

REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E COMPOSTOS FENÓLICOS EM SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (SACESHs) NO TRATAMENTO DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS DO PROCESSAMENTO DOS FRUTOS DO CAFEIEIRO

Ronaldo Fia¹; Antonio T. de Matos²; Fátima A. R. Luiz³; Túlio F. Lambert⁴; Mateus P. de Matos⁴

¹ Engenheiro Agrícola e Ambiental, Pós-Doutorando em Engenharia Agrícola, DEA/UFV, ronaldo.fia@ufv.br.

² Engenheiro Agrícola, Professor Associado do Departamento de Engenharia Agrícola/UFV, atmatos@ufv.br

³ Engenheira Agrícola, Doutoranda em Engenharia Agrícola/UFV, fatima.luz@ufv.br

³ Graduandos em Engenharia Agrícola e Ambiental/UFV, tulioflambert@hotmail.com, mateus.matos@ufv.br

RESUMO: No presente trabalho teve-se como objetivos estudar o desempenho de nove sistemas alagados construídos de escoamento subsuperficial horizontal (SACESHs), em escala piloto (1,5 m de comprimento, 0,5 de largura e 0,40 m de profundidade), cultivados com *Typha* sp. e *Alternanthera phyloxeroides*, no tratamento da água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro (ARC), quando submetidos a diferentes condições experimentais a à aplicação de diferentes cargas orgânicas. Três sistemas receberam ARC sem nenhum pré-tratamento, três receberam ARC com correção de pH e correção nutricional, e os três últimos receberam os efluentes de filtros anaeróbios utilizados no tratamento da ARC que teve o pH e o teor de nutrientes corrigidos. Os resultados mostraram que o aumento nas taxas de carga superficial dos constituintes da ARC no sistema proporcionou decréscimo na eficiência de remoção de matéria orgânica e compostos fenólicos em todos os SACESHs avaliados. Os tempos de residência hidráulica superiores a 100 h proporcionaram em todos os SACESHs maiores eficiências na remoção de DQO e DBO, quando comparado aos tempos de residência hidráulica de aproximadamente 60 horas. Entre os SACESHs, aquele que recebeu a menor carga orgânica proveniente do filtro anaeróbio (1.500 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DQO), apresentou desempenho mais satisfatório no que se refere à remoção de DBO (63%), DQO (85%) e compostos fenólicos (65%). As eficiências obtidas na remoção de matéria orgânica foram semelhantes às encontradas na literatura para tratamento de águas residuárias contendo compostos orgânicos de difícil degradação ou tóxicos aos microrganismos.

Palavras-Chave: Sistemas alagados construídos, água residuária agroindustrial. café, compostos fenólicos, matéria orgânica.

REMOVAL OF ORGANIC MATERIAL AND PHENOLIC COMPOUNDS IN HORIZONTAL SUBSURFACE-FLOW CONSTRUCTED WETLAND SYSTEMS (SACESHs) FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER FROM COFFEE FRUIT PROCESSING

ABSTRACT: The objective of the present study was to evaluate the performance of nine pilot scale (1.5 m long, 0.5 m wide and 0.40 m deep) horizontal subsurface-flow constructed wetland systems (SACESHs) in which were *Typha* sp. and *Alternanthera phyloxeroides* grown for the treatment of wastewater from coffee fruit processing (ARC) when submitted to different experimental conditions with different organic loads. Three of the systems received ARC with no pre-treatment, three received ARC with corrected pH and nutritional levels and the last three received effluents from anaerobic filters used for the treatment of ARC in which pH and nutritional levels were previously corrected. Results showed that increase in the surface loading rate of ARC constituents in the systems caused decreases in the organic material and phenolic compound removal efficiency in all evaluated SACESHs. Hydraulic retention times greater than 100 hours caused all SACESHs to be more efficient for the removal of COD and BOD when compared to hydraulic retention times of approximately 60 hours. Among the SACESHs, that which received a lowest organic loading from the anaerobic filter (1,500 kg ha⁻¹ d⁻¹ of COD) presented the best performance for removal of BOD (63%), COD (85%) and phenolic compounds (65%). Efficiencies obtained for organic material removal were similar to those found in published material for the treatment of wastewaters containing organic composts of difficult degradation or toxic to the microorganisms.

Keywords: Constructed wetland systems, agroindustrial wastewaters, coffee, phenolic compounds, organic material.

