

Remoção de contaminantes do esgoto sanitário em sistemas alagados construídos cultivados com *Mentha aquatica*

Removal of sewage contaminants in constructed wetlands systems cultivated with Mentha aquatica

Fabiana Ferreira Avelar¹ , Antonio Teixeira de Matos^{2*} , Mateus Pimentel de Matos³ 

RESUMO

Neste trabalho, teve-se como objetivo avaliar o desempenho de Sistemas Alagados Construídos de Escoamento Horizontal Subsuperficial (SAC-EHSS) cultivados com *Mentha aquatica*, submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica (TDH), na remoção de matéria orgânica, nutrientes e bactérias do grupo coliformes presentes em esgoto sanitário efluente de tanque séptico. Quatro SACs-EHSS de 24,0 × 1,0 × 0,35 m foram construídos e preenchidos com brita #0, como meio suporte, até a altura de 0,20 m. Em dois SAC-EHSS, foi cultivada a espécie *Mentha aquatica*, permanecendo os outros dois sem vegetação como tratamento controle. O experimento foi realizado em duas etapas: na primeira, de 20 de junho a 24 de agosto de 2011, avaliaram-se os TDH de 6,0 e 4,5 dias; e, na segunda, de 31 de agosto a 09 de novembro de 2011, foram analisados os TDH de 3,0 e 1,5 dias. Para avaliação do desempenho dos sistemas, foram quantificadas as variáveis: demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), concentrações totais de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na), coliformes totais e *Escherichia coli*. As eficiências médias na remoção de DQO variaram entre 71,3 e 91,4% e as de DBO₅, entre 75,3 e 91,0%. As remoções médias de nutrientes foram de 29,5 a 77,2% do N total; de 12,8 a 58,3% do P total; de 20,4 a 63,3% do K total; e de 17,5 a 53,4% do Na total. As reduções na contagem de coliformes totais foram de 1,29 a 3,41 unidades logarítmicas e as de *E. coli*, de 1,13 a 3,46 unidades logarítmicas. Maiores eficiências na remoção de matéria orgânica, nutrientes e bactérias do grupo coliformes foram observadas nos SAC-EHSS cultivados que operaram com maiores TDH.

Palavras-chave: *wetlands* construídos; tratamento de esgoto; matéria orgânica; nutrientes; coliformes.

ABSTRACT

This work was conducted to evaluate the performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands (HSSF-CWs) cultivated with *Mentha aquatica*, subjected to different hydraulic retention times (HRTs), in the removal of organic matter, nutrients and coliform bacteria in sewage effluent from septic tank. Four HSSF-CWs measuring 24.0 × 1.0 × 0.35 m were built and filled with gravel # 0, as a support medium, up to the height of 0.20 m. In two HSSF-CWs, *Mentha aquatica* was cultivated, the other two remained without vegetation, as control treatment. The experiment was conducted in two stages: in the first, from 06/20 to 08/24/2011, HRTs of 6.0 and 4.5 days were evaluated, and in the second stage, from 08/31 to 11/09/2011, HRTs of 3.0 and 1.5 days were evaluated. To evaluate the systems performance, the following variables were quantified: chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD₅), total nitrogen, phosphorus, potassium, sodium, total coliforms and *Escherichia coli*. Average removal efficiencies of COD ranged from 71.3 to 91.4% and of BOD₅ from 75.3 to 91.0%. With respect to nutrients, average removals ranged from 29.5 to 77.2% total N; 12.8 to 58.3% total P; 20.4 to 63.3% total K and 17.5 to 53.4% total Na. Reductions in total coliform counts ranged from 1.29 to 3.41 log units and 1.13 to 3.46 log units in *E. coli*. Improved efficiencies in the removal of organic matter, nutrients and coliform bacteria were observed in cultivated HSSF-CWs that operated at higher HRT.

Keywords: constructed wetlands; sewage treatment; organic matter; nutrients; coliforms.

INTRODUÇÃO

Águas residuárias domésticas e municipais contêm, além de grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes, vários agentes patogênicos

ou potencialmente patogênicos, os quais, dependendo da contagem no meio, representam risco potencial à saúde humana. A presença desses agentes patogênicos deverá ser reduzida no processo de tratamento

¹Universidade Federal de Viçosa - Viçosa (MG), Brasil.

²Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brasil.

³Universidade Federal de Lavras - Lavras (MG), Brasil.

*Autor correspondente: atmatos@desa.ufmg.br

Recebido: 23/04/2013 - Aceito: 08/10/2018 - Reg. ABES: 116019

dessas águas residuárias, visando à sua disposição final em corpos hídricos (VYMAZAL, 2005).

Um dos processos de tratamento de águas residuárias domésticas de potencial uso em pequenas comunidades é o tratamento em sistemas alagados construídos (SAC) ou, como se denomina na literatura internacional, *constructed wetlands*. Os SAC são constituídos por um conjunto de canais com fundo e laterais de baixa permeabilidade, que são preenchidos com algum substrato poroso (areia grossa, brita, cascalho etc.), o qual serve de suporte para o desenvolvimento de biofilme bacteriano e para o crescimento de plantas (KADLEC; WALLACE, 2008). Em SAC utilizados no tratamento de águas residuárias, os principais mecanismos de remoção de poluentes são, segundo Vymazal (2005), Kadlec e Wallace (2008) e Matos e Matos (2017): físicos (sedimentação e filtração), químicos (adsorção e precipitação) e biológicos (degradação microbiana e absorção de nutrientes).

