.; DIAS, S. L. F. G. **Resíduos sólidos urbanos e seus impactos sócioambientais**. São Paulo: IEE-USP, 2012. 80 p.

SETIYANTO, H. et al. Comparative study on leachate in old and new municipal solid waste landfills at Bandung-Indonesia: multielement minerals and other analysis. **European Journal of Scientific Research**, New York, v. 79, p. 159-165, 2012.

SILVA, D. F. et al. Disponibilidade de sódio em solo com capim tifton e aplicação de percolado de resíduo sólido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 10, p. 1094-1100, 2010.

SILVA, K. B. et al. Desempenho de gotejadores operando com efluente da castanha de caju sob distintas pressões de serviço. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 3, p. 339-346, 2013.