INTRODUÇÃO

O nosso país é, atualmente, o maior produtor e exportador de grãos de café e o processamento via úmida dos frutos, diferentemente da produção de grãos via seca, é tendência na busca de qualidade no produto. Assim, a necessidade de estudos que possam considerar o tratamento das grandes quantidades de águas residuárias ricas em materiais orgânicos altamente poluentes geradas por esse processo, se torna imprescindível.

Diversas pesquisas têm focado o tratamento destas águas em sistemas anaeróbios, os quais apresentam como vantagem o fato de requererem menor área (Dinsdale *et al.*, 1996; Luiz, 2007; Bruno & Oliveira, 2008). Entretanto, embora os processos anaeróbios de tratamento apresentem grande remoção de matéria orgânica biodegradável, com relativamente baixos custos, os seus efluentes não têm atendido as exigências da legislação ambiental, requerendo, nesses casos, pós-tratamento. Pesquisas têm demonstrado a eficácia de sistemas alagados construídos no tratamento de águas residuárias brutas e no pós-tratamento efluentes de sistemas anaeróbios (Brasil *et al.*, 2005; Mazzola *et al.*, 2005; Freitas, 2006).

Apesar de terem sido obtidos alguns resultados positivos com a utilização de sistemas alagados cultivados com *Typha* para tratamento de ARC (Fia & Matos, 2002; Brasil *et al.*, 2003), esses autores obtiveram os resultados em sistemas naturais, anteriormente passíveis de utilização para tratamento. Entretanto, de acordo com o que está estabelecido na legislação, o lançamento de águas residuárias em áreas alagadas naturais não constitui tratamento e sim disposição inadequada do resíduo. O tratamento em ambientes alagados só é permitido no caso da construção e uso de sistemas projetados com impermeabilização dos leitos de tratamento, objetivando-se a preservação do ambiente.

Embora sejam encontrados na literatura estudos com sistemas alagados construídos para tratamento de diversos tipos de águas residuárias, ainda são escassos dados com relação à aplicabilidade desse sistema no tratamento da ARC, tornando-se desejável o aprimoramento de tecnologias com vistas à otimização desses sistemas de tratamento.

No presente trabalho, teve-se como objetivos estudar o desempenho de sistemas alagados construídos, cultivados com *Typha* sp. e *Alternanthera philoxeroides*, no tratamento da ARC, quando submetidos a diferentes condições experimentais e à aplicação de diferentes cargas orgânicas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Área de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Para condução do experimento, foram construídos nove sistemas alagados de escoamento subsuperficial horizontal (SACESHs), em escala piloto, que foram constituídos por caixas (0,4 m de altura x 0,5 m de largura x 1,5 m de comprimento) de madeira de pínus, impermeabilizadas por geomembrana de PEAD, posicionadas sobre o solo em declividade de 0,01 m m⁻¹. Como meio suporte, utilizou-se brita nº “zero” (diâmetro D-60 = 7,0 mm e volume de vazios inicial de 0,491 m³ m⁻³). Os SACs foram preenchidos com a brita até a altura de 0,35 m, deixando-se uma borda livre (não saturada) de 0,05 m, já que nível d’água foi mantido em 0,30 m. Em cada SAC, foi plantada, nos primeiros 0,75 m do leito, a espécie alternanthera (*Alternanthera philoxeroides*) e nos últimos 0,75 m a taboa (*Typha* sp.).

A ARC utilizada no experimento foi proveniente da Área de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas da UFV e do Sítio Jatobá, situado a 12 km da cidade de Viçosa. As variações nas principais características da ARC, avaliadas em amostras coletadas durante todo o período experimental, estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios das principais características da ARC bruta utilizada nas três Fases de condução do experimento.

Variáveis	Fases		
	I (42 dias)	II (46 dias)	III (42 dias)
pH	4,0±0,4	3,7±0,2	4,2±0,4
DQO (mg L ⁻¹)	12.241±8.100	20.770±3.034	10.151±2.191
DBO (mg L ⁻¹)	7.475±7.044	10.186±2.350	4.912±1.356
Compostos fenólicos totais (mg L ⁻¹)	75,8±29,4	123,6±34,1	79,5±9,4

Após dois meses de implantação do sistema, iniciou-se a aplicação da ARC, sendo o experimento conduzido em três fases.