Esses sistemas de tratamento têm sido subdivididos em SAC com escoamento superficial (SAC-ES), SAC com escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS) e SAC com escoamento vertical (SAC-EV). Dentre esses, o SAC-EHSS tem sido o mais estudado, em razão do menor potencial para geração de odores e para atração de mosquitos e ratos e menor custo operacional (KADLEC; WALLACE, 2008).

As macrófitas cultivadas em SAC-EHSS auxiliam na remoção de contaminantes nos seguintes aspectos: absorvem nutrientes; seu sistema radicular disponibiliza grande área superficial para aderência e crescimento de microrganismos, além de proporcionar redução na velocidade de escoamento da água residuária em tratamento, o que promove maior sedimentação e adsorção de poluentes; excretam substâncias que podem ser tóxicas a microrganismos patogênicos; e alteram os ambientes físico e químico na região da rizosfera (MATOS; MATOS, 2017).

A espécie *Mentha aquatica*, conhecida como hortelã da água, é uma planta que pode ser útil na redução de contaminantes presentes em águas residuárias, especialmente microrganismos. Segundo Seidel (1971), essa espécie produz compostos ou antibióticos que podem reduzir alguns patógenos humanos. Segundo Avelar *et al.* (2015), apesar de cultivada em condições de alagamento, em SAC-EHSS, essa espécie vegetal apresentou elevada produtividade de matéria seca, que atingiu $7,5 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, em 70 dias de cultivo, quando submetida a uma taxa de carregamento orgânico (TCO) de $16,0 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ de DBO_5 . Avelar *et al.* (2014) obtiveram eficiente remoção e bom ajuste do modelo de primeira ordem modificado por Brasil *et al.* (2007) para estimativa da contagem de coliformes totais e de *E. coli* em função do tempo de detenção hidráulica (TDH) em SAC-EHSS cultivados com *Mentha aquatica* no tratamento de esgoto sanitário.

Tendo em vista que poucas informações se encontram disponíveis na literatura a respeito do comportamento e da influência do cultivo dessa espécie vegetal em sistemas de tratamento de águas residuárias, objetivou-se, neste trabalho, avaliar o desempenho de SAC-EHSS cultivados com *Mentha aquatica*, submetidos a diferentes tempos de

detenção hidráulica, na remoção de matéria orgânica, nutrientes e bactérias do grupo coliforme do efluente primário de esgoto sanitário.

METODOLOGIA

O trabalho foi conduzido na Área Experimental de Tratamento de Resíduos Urbanos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa (MG).

O experimento foi constituído por quatro SAC-EHSS, cujos leitos foram dispostos em paralelo, nas dimensões de $0,35 \text{ m}$ de altura \times $1,0 \text{ m}$ de largura \times 24 m de comprimento. Os SAC-EHSS foram posicionados sobre o solo e impermeabilizados com geomembrana de policloreto de vinila (PVC), com espessura de $0,50 \text{ mm}$. Como meio suporte, foi utilizada a brita #0 ($D_{60} = 7,0 \text{ mm}$, coeficiente de uniformidade $D_{60}/D_{10}^{-1} = 1,6$ e volume de vazios de $0,48 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$), preenchendo os leitos até a profundidade de $0,20 \text{ m}$, embora o escoamento ocorresse em apenas $0,15 \text{ m}$, para que se dispusesse de uma borda livre, não molhada, de $0,05 \text{ m}$. Como ilustração, na Figura 1, está apresentada uma vista em corte dos SAC-EHSS.

O esgoto sanitário bruto, proveniente do Bairro Acamari e suas adjacências, em Viçosa, foi bombeado para a área experimental, onde recebeu tratamento preliminar (gradeamento, desarenação e passagem por caixa de gordura) e primário (tanque séptico), antes de ser conduzido para caixa de controle do afluente aplicado nos SAC-EHSS. As características físicas, químicas e biológicas do esgoto sanitário afluente aos SAC-EHSS estão apresentadas na Tabela 1.

Mudas da espécie *Mentha aquatica* foram plantadas em dois SAC-EHSS, utilizando-se espaçamento triangular de $0,30 \text{ m}$ entre fileiras e $0,25 \text{ m}$ entre plantas, resultando numa densidade de $11,6 \text{ propágulos.m}^{-2}$. Os outros dois SAC-EHSS permaneceram sem cultivo vegetal.

O trabalho foi realizado em duas etapas. Na primeira, conduzida de 20 de junho a 24 de agosto de 2011, avaliaram-se os tempos de detenção hidráulica (TDH) de 6,0 e 4,5 dias, aplicando-se vazão de $0,39 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ nos SAC-EHSS 1C e 1N e $0,52 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ nos SAC-EHSS 2C e 2N. Na segunda, conduzida de 31 de agosto a 9 de novembro de 2011, avaliaram-se os TDH de 3,0 e 1,5 dias, aplicando-se vazão de $0,77 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ nos SAC-EHSS 3C e 3N e $1,55 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ nos SAC-EHSS 4C e 4N. As letras C e N nas siglas são indicativas, respectivamente, da condição de cultivado e não cultivado.