Na fase I, considerada a fase de adaptação do sistema à ARC, aplicou-se ARC diluída aos SACESHs. Nesta fase, três SACESHs receberam ARC diluída (SAC₁, SAC₂ e SAC₃), três receberam ARC diluída e com correção de pH (elevação do pH até próximo de 7,0) (SAC^{*}₁, SAC^{*}₂ e SAC^{*}₃); e nos três últimos SACESHs aplicou-se os efluentes de filtros anaeróbios, os quais foram alimentados com ARC diluída e correção de pH (SAC^F₁, SAC^F₂ e SAC^F₃).

Na segunda fase, aumentou-se a carga orgânica aplicada, sendo o sistema conduzido por três vias:

1 – A ARC foi lançada diretamente nos SACESHs, em três concentrações diferentes: 50% v/v, 75% v/v e 100%, sendo os três SACESHs denominados SAC₁, SAC₂ e SAC₃, respectivamente.

2 – A ARC recebeu correção com cal hidratada (Ca(OH)₂) até pH aproximadamente 7,0 e correção nutricional (DBO/N/P = 100/5/1) e foi lançada em três concentrações: 50% v/v, 75% v/v e 100%, sendo os três SACESHs denominados SAC^{*}₁, SAC^{*}₂ e SAC^{*}₃, respectivamente.

3 – A ARC recebeu correção com cal hidratada até pH aproximadamente 7,0 e correção nutricional (DBO/N/P = 100/5/1) e foi aplicada em filtros anaeróbios, descritos por FIA (2008), em três concentrações: 50% v/v, 75% v/v e 100%; sendo os efluentes posteriormente lançados nos SACESHs, respectivamente denominados SAC^F₁, SAC^F₂ e SAC^F₃, como pós-tratamento.

Na fase III, procedeu-se da mesma forma que na fase II, com exceção do tempo de residência hidráulica (TRH) que foi aumentado, aproximadamente, em duas vezes. As principais características operacionais dos SACESHs estão apresentadas na Tabela 2.

O sistema de tratamento foi monitorado por um período de 130 dias, com amostragem semanal do afluente e efluente dos SACESHs, quantificando-se as seguintes variáveis: pH, por potenciometria; DBO, pelo método iodométrico; DQO, pelo método do refluxo aberto (APHA et al., 1998), além da concentração de compostos fenólicos totais (F_T) (Folin & Ciocalteu, 1927).

Tabela 2. Características operacionais dos nove SACESHs.

SACESHs	Variáveis	Fases		
		I	II	III
SAC ₁	TRH (h)	64,1±15,3 ⁽⁴²⁾	58,9±8,9 ⁽⁴²⁾	111,5±20,6 ⁽⁴²⁾
	TCO _A (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	1.523±610 ⁽⁵⁾	4.184±521 ⁽⁵⁾	1.281±328 ⁽⁵⁾
SAC ₂	TRH (h)	59,3±10,9 ⁽⁴²⁾	58,6±11,8 ⁽⁴²⁾	107,4±20,3 ⁽⁴²⁾
	TCO _A (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	1.732±541 ⁽⁵⁾	8.322±1.379 ⁽⁵⁾	2.139±775 ⁽⁵⁾
SAC ₃	TRH (h)	58,0±10,2 ⁽⁴²⁾	57,9±12,1 ⁽⁴²⁾	98,6±19,8 ⁽⁴²⁾
	TCO _A (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	1.668±538 ⁽⁵⁾	13.528±5.763 ⁽⁵⁾	3.083±1.228 ⁽⁵⁾
SAC* ₁	TRH (h)	58,2±10,6 ⁽⁴²⁾	58,1±11,7 ⁽⁴²⁾	110,6±28,3 ⁽⁴²⁾
	TCO _A (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	1.417±645 ⁽⁵⁾	4.401±1.492 ⁽⁵⁾	1.418±335 ⁽⁵⁾
SAC* ₂	TRH (h)	55,3±10,0 ⁽⁴²⁾	59,0±15,8 ⁽⁴²⁾	94,5±22,4 ⁽⁴²⁾
	TCO _A (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	1.810±1.164 ⁽⁵⁾	6.029±1.602 ⁽⁵⁾	2.707±1.089 ⁽⁵⁾
SAC* ₃	TRH (h)	55,1±9,6 ⁽⁴²⁾	63,7±15,9 ⁽⁴²⁾	104,8±31,1 ⁽⁴²⁾
	TCO _A (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	1.633±877 ⁽⁵⁾	10.264±4.516 ⁽⁵⁾	3.476±2.094 ⁽⁵⁾
SAC ^F ₁	TRH (h)	58,7±7,4 ⁽⁴²⁾	54,4±13,7 ⁽⁴²⁾	111,8±27,0 ⁽⁴²⁾
	TCO _A (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	1.058±586 ⁽⁵⁾	3.597±1.165 ⁽⁵⁾	1.507±213 ⁽⁵⁾
SAC ^F ₂	TRH (h)	57,6±5,0 ⁽⁴²⁾	61,0±13,4 ⁽⁴²⁾	126,7±24,1 ⁽⁴²⁾
	TCO _A (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	805±280 ⁽⁵⁾	6.006±1.635 ⁽⁵⁾	2.2579±793 ⁽⁵⁾
SAC ^F ₃	TRH (h)	58,6±9,9 ⁽⁴²⁾	59,5±14,2 ⁽⁴²⁾	114,7±22,5 ⁽⁴²⁾
	TCO _A (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	798±409 ⁽⁵⁾	9.092±4.559 ⁽⁵⁾	3.043±1.076 ⁽⁵⁾