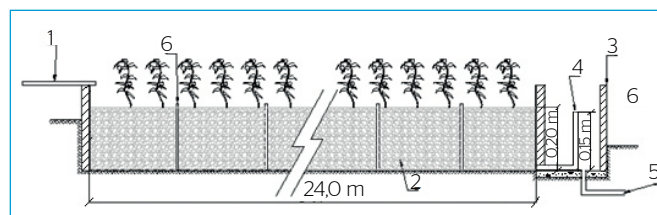


Figura 1 - Corte longitudinal do leito dos Sistemas Alagados Construídos de Escoamento Horizontal Subssuperficial: (1) dispositivo de distribuição do afluente; (2) meio suporte; (3) caixa de coleta; (4) dispositivo de descarga e controle de nível; (5) rede de esgotamento do efluente; (6) pontos internos de coleta de amostra da água residuária em tratamento.

Em ambas as etapas, as duas semanas iniciais foram consideradas período para estabilidade operacional do sistema, sendo monitoradas apenas as vazões afluentes, não sendo realizada, portanto, nenhuma amostragem de água residuária. Torna-se importante ressaltar, no entanto, que os SAC-EHSS, construídos em 2004, estiveram em operação desde essa data, com apenas algumas interrupções para manutenção e necessário replantio da vegetação, o que condicionou o sistema a apresentar condição de plena maturidade biológica por ocasião de sua utilização neste experimento.

A vazão aplicada em cada SAC-EHSS foi controlada, diariamente, por meio de aferição manual (uso de cronômetro e proveta), e os valores de TCO, em cada SAC-EHSS, nas duas etapas experimentais, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 - Características físicas, químicas e biológicas médias do esgoto sanitário afluente aos Sistemas Alagados Construídos de Escoamento Horizontal Subsuperficial, obtidos com base na análise de seis amostras.

Características	Valores
pH	7,2 ± 0,1
Condutividade elétrica (CE)	750,3 ± 61,6 (µS.cm ⁻¹)
Turbidez	169,8 ± 82,8 (UNT)
Demanda química de oxigênio (DQO)	416,1 ± 87,3 (mg.L ⁻¹)
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO ₅)	248,3 ± 104,4 (mg.L ⁻¹)
Nitrogênio (N) total	45,5 ± 8,5 (mg.L ⁻¹)
Fósforo (P) total	5,5 ± 2,1 (mg.L ⁻¹)
Potássio (K) total	12,3 ± 1,6 (mg.L ⁻¹)
Sódio (Na) total	59,0 ± 8,5 (mg.L ⁻¹)
Coliformes totais	1,1 × 10 ⁷ ± 0,7 × 10 ⁷ (NMP:100 mL ⁻¹)
<i>Escherichia coli</i>	3,3 × 10 ⁶ ± 1,9 × 10 ⁶ (NMP:100 mL ⁻¹)

UNT: unidades nefelométricas de turbidez; NMP: número mais provável.

Tabela 2 - Valores nominais de tempos de detenção hidráulica, vazão afluente e taxas de carregamento orgânico médias, expressa em termos de demanda bioquímica de oxigênio, aplicados em cada Sistema Alagado Construído de Escoamento Horizontal Subsuperficial.

Tratamentos	TDH (dias)	Vazão (m ³ .d ⁻¹)	TCO (g.m ² .d ⁻¹)
SAC-EHSS 1C	6,0	0,39	4,04
SAC-EHSS 1N	6,0	0,39	4,04
SAC-EHSS 2C	4,5	0,52	5,38
SAC-EHSS 2N	4,5	0,52	5,38
SAC-EHSS 3C	3,0	0,77	7,97
SAC-EHSS 3N	3,0	0,77	7,97
SAC-EHSS 4C	1,5	1,55	16,04
SAC-EHSS 4N	1,5	1,55	16,04

TDH: tempos de detenção hidráulica; TCO: taxas de carregamento orgânico médias; SAC-EHSS: Sistemas Alagados Construídos de Escoamento Horizontal Subsuperficial; as letras C e N nas siglas são indicativas, respectivamente, das condições de cultivado e não cultivado.

Para avaliação do desempenho dos sistemas, foram feitas seis amostragens pontuais durante cada fase experimental, realizando-se análises em amostras afluentes e efluentes, sendo determinadas as seguintes variáveis: demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), nitrogênio (N) total, fósforo (P) total, potássio (K) total e sódio (Na) total, segundo recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005); contagem de coliformes totais e *Escherichia coli*, utilizando-se a técnica do substrato cromogênico-fluorogênico-hidrolizável, utilizando o meio de cultura Colilert (IDEXX Quanti-Tray™). As análises foram realizadas no Laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

No período de operação do sistema de tratamento, foi quantificada a evaporação, nos SAC-EHSS não cultivados, e a evapotranspiração, nos SAC-EHSS cultivados, visando-se obter o valor real de redução mássica nas variáveis analisadas e, com isso, efetuar a devida compensação na concentração das variáveis analisadas, de acordo com a vazão perdida por evaporação ou evapotranspiração em cada SAC-EHSS.

A análise estatística foi realizada utilizando-se o programa estatístico SAEG[®] (RIBEIRO JR., 2001). As análises de variância foram realizadas utilizando-se o teste F, sendo as eficiências médias dos tratamentos comparadas ao se aplicar o teste Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de remoção de matéria orgânica, nutrientes, coliformes totais e *E. coli* para as respectivas combinações dos efeitos do TDH e da presença ou não de vegetação estão apresentados na Tabela 3.

As eficiências médias de remoção de matéria orgânica, no que se refere à DQO, variaram de 71,3 (obtida no SAC-EHSS 2N) a 91,4% (obtida no SAC-EHSS 1C) e, no que se refere à DBO₅, de 75,3 (obtida no SAC-EHSS 2N) a 91,0% (obtida no SAC-EHSS 3C), ocorrendo, para ambas as variáveis, maiores remoções nos SAC cultivados e operados com os maiores TDH (6,0 e 4,5 dias) e os menores nos não cultivados, quando operados com TDH de 4,5 dias.

Na primeira etapa do experimento (TDH de 6,0 e 4,5 dias), pode ser observado efeito da vegetação na remoção de matéria orgânica. Geralmente, a maior remoção de matéria orgânica em SAC-EHSS cultivados está associada à maior área superficial disponibilizada pelas raízes para a formação do biofilme bacteriano, responsável pela degradação microbiana da matéria orgânica. Além disso, a presença da vegetação aumenta a disponibilidade de oxigênio nos SAC-EHSS, favorecendo processos aeróbios de degradação.

No entanto, como as diferenças de remoção ocorreram apenas na primeira etapa do experimento, acredita-se que os mais baixos valores de TDH possam estar relacionados ao tempo de contato insuficiente da água residuária com o biofilme bacteriano. Outra possível explicação seria a de que, numa época mais fria (temperatura média do ar de 16,6°C), como a ocorrente na primeira etapa experimental, o efeito da vegetação pode estar associado à promoção de menores oscilações térmicas nos sistemas, propiciando o melhor desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela degradação. Allen *et al.* (2002) observaram expressiva diminuição na eficiência de remoção de DQO em sistemas não vegetados com a redução da temperatura ambiente, o que não ocorreu nos sistemas vegetados. O efeito isolante proporcionado pela presença da massa vegetal é fator importante para se minimizar a amplitude térmica na massa de água residuária em tratamento.

O efeito do TDH na remoção de matéria orgânica foi bastante diversificado entre os SAC-EHSS. As eficiências na remoção de DBO₅ não foram influenciadas pelo TDH, diferentemente do que foi observado em relação à remoção de DQO. Nos SAC-EHSS cultivados, maiores eficiências na remoção de DQO foram obtidas nos sistemas operados sob maiores TDH, fato este já observado por outros autores (KADLEC; WALLACE, 2008; MATOS *et al.*, 2010), visto que o decaimento da maioria dos poluentes em SAC,

até mesmo da matéria orgânica, se aproxima do modelo de primeira ordem, no qual, quanto maior o TDH, menor a concentração final do poluente no efluente, portanto, maior é a eficiência do sistema. Nos SAC-EHSS não cultivados, ocorreu tendência contrária, ou seja, maiores eficiências de remoção foram obtidas nos sistemas que operaram sob menores TDH. Acredita-se que essa diferença de comportamento se deva à mais vagarosa estabilização do sistema não cultivado, após terem sido efetuadas alterações nas suas condições operacionais.

Segundo von Sperling (2005), a eficiência de remoção de DBO em SAC-EHSS está entre 80 e 90%, valores semelhantes aos obtidos na maioria dos SAC-EHSS avaliados neste trabalho. O cultivo da espécie *Mentha aquatica* em SAC-EHSS apresentou desempenho ligeiramente superior na remoção de matéria orgânica do que quando cultivada a taboa (*Typha sp.*) nesses sistemas, como pode ser verificado no trabalho de Brasil *et al.* (2005), também desenvolvido em Viçosa, no qual se verificou remoção média de 86% na retirada de DQO e 81% na de DBO₅. O desenvolvimento de sistema radicular mais volumoso, proporcionando mais eficiente interceptação dos sólidos, pode ser a principal razão para isso.

Em relação à retirada de nutrientes, foram obtidas eficiências de remoção de nitrogênio 22,3% maiores, em média, nos SAC-EHSS cultivados que nos SAC-EHSS sem cultivo vegetal. Esse resultado

Tabela 3 - Valores médios de remoção (%) de demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio, fósforo, potássio, sódio, coliformes totais e *E. coli* para as respectivas combinações de tempos de detenção hidráulica e presença ou ausência de vegetação nos Sistemas Alagados Construídos de Escoamento Horizontal Subsuperficial.

Variável		TDH (dias)			
		6,0	4,5	3,0	1,5
DQO (%)	Cultivado	91,4 A a	87,0 AB a	90,1 AB a	81,7 B a
	Não cultivado	72,3 B b	71,3 B b	89,2 A a	80,8 AB a
DBO ₅ (%)	Cultivado	90,0 A a	87,8 A a	91,0 A a	83,4 A a
	Não cultivado	80,1 A b	75,3 A b	88,2 A a	77,1 A a
N total (%)	Cultivado	77,2 A a	72,8 A a	70,3 A a	51,9 B a
	Não cultivado	55,6 A b	53,4 A b	44,4 A b	29,5 B b
P total (%)	Cultivado	57,2 A a	58,3 A a	53,0 A a	30,0 A a
	Não cultivado	12,8 A b	21,5 A a	36,9 A a	13,8 A a
K total (%)	Cultivado	63,3 A a	49,5 A a	62,0 A a	52,3 A a
	Não cultivado	25,0 A b	20,4 A b	25,5 A b	28,6 A b
Na total (%)	Cultivado	51,4 AB a	40,0 C a	53,4 A a	42,9 BC a
	Não cultivado	24,1 A b	17,5 A b	25,5 A b	26,4 A b
Coliformes totais	Cultivado	3,4 A a	3,1 A a	1,7 B a	1,3 B a
	Não cultivado	2,1 A b	2,2 A b	1,6 B a	1,3 B a
<i>E. coli</i>	Cultivado	3,5 A a	3,1 A a	1,8 B a	1,3 B a
	Não cultivado	2,2 A b	2,2 A b	1,4 B a	1,1 B a