^(a) Entre parênteses o número de amostragens consideradas no cálculo da média.

Q - vazão, TRH - tempo de residência hidráulica, TCO_A - Taxa de carga orgânica tomada com base na área superficial e na concentração da DQO.

Para efeito de análise estatística dos dados do monitoramento, considerou-se um delineamento inteiramente ao acaso com nove SACESHs e 3 fases e com o número de repetições igual ao número de amostragens. Procedeu-se, então, a análise de variância e as médias comparadas utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 10% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os SACESHs operaram, nas fases I, II e III, numa faixa de temperatura considerada psicrófila para os microrganismos. Para as respectivas fases, as temperaturas médias diárias do líquido foram iguais a 17,6; 18,4 e 20,4°C, sendo os extremos mínimos e máximos registrados para o líquido de 13,8 e 24,4°C. Com relação à ocorrência de chuvas, foi registrada, durante a fase experimental, apenas uma precipitação de 15,4 mm ocorrida no centésimo vigésimo primeiro dia após o início da condução do experimento, a qual não foi capaz de influenciar os resultados experimentais.

Na Tabela 3 está apresentada a caracterização do afluente e efluente dos SACESHs, com relação as variáveis pH, DBO e DQO, durante as três fases de operação dos sistemas.

Nos SACESHs, durante as três fases, verificou-se elevação no pH efluente, o que pode estar associado à liberação de alguns cátions de reação básica pela brita utilizada como material suporte. Durante a fase I, os valores de pH efluente dos SAC*s e SAC^Fs oscilaram, mas foram semelhantes aos valores afluentes, e as médias não diferiram entre si ($P < 0,1$). Na fase II, ocorreu redução acentuada nos valores de pH nos SAC*s, devido ao aumento da carga orgânica aplicada. Nos SAC^Fs este efeito somente foi observado para o SAC^F₃, o qual recebeu a maior carga orgânica dentre todos os SAC^Fs. Os valores observados de pH estiveram dentro da faixa na qual são proporcionadas condições ideais para a sobrevivência das bactérias responsáveis pela degradação orgânica, que varia de 4,0 a 9,5 (Von Sperling, 1997), à exceção dos valores obtidos no afluente aos SACs, que mantiveram-se abaixo de 4,0 em parte da fase I e durante a fase II.

Tabela 3. Valores médios e desvio padrão de pH, DQO, DBO e compostos fenólicos totais (F_T) afluente e efluente dos SACESHs, em cada fase operacional.

Variáveis	SACESHs	Fase I		Fase II		Fase III	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
pH	SAC ₁	4,32±0,85	5,99±0,26	3,52±0,12	4,66±0,12	4,47±0,20	4,74±0,19
	SAC ₂	4,44±0,94	5,73±0,14	3,55±0,12	4,34±0,31	4,38±0,43	4,59±0,13
	SAC ₃	4,47±0,79	5,77±0,23	3,56±0,13	4,31±0,48	4,30±0,35	4,36±0,11
	SAC* ₁	6,56±0,37	6,66±0,69	6,24±0,57	6,39±0,65	7,44±0,72	7,83±0,17
	SAC* ₂	6,56±0,36	6,71±0,51	6,53±0,85	6,18±0,32	7,83±0,15	7,39±0,46
	SAC* ₃	6,57±0,29	6,66±0,60	6,26±0,98	6,07±0,28	7,84±0,31	6,93±0,19
	SAC ^F ₁	6,83±0,52	7,21±0,38	6,55±0,38	7,39±0,18	7,67±0,10	7,71±0,26
	SAC ^F ₂	6,92±0,39	7,25±0,31	6,21±0,30	6,95±0,19	7,06±0,09	7,84±0,11
	SAC ^F ₃	6,85±0,52	7,36±0,59	6,08±0,27	6,49±0,51	6,99±0,72	7,50±0,23
DQO (mg L ⁻¹)	SAC ₁	2.275±775	1.105±308	6.837±969	5.592±354	3.539±548	2.746±279
	SAC ₂	2.576±846	1.272±241	11.508±2.246	9.443±1.723	5.615±1.133	4.435±934
	SAC ₃	2.420±967	1.280±326	19.084±8.091	12.466±3.452	7.771±1.590	5.502±2.277
	SAC* ₁	2.161±1.167	1.521±506	6.536±1.290	6.017±1.432	4.182±752	2.343±1.259
	SAC* ₂	2.317±1.184	1.582±482	11.544±2.846	10.221±2.498	6.886±588	5.235±1.394
	SAC* ₃	2.258±1.205	1.572±754	19.566±9.697	17.143±9.093	9.418±1.162	7.040±2.026
	SAC ^F ₁	1.612±831	748±409	5.658±1.093	1.881±398	4.182±752	587±323
	SAC ^F ₂	1.285±394	824±389	9.792±2.162	7.096±3.826	6.886±588	1.786±1.066
	SAC ^F ₃	1.353±768	736±487	16.036±7.333	14.274±10.021	9.072±1.322	5.940±2.789
DBO (mg L ⁻¹)	SAC ₁	905±399	642±190	2.011±825	1.966±1.125	1.698±884	905±561
	SAC ₂	925±337	746±225	3.535±883	2.957±1.784	3.176±2.134	1.879±1.152
	SAC ₃	853±280	661±251	4.441±1.365	1.985±1.244	3.348±1.941	975±604
	SAC* ₁	1.292±474	935±287	3.242±771	2.327±605	2.517±1.241	1.175±993
	SAC* ₂	1.401±590	806±347	4.178±781	3.510±619	3.250±972	3.012±977
	SAC* ₃	1.183±408	966±406	5.874±1.019	3.798±1.553	4.399±1.012	3.583±923
	SAC ^F ₁	1.036±502	473±382	3.184±717	787±303	1.336±1.105	359±283
	SAC ^F ₂	965±300	537±317	4.311±887	3.556±1.744	2.772±874	1.355±1.144
	SAC ^F ₃	722±366	384±283	6.181±1.457	5.247±2.695	4.884±1.103	2.856±2.071
F_T (mg L ⁻¹)	SAC ₁	19,3±8,1	10,0±6,8	51,5±11,2	45,6±5,1	28,0±5,5	36,3±6,0
	SAC ₂	22,9±7,9	14,6±5,4	79,0±13,1	76,5±22,2	47,2±5,3	51,4±5,7
	SAC ₃	19,8±8,3	13,7±6,5	102,4±12,9	99,0±8,0	67,7±8,3	64,4±7,6
	SAC* ₁	14,7±2,2	7,8±5,5	30,1±26,6	18,4±9,2	6,8±4,2	3,6±4,4
	SAC* ₂	13,2±4,5	9,8±4,9	49,4±41,5	33,0±18,3	13,7±6,0	5,9±4,3
	SAC* ₃	12,2±3,8	6,5±4,8	65,0±42,1	40,1±23,6	19,4±8,4	14,5±6,3
	SAC ^F ₁	10,4±3,6	3,3±1,2	13,0±3,4	5,6±0,6	29,1±20,8	9,2±4,2
	SAC ^F ₂	8,7±4,6	4,3±2,5	20,2±2,1	14,1±3,0	45,4±30,8	15,9±7,5
	SAC ^F ₃	7,0±2,9	4,2±2,7	28,3±6,5	23,0±3,2	64,3±44,7	41,4±32,5

Fase I: fase de adaptação em que os SACESHs receberam ARC diluída. Fase II: aumento da carga orgânica aplicada aos SACESHs em três diluições (50, 75 e 100%). Fase III: aumento do TRH em, aproximadamente, duas vezes ao aplicado na Fase II.