TDH: tempo de detenção hidráulica teórico; DQO: demanda química de oxigênio; DBO₅: demanda bioquímica de oxigênio; N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; Na: sódio. Médias seguidas de mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula, na coluna, não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

pode ser justificado pela absorção desse nutriente pelas plantas e a adição de oxigênio, proporcionadas por estas ao meio, possibilitando o desenvolvimento de uma comunidade microbiana mais ativa e diversificada próxima à rizosfera. A presença de regiões aeróbias vizinhas às anóxicas e anaeróbias é essencial para que se proporcionem condições para a remoção de parte do nitrogênio aportado ao sistema, por meio do processo de nitrificação/desnitrificação. Segundo Mander *et al.* (2004), a maior parte da remoção de nitrogênio em SAC-EHSS se dá por processo de nitrificação e desnitrificação, sendo as bactérias nitrificantes e desnitrificantes as responsáveis por essas transformações.

Nos SAC-EHSS que operaram com maior TDH, houve maior remoção de nitrogênio do que nos sistemas que operaram com TDH de 1,5 dia. Isto é, os SAC-EHSS que apresentaram maiores eficiências na remoção de nitrogênio foram os que tiveram menor aporte desse nutriente ao sistema, indicando que a eficiência de remoção pode estar inversamente relacionada às cargas aplicadas, tal como já observado por Fia *et al.* (2010). Em vista disso, torna-se importante ressaltar que cada espécie vegetal e microbiana apresenta capacidade limitada de absorção de nutrientes, a qual exerce forte influência na eficiência de remoção de nutrientes, principalmente nos sistemas cultivados. Assim, atingindo-se a capacidade máxima de absorção, o aumento no aporte de nutrientes não aumentará, proporcionalmente, a absorção destes, reduzindo-se, portanto, a eficiência de sua remoção da água residuária em tratamento.

As eficiências de remoção obtidas de nutrientes/poluentes, neste trabalho, podem ser consideradas satisfatórias, pois, segundo Vymazal (2007), a retirada de nitrogênio total em SAC-EHSS varia entre 40 e 50%. A eficiência na remoção de nitrogênio obtida por Fia *et al.* (2010) em SAC-EHSS cultivados com azevém (*Lolium multiflorum*), no tratamento da água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro, submetida à taxa de aplicação superficial de 29,4 kg.ha⁻¹.d⁻¹ de N e TDH de 1,8 dia, foi de 9,5%. As eficiências obtidas no presente trabalho, considerando-se os SAC-EHSS que operaram com TDH de 1,5 dia e mesma taxa de aplicação superficial de nitrogênio (29,4 kg.ha⁻¹.d⁻¹) que a aplicada por Fia *et al.* (2010), foram significativamente maiores.

As eficiências médias de remoção de fósforo total nos SAC-EHSS variaram de 12,8 a 58,3%, com as taxas de aplicação superficial desse nutriente variando de 0,9 a 3,6 kg.ha⁻¹.d⁻¹. Os TDH avaliados não apresentaram efeito significativo sobre a remoção, indicando que a carga de fósforo aplicada aos sistemas não influenciou na sua retirada. Resultado semelhante foi obtido por Prata *et al.* (2013), em SAC-EHSS cultivados com lírio amarelo, cujas taxas de aplicação superficial variaram de 2,2 a 12,5 kg.ha⁻¹.d⁻¹ de P, e a eficiência de remoção desse nutriente/polvente variou de 27,9 a 42,3%. Tal fato poderia ser um indicativo de que a quantidade de fósforo aportada

aos SAC-EHSS submetidos a maiores TDH foi superior à capacidade máxima de sua remoção.

Na maioria dos SAC-EHSS avaliados, não houve diferença significativa na eficiência de remoção de fósforo total entre sistemas cultivados e não cultivados, comportamento semelhante ao observado por outros autores (IAMCHATURAPATR; YI; RHEE, 2007; MATOS *et al.*, 2010). Sugere-se, assim, que grande parte da remoção desse nutriente tenha ocorrido em razão do acúmulo de fósforo orgânico no meio suporte, por adsorção e/ou precipitação e também devido à sua imobilização pelos microrganismos.

Lee *et al.* (2004), ao utilizarem SAC-EHSS no tratamento de águas residuárias da suinocultura, concluíram que 97,3% da remoção do fósforo ocorreu por mecanismos puramente físicos, 2,1%, por microbiológicos e apenas 0,3%, por extração pelas plantas (*Eichhornia crassipes*). No presente trabalho, apenas nos SAC-EHSS que operaram com TDH de 6,0 dias, observou-se efeito positivo da vegetação na remoção de fósforo. Rossmann *et al.* (2012) também observaram esse efeito, obtendo eficiência 11,7% maior em SAC-EHSS cultivado com azevém no tratamento da água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro, quando comparado ao SAC-EHSS sem cultivo vegetal.

Para Vymazal (2007), a eficiência na remoção de fósforo em todos os tipos de SAC pode ser considerada baixa, a menos que substratos especiais com elevada capacidade de adsorção sejam utilizados como meio suporte. Segundo von Sperling (2005), a remoção de fósforo em SAC usados no tratamento de esgoto doméstico é inferior a 35%. Portanto, com base no que está reportado na literatura, o desempenho dos SAC-EHSS cultivados com *Mentha aquatica* pode ser considerado satisfatório no que se refere à eficiência na remoção de fósforo.

A retirada média de nitrogênio e fósforo, considerando-se a parte aérea colhida das plantas, correspondeu a 133,0 kg.ha⁻¹ de N e 13,3 kg.ha⁻¹ de P em 70 dias de cultivo (665 kg.ha⁻¹.ano⁻¹ de N e 66,5 kg.ha⁻¹.ano⁻¹ de P), o que representa retirada de 13,55 e 6,34%, respectivamente, do que foi aportado desses nutrientes ao sistema.

As remoções médias de potássio variaram de 20,4 a 63,3%, com aplicação de taxas de carregamento entre 2,0 e 7,9 kg.ha⁻¹.d⁻¹ de K, enquanto as remoções médias de sódio variaram de 17,5 a 53,4%, com aplicação de taxas de carregamento entre 9,6 e 38,1 kg.ha⁻¹.d⁻¹ de Na. As remoções de potássio e sódio em SAC-EHSS são, em geral, muito baixas, já que esses cátions apresentam grande solubilidade na água residuária e pequena associação com o material orgânico, o que os tornam pouco retidos no substrato.

Brasil *et al.* (2005) obtiveram eficiências médias entre 35 (TDH de 1,9 dia) e 52% (TDH de 3,9 dias) na remoção de potássio de esgoto sanitário, aplicando-se taxas de carregamento que variaram de 2 a 11 kg.ha⁻¹.d⁻¹ de K. A remoção de sódio obtida por esses mesmos autores foi de 4 e 7%

nos TDH de 1,9 e 3,9 dias, respectivamente. Matos, Freitas e Lo Monaco (2010) obtiveram remoção de 29, 46 e 34% de potássio e 18, 25 e 18% de sódio em SAC-EHSS cultivados com taboa, *alternanthera* e capim Tifton 85, respectivamente, tratando água residuária da suinocultura, enquanto Fia *et al.* (2017), tratando a mesma água residuária, obteve retiradas de 15 a 27% de potássio e de 2 a 24% de sódio, com TDH variando de 3,2 a 12 dias. Com esses resultados, pôde-se inferir que a utilização de *Mentha aquatica* em SAC-EHSS tende a ser mais vantajosa que outras espécies vegetais em relação à remoção desses cátions.

Constatou-se efeito positivo da presença da vegetação, embora não tenha havido implicação significativa do TDH, na remoção de potássio. De maneira semelhante ao observado neste trabalho, Rossmann *et al.* (2012) também observaram maior remoção de potássio em SAC-EHSS cultivados do que em não cultivados. A remoção do sódio foi, em média, 23,5% menor nos SAC-EHSS sem cultivo vegetal, em comparação com os cultivados, indicando que a absorção pelas plantas é um importante mecanismo de remoção desse elemento químico de águas residuárias. Matos, Abrahão e Lo Monaco (2012) também observaram tendência de SAC-EHSS cultivados apresentarem melhor desempenho na remoção de sódio que os não cultivados.

O relativamente bom desempenho geral da *Mentha aquatica* na remoção de nutrientes deve-se ao fato de ser essa espécie vegetal exigente em fertilidade do meio, conforme informado por Brown *et al.* (2003), podendo ser considerada boa opção de cultivo para diminuição do estado trófico das águas.

Pode ser observado, pelos resultados apresentados na Tabela 3, que maiores remoções de coliformes totais e *E. coli* foram obtidas nos SAC-EHSS operados com maiores TDH, por ser o TDH um dos fatores, segundo Kadlec e Wallace (2008), que mais influenciam nessa remoção.

Nos SAC-EHSS que operaram com TDH de 6,0 e 4,5 dias, observou-se que o cultivo da espécie *Mentha aquatica* proporcionou aumento na eficiência de remoção de coliformes totais e *E. coli*. Alguns trabalhos da literatura também relataram maiores eficiências na remoção desses microrganismos em sistemas cultivados. No entanto, os autores não observaram diferenças significativas entre essas duas espécies vegetais.

Decamp, Warren e Sanchez *et al.* (1999) também encontraram maior remoção de *E. coli* em SAC-EHSS cultivados com *Phragmites australis* (2,6 unidades logarítmicas) do que em sistemas sem vegetação (1,4 unidade logarítmica). Hench *et al.* (2003), em SAC utilizados no tratamento de águas residuárias domésticas, monitorados durante 2 anos, obtiveram remoções de *E. coli* de 2,3 e 2,8 unidades logarítmicas, respectivamente, em sistemas não vegetados e vegetados (combinação de *Typha latifolia*, *Juncus effusus* e *Scirpus validus*). Segundo Kansime e van Bruggen (2001), as raízes das plantas aumentam a área superficial disponível no sistema, importante para que algumas bactérias fiquem aderidas, favorecendo sua remoção.