Durante a primeira fase, foram obtidas relativamente baixas eficiências na remoção de DQO e DBO, pois os sistemas estavam ainda em fase de adaptação (Tabela 4). Apesar das relativamente baixas eficiências na remoção de matéria orgânica encontradas nesta fase, dentre os SACESHs avaliados, relativamente maiores eficiências de remoção de DBO foram obtidas nos SAC^Fs ($P < 0,1$), acredita-se que, por passar pelos filtros anaeróbios, a ARC lançada nos SAC^Fs apresentava frações orgânicas de mais fácil degradação, com a quebra de fibras celulósicas, ligninas e compostos fenólicos. Além disso, o carreamento de biomassa dos filtros para os SAC^Fs pode ter favorecido a formação do biofilme, que é de extrema importância para remoção da matéria orgânica em sistemas alagados. Dentre os SAC^Fs, o SAC^F₁ foi aquele que apresentou maiores eficiências na remoção de matéria orgânica.

No início da segunda fase, notou-se tendência de queda nas eficiências de remoção de DBO e DQO, exceto para o SAC^F₁, consequência do aumento da carga orgânica aplicada. A maioria dos SACESHs apresentou recuperação da eficiência na remoção de matéria orgânica (fase III), fato atribuído à adaptação do sistema à ARC, ao aumento do TRH e, também, à presença dos nutrientes adicionados à ARC, a partir da fase II.

Vrhovsek *et al.* (1996) obtiveram eficiências de 89 e 92%, respectivamente, na remoção de DBO e DQO, no tratamento de águas residuárias da indústria alimentícia, quando utilizaram sistemas alagados construídos, operando em série, e precedidos por um sedimentador. Nestas avaliações, os autores aplicaram $1.180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de DQO nos sistemas alagados construídos. Masbough *et al.* (2005) obtiveram remoção de 51 a 63% na DBO no tratamento de lixívia de celulose, em sistemas alagados com TRH de 7 dias e DBO variando de 1.700 a 3.460 mg L^{-1} . Os autores observaram maiores eficiências na remoção de poluentes naquelas células que receberam a lixívia com correção de pH (6,0) e adição de nutrientes (N, P e K). Tao *et al.* (2006), tratando lixívia da indústria de celulose, concluíram que $0,4 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ de DQO ($1.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de DQO, aproximadamente) é a carga máxima a ser aplicada em sistemas alagados construídos sem causar inibição da microbiota. Os autores concluíram ainda que, com o aumento do TRH, poderia ser obtido aumento na eficiência na remoção de matéria orgânica da água residuária. Sohsalam *et al.* (2008) aplicaram em sistemas alagados construídos cargas de 612 a $1.213 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de DBO e obtiveram eficiências médias de 74 a 89% e 15 a 68%, respectivamente, na remoção de DBO e DQO de águas residuárias do processamento da cana-de-açúcar. Diante dos resultados, os autores concluíram que a máxima taxa a ser aplicada das águas residuárias do processamento da cana-de-açúcar em sistemas alagados construídos é de $612 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de DBO, visto que em maiores concentrações houve redução na eficiência de remoção de matéria orgânica.

Tabela 4. Valores das eficiências médias (%) de remoção de matéria orgânica (DBO e DQO) e compostos fenólicos (F_T) nos SACESHs, em cada fase operacional.