Outro importante facilitador da remoção desses microrganismos em sistemas cultivados é a maior disponibilidade de oxigênio dissolvido na rizosfera. Além disso, os exsudatos liberados pela espécie *Mentha aquatica* podem apresentar atividade bactericida, o que estaria favorecendo também a remoção desses microrganismos. Estudo de Vicent *et al.* (1994), citado por Stottmeister *et al.* (2003), comprovaram que essa espécie, quando cultivada *in vitro*, apresentou atividade bactericida, inibindo o crescimento de *E. coli*.

Segundo Kadlec e Wallace (2008), a remoção de bactérias fecais em efluentes tratados em SAC-EHSS está em torno de duas unidades logarítmicas. Em trabalho desenvolvido por Khatiwada e Polprasert (1999), em SAC-EHSS cultivados com *Typha angustifolia* e operando com TDH de 1,5; 3,0; 5,0; e 6,0 dias, monitorados durante 2 meses, as remoções de coliformes termotolerantes foram 0,8; 1,7; 2,3; e 2,4 unidades logarítmicas, respectivamente. Matos *et al.* (2009) obtiveram remoção de coliformes totais de 1,7; 1,5; e 1,9 unidades logarítmicas e de 1,7; 2,2; e 2,2 unidades logarítmicas de *E. coli* em SAC-EHSS cultivados com taboa, *alternanthera* e tifton-85, respectivamente, utilizados no tratamento de água residuária da suinocultura, com TDH de 4,8 dias. Zurita, De Anda e Belmont (2009), em SAC-EHSS cultivados com a espécie ornamental *Zantedeschia aethiopica*, obtiveram remoção de 1,2 unidades logarítmicas de coliformes totais com TDH de 4 dias, após 3 meses de sua estabilização biológica. Portanto, constata-se maior remoção de indicadores patogênicos em SAC-EHSS cultivados com *Mentha aquatica*, quando comparados a outras espécies vegetais reportadas na literatura, em sistemas submetidos a TDH semelhante.

CONCLUSÃO

Os SAC-EHSS cultivados com *Mentha aquatica* proporcionaram, no tratamento do efluente primário de esgoto sanitário, maior remoção de DQO, DBO₅, N total, P total, K total, Na total e contagens de coliformes totais e *E. coli* que os sistemas sem cultivo desse vegetal quando operados em sistemas submetidos aos maiores TDH. Nos menores TDH, essa espécie vegetal não proporcionou diferenças nas remoções avaliadas, à exceção daquelas referentes a N total, K total e Na total.

O menor TDH (1,5 dia), equivalente à maior taxa de carregamento orgânico (16,04 g.m⁻².d⁻¹ de DBO₅) nos sistemas avaliados, foi a que proporcionou menores remoções de DQO, N total, Na total, coliformes totais e *E. coli* nos SAC-EHSS cultivados, enquanto, nos sistemas não cultivados, essa menor eficiência foi observada para a remoção de N total, coliformes totais e *E. coli*.