SACESHs	Fase I			Fase II			Fase III		
	DQO	DBO	F_T	DQO	DBO	F_T	DQO	DBO	F_T
SAC ₁	47±18	22±27	43±41	17±7	5±35	10±12	21±12	47±9	-32±24
SAC ₂	47±17	16±21	30±30	18±5	22±39	4±14	20±11	38±7	-9±9
SAC ₃	44±10	18±29	11±63	30±22	59±19	2±14	29±25	71±1	5±7
SAC* ₁	23±17	26±20	50±33	9±9	28±8	24±40	45±26	59±19	55±37
SAC* ₂	26±14	40±18	29±18	11±10	14±21	16±61	25±17	7±11	60±24
SAC* ₃	27±15	19±16	53±34	12±7	36±27	24±65	24±24	18±12	24±20
SAC ^F ₁	42±41	47±34	65±14	66±9	74±12	54±14	85±9	63±22	65±11
SAC ^F ₂	37±23	41±30	32±57	29±37	18±39	29±18	75±13	55±30	59±21
SAC ^F ₃	34±41	40±33	42±13	16±47	17±41	14±29	32±35	45±26	37±40

Foram feitas cinco amostragens em cada fase. Fase I: fase de adaptação em que os SACESHs receberam ARC diluída. Fase II: aumento da carga orgânica aplicada aos SACESHs em três diluições (50, 75 e 100%). Fase III: aumento do TRH em, aproximadamente, duas vezes ao aplicado na Fase II.

Verificam-se que as cargas orgânicas aplicadas, neste trabalho, durante a fase III, quando se utilizou ARC diluída a 50% (v/v) – SAC^F₁ (Tabela 3.1), estão em conformidade com aquelas encontradas na literatura (Masbough *et al.*, 2005; Tao *et al.*, 2006; Sohsalam *et al.*, 2008) para águas residuárias que apresentam compostos recalcitrantes. Entretanto, estão bem superiores às cargas recomendadas para aplicação de efluentes domésticos em sistemas alagados construídos que, segundo USEPA (2000), deve variar de 60 a $133 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de DBO. Verifica-se, também, maiores eficiências na remoção de matéria orgânica neste trabalho, quanto se utilizou como tratamento primário filtros anaeróbios (SAC^Fs) (Tabela 4).

As cargas de compostos fenólicos (F_T) aplicadas nos SACs foram superiores àquelas aplicadas nos SAC*s e SAC^Fs, durante as fases I e II. Acredita-se que este fato seja devido à remoção destes compostos, proporcionada pela elevação do pH da ARC, que causou a sedimentação da matéria orgânica particulada e conseqüente remoção de F_T . Aktas *et al.* (2001) conseguiu uma eficiência entre 63 e 73% na remoção de polifenóis, quando adicionou cal à água residuária do processamento de oliva, a qual é rica em compostos fenólicos.

Durante a fase II, houve aumento nas concentrações de F_T , tanto afluente como efluente aos SACESHs, devido à maior concentração da ARC e da maior carga orgânica aplicada (Tabela 2). Conseqüentemente, houve redução nas eficiências de remoção desta variável. Durante a fase III, houve redução nas concentrações de F_T na ARC. O aumento na eficiência de remoção na terceira fase nos SAC*s se deu em função da redução na carga afluente e dos maiores valores de pH observados nestes sistemas, os quais favoreceram a precipitação destes compostos. O aumento do pH também favoreceu a remoção de F_T nos SAC^Fs, apesar do aumento na carga destas substâncias, ocorrido nesta fase, no entanto, verificou-se diminuição na eficiência de remoção de F_T com o aumento da carga orgânica aplicada. Grismer *et al.* (2003), no tratamento de águas residuárias da produção de vinho, obtiveram remoções de 48 a 78% de F_T , utilizando sistemas alagados construídos.

Acredita-se que o aumento do TRH nos SACESHs poderia aumentar, ainda mais, a eficiência de remoção de poluentes da ARC, principalmente para os SAC^Fs, pois é necessário um longo tempo de exposição do material orgânico da água residuária às bactérias e às enzimas produzidas por estas para induzir e manter a degradação de polímeros tóxicos e recalcitrantes (Metcalf & Eddy, 2003), como os compostos fenólicos.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o aumento nas taxas de carga superficial dos constituintes da ARC no sistema proporcionou decréscimo na eficiência de remoção de DQO e DBO em todos os SACESHs avaliados. Os tempos de residência hidráulica superiores a 100 h proporcionaram, durante a fase III de operação de todos os SACESHs, maiores eficiências na remoção de DQO (SAC^*_1 , SAC^F_1 e SAC^F_2) e DBO (SAC_1 , SAC^*_1 , SAC^F_2 e SAC^F_3) que os de aproximadamente 60 horas, aplicados nas fases I e II do experimento. A adição de nutrientes favoreceu a remoção de matéria orgânica contida na ARC, principalmente nos sistemas que receberam menores cargas orgânicas. Entre os SACESHs, o SAC^F_1 , que recebeu a menor carga orgânica ($1.500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de DQO), apresentou mais satisfatório desempenho no que se refere à remoção de matéria orgânica e compostos fenólicos dos efluentes dos filtros anaeróbios utilizados no tratamento da ARC, apresentando eficiências na remoção de DBO, DQO e compostos fenólicos iguais a 63, 85 e 65%, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKTAS, E.S.; IMRE, S.; ERSOY, L. Characterization and lime treatment of olive mill wastewater. **Water Research**, v.35, n. 9, p.2336–2340, 2001.
- APHA [AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION]; AWWA [AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION]; WEF [WATER ENVIRONMENT FEDERATION]. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th. ed. Washington. D.C.: APHA/AWWA/WEF, 1998, [s.n.].
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T.; SOARES, A.A.; FERREIRA, P.A. Qualidade de efluente de sistemas alagados construídos, utilizados no tratamento de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.133-137, 2005.
- BRASIL, M.S., MATOS, A.T., FIA, R. Eficiência e impactos ambientais do tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro em áreas alagadas naturais. **Engenharia na Agricultura**, v.11, n.1-4, p. 43-51, 2003.
- BRUNO, M.; OLIVEIRA, R.A. Tratamento anaeróbio de águas residuárias do beneficiamento de café por via úmida em reatores UASB em dois estágios. **Engenharia Agrícola**, v.28, n.2, p.364-37, 2008.
- DINSDALE, R.M.; HAWKES, F.R.; HAWKES, D.L. The mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of coffee waste containing coffee grounds. **Water Research**, v.30, n.2, p.371-377, 1996.
- LUIZ, F.A.R. **Desempenho de reatores anaeróbios de leito fixo no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro**. Viçosa: UFV, 2007. 132p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Viçosa, 2007.
- FIA, R., MATOS, A.T. Tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro pelo sistema "Wetland". In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11, 2002. Viçosa. **Anais ...** Viçosa: UFV, 2002. v.1. p.31 – 32.
- FIA, R. **Desempenho de sistemas alagados construídos no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro**. Viçosa: UFV, 2008. 181p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- FOLIN, O.; CIOCALTEU, V. On tyrosine and tryptophane determinations in proteins. **The Journal of Biological Chemistry**, v.73, n.2, p.627-650, 1927.
- FREITAS, W. S. **Desempenho de sistemas alagados construídos, cultivados com diferentes espécies vegetais, no tratamento de águas residuárias da suinocultura**. Viçosa: UFV, 2006, 159p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- GRISMER, M.E.; CARR, M.A.; SHEPHERD, H.L. Evaluation of constructed wetland treatment performance for winery wastewater. **Water Environmental Research**, v.75, n.5, p.412-421, 2003.
- MASBOUGH, A.; FRANKOWSKI, K.; HALL, K.J.; DUFF, S.J.B. The effectiveness of constructed wetland for treatment of woodwaste leachate. **Ecological Engineering**, v.25, p.552–566, 2005.
- MAZZOLA, M.; ROSTON, D.M.; VALENTIM, M.A.A. Uso de leitos cultivados de fluxo vertical por batelada no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.2, p.276-283, 2005.
- METCALF & EDDY, Inc. **Wastewater Engineering, Treatment and Reuse**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, Inc. 2003, 1819p.
- SOHSALAM, P.; SIRIANUNTAPIBOON, S. Feasibility of using constructed wetland treatment for molasses wastewater treatment. **Bioresource Technology**, v.99, n.13, p.5610-5616, 2008.
- TAO, W.; HALL, K.J.; DUFF, S.J.B. Performance evaluation and effects of hydraulic retention time and mass loading rate on treatment of woodwaste leachate in surface-flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v.26, p.252–265, 2006.
- USEPA - U.S. Environmental Protection Agency. **Wastewater Technology Fact Sheet Wetlands: Subsurface Flow**. EPA 832-F-00-023. Washington, D. C. September, 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/design.pdf>> Acesso em: 09 out. 2003.
- VON SPERLING, M. **Lodos ativados**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1997. 415p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v.4).

VRHOVSEK, D.; KUKANJA, V.; BULC, T. Constructed wetland (cw) for industrial waste water treatment. **Water Research**, v.30, n.10, p.2287-2292, 1996.