A remoção de coliformes totais e *E. coli* em SAC-EHSS cultivados com *Mentha aquatica* foi potencializada com a redução na carga aplicada ou com o aumento no TDH.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, W.C.; HOOK, P.B.; BIEDERMAN, J.A.; STEIN, O.R. (2002) Temperature and wetland plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation. *Journal of Environmental Quality*, v. 31, n. 3, p. 1010-1016. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1010>
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). (2005) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21. ed. Washington, D.C.: APHA. 1268 p.
- AVELAR, F.F.; MATOS, A.T.; LEITE JÚNIOR, A.R.; PORTES, M.R.; GUALHANO, D.S. (2015) Desempenho agronômico de *Mentha aquatica* cultivada em sistemas alagados construídos, sob diferentes taxas de aplicação orgânica. *Engenharia Agrícola*, v. 35, n. 2, p. 322-330. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n2p322-330/2015>
- AVELAR, F.F.; MATOS, A.T.; MATOS, M.P.; BORGES, A.C. (2014) Coliform bacteria removal from sewage in constructed wetlands planted with *Mentha aquatica*. *Environmental Technology*, v. 35, n. 16, p. 2095-2103. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.893025>
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T.; SILVA, C.M.; CECON, P.R.; SOARES, A.A. (2007) Modelling of pollution removal in constructed wetlands with horizontal subsurface flow. *Agricultural Engineering Research*, v. 13, n. 2, p. 48-56.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T.; SOARES, A.A.; FERREIRA, P.A. (2005) Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos, utilizados no tratamento de esgoto doméstico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, p. 133-137.
- BROWN, B.; HART, J.M.; WESCOTT, M.P.; CHRISTENSEN, N.W. (2003) The critical role of nutrient management in mint production. *Better Crops*, v. 87, n. 4, p. 9-11.
- DECAMP, O.; WARREN, A.; SANCHEZ, R. (1999) The role of ciliated protozoa in subsurface flow wetlands and their potential as bioindicators. *Water Science and Technology*, v. 40, n. 3, p. 91-98. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00444-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00444-8)
- FIA, F.R.L.; MATOS, A.T.; FIA, R.; BORGES, A.C.; CECON, P.R. (2017) Efeito da vegetação em sistemas alagados construídos para tratar águas residuárias da suinocultura. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 2, p. 303-311. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016123972>
- FIA, R.; MATOS, A.T.; LAMBERT, T.F.; FIA, F.R.L.; MATOS, M.P. (2010) Tratamento das águas do processamento dos frutos do cafeeiro em filtro anaeróbico seguido por sistema alagado construído: II - Remoção de nutrientes e compostos fenólicos. *Engenharia Agrícola*, v. 30, n. 6, p. 1203-1213. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162010000600020>
- HENCH, K.R.; BISSONNETTE, G.K.; SEXSTONE, A.J.; COLEMAN, J.G.; GARBUTT, K.; SKOUSEN, J.G. (2003) Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands. *Water Research*, v. 37, n. 4, p. 921-927. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00377-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00377-9)
- IAMCHATURAPATR, J.; YI, S.W.; RHEE, J.S. (2007) Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland. *Ecological Engineering*, v. 29, n. 3, p. 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.010>
- KADLEC, R.H.; WALLACE, S.D. (2008) *Treatment Wetlands*. 2. ed. Flórida: CRC Press. 1016 p.
- KANSIIME, F.; VAN BRUGGEN, J.J. (2001) Distribution and retention of faecal coliforms in the Nakivubo wetland in Kampala, Uganda. *Water Science and Technology*, v. 44, n. 11-12, p. 199-206.
- KHATIWADA, N.R.; POLPRASERT, C. (1999) Kinetics of fecal coliform removal in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, v. 40, n. 3, p. 109-116. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00446-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00446-1)
- LEE, C.Y.; LEE, C.C.; LEE, F.Y.; TSENG, S.K.; LIAO, C.J. (2004) Performance of subsurface flow constructed wetland taking pretreated swine effluent under heavy loads. *Bioresource Technology*, v. 92, n. 2, p. 173-179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2003.08.012>
- MANDER, U.; LÖHMUS, K.; KUUSEMETS, V.; TEITER, S.; NURK, K. (2004) Dynamics of nitrogen and phosphorus budgets in a horizontal subsurface flow constructed wetland. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS, 6; INTERNATIONAL CONFERENCE ON WETLAND SYSTEMS FOR WATER POLLUTION CONTROL, 9, 2004, Avignon. *Anais... Avignon: IWA/Astee*. CD-ROM.
- MATOS, A.T.; ABRAHÃO, S.S.; BORGES, A.C.; MATOS, M.P. (2010) Influência da taxa de carga orgânica no desempenho de sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 1, p. 83-92. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522010000100010>
- MATOS, A.T.; ABRAHÃO, S.S.; LO MONACO, P.A.V. (2012) Eficiência de sistemas alagados construídos na remoção de poluentes de água residuária de indústria de laticínios. *Engenharia Agrícola*, v. 32, n. 6, p. 1144-1155. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000600016>
- MATOS, A.T.; FREITAS, W.S.; FIA, R.; MATOS, M.P. (2009) Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura visando seu reuso. *Engenharia na Agricultura*, v. 17, n. 5, p. 383-391.
- MATOS, A.T.; FREITAS, W.S.; LO MONACO, P.A.V. (2010) Eficiência de sistemas alagados construídos na remoção de poluentes de águas residuárias da suinocultura. *Ambiente e Água*, v. 5, n. 2, p. 119-132. 2010b. <http://dx.doi.org/10.4136/1980-993X>
- MATOS, A.T.; MATOS, M.P. (2017) *Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos*. Viçosa: Editora UFV. 357 p.
- PRATA, R.C.C.; MATOS, A.T.; CECON, P.R.; LO MONACO, P.A.V.; PIMENTA, L.A. (2013) Tratamento de esgoto sanitário em sistemas alagados construídos cultivados com lírio-amarelo. *Engenharia Agrícola*, v. 33, n. 6, p. 1144-1155.

RIBEIRO JR., J.I. (2001) *Análises estatísticas no SAEG*. Viçosa: Editora UFV. 301 p.

ROSSMANN, M.; MATOS, A.T.; ABREU, E.C.; SILVA, F.F.; BORGES, A.C. (2012) Performance of constructed wetlands in the treatment of aerated coffee processing wastewater: Removal of nutrients and phenolic compounds. *Ecological Engineering*, v. 49, p. 264-269. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.017>

SEIDEL, K. (1971) Macrophytes as functional elements in the environment of man. *Hidrobiologia*, v. 12, p. 121-130.

STOTTMEISTER, U.; WIEßNER, A.; KUSCHK, P.; KAPPELMEYER, U.; KÄSTNER, M.; BEDERSKI, O.; MÜLLER, R.A.; MOORMANN, H. (2003) Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, v. 22, n. 1-2, p. 93-117. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.010>

VON SPERLING, M. (2005) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: DESA/UFMG. v. 1. 452 p.

VYMAZAL, J. (2005) Removal of Enteric Bacteria in Constructed Treatment Wetlands with Emergent Macrophytes: A Review. *Journal of Environmental Science and Health*, v. 40, n. 6-7, p. 1355-1367. <https://doi.org/10.1081/ESE-200055851>

_____. (2007) Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, v. 380, n. 1-3, p. 48-65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>

ZURITA, F.; DE ANDA, J.; BELMONT, M.A. (2009) Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v. 35, n. 5, p. 861-869. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026>

