

Remoção de matéria orgânica e nutrientes de águas residuais de laticínios em sistemas alagados construídos

Removal of organic matter and nutrients of dairy wastewater in constructed wetlands systems

Henrique V. de Mendonça^{1*}, Celso B. de Melo Ribeiro² e Kelly C. C. Nogueira³

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas, Programa de Pós Graduação em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais. Juiz de Fora, MG, Brasil. CEP: 36036-900;

² Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Juiz de Fora, MG, Brasil. CEP: 36036-900;

³ Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Núcleo de Análise Geo Ambiental. Juiz de Fora, MG, Brasil. CEP: 36036-900.

(* E-mail: henriqueufv@gmail.com)

<http://dx.doi.org/10.19084/RCA15154>

Recebido/received: 2015.11.08

Aceite/accepted: 2016.02.10

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficácia de sistemas alagados construídos no tratamento de águas residuais da agroindústria de laticínios. Os sistemas foram submetidos a diferentes taxas de carregamento orgânico e nutrientes a um tempo de detenção hidráulica de 3,5 dias aplicando um caudal de 7,5 L dia⁻¹. Foram implantadas seis unidades experimentais por meio de tanques de polietileno com volume útil de 75 L, usando como meios suportes brita n. 0 em três dos sistemas e brita n. 0 e areia em outros três, na proporção de 80% brita e 20% areia. Quatro unidades foram cultivadas e duas mantidas como testemunhas. As espécies selecionadas para cultivo foram as macrófitas *Typha domingensis* e o *Hedychium coronarium*. As eficiências médias na remoção de nitrogênio e fósforo ficaram entre 42 e 50% e 39 a 43%, respectivamente, nos leitos vegetados e entre 28 a 30% e 16 a 19% nos leitos não vegetados, havendo diferenças significativas entre leitos cultivados e testemunhas ($p < 0,05$). Em termos de remoção de DBO e DQO não houve diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os sistemas, apresentando estas eficácias médias de remoção 89 a 91% para DBO e 82 a 86% para DQO.

Palavras-chave: agroindústria de laticínios, água residual, macrófitas.

ABSTRACT

This work had as objective to evaluate the effectiveness of constructed wetlands systems in wastewater treatment of agribusiness of dairy products. The systems were submitted rates of organic load and nutrients to hydraulic detention time 3.5 days by applying a flow of 7.5 L day⁻¹. Were implanted six experimental units by means of polyethylene tank with a net volume of 75 L, using as means crushed stone no. 0 in the three of the systems and crushed stone no. 0 and sand in the other three, in the proportion of 80% and 20% sand. Four units were cultivated and two maintained as witnesses. The species selected for cultivation were the macrophytes *Typha domingensis* and *Hedychium coronarium*. The efficiencies sized in the nitrogen and phosphorus were between 42 to 50%, and 39 to 43%, respectively, in beds vegetated and 28 to 30% and 16 to 19% in the beds not vegetated, and there are significant differences between beds cultivated and witnesses ($p < 0.05$). In terms of the removal of DBO and DQO there were no significant differences ($p > 0.05$), between the systems, presenting these efficacies averages of removing 89 to 91% for DBO and 82 to 86% for DQO.

Keywords: dairy agribusiness, macrophytes, wastewater.

INTRODUÇÃO

As agroindústrias de laticínios representam relevante importância na economia mundial, mas por outro lado, inevitavelmente, causam impactos ambientais. Considerando o potencial poluidor deste tipo de agroindústria, os efluentes líquidos gerados nos mais diversos setores de produção são considerados os principais responsáveis pela poluição (Mendonça *et al.*, 2015). Segundo o mesmo autor, um laticínio que processa 10 m³ de leite por dia gera um volume três vezes maior de efluentes, 30 m³, considerando um valor de 2.000 mg L⁻¹ de DBO na água residual, a agroindústria possuirá um equivalente populacional de aproximadamente 1.111 pessoas, considerando que cada habitante produza 54 g DBO dia⁻¹, ficando evidente a necessidade prévia do tratamento da ARL antes de sua disposição em cursos de água.

Além do material orgânico biodegradável, Mendonça *et al.* (2012), relatam que na água residual de laticínios (ARL) de indústrias que produzem leite UHT (*Ultra-High Temperature*) ou pasteurizado e doces de leite, podem apresentar concentrações de 26,5 a 86,2 mg L⁻¹ de nitrogênio e 4,5 a 14,2 mg L⁻¹ de fósforo.

Nos últimos anos, o uso de sistemas alagados construídos (SACs), para o tratamento de águas residuais tem ganhado popularidade, devido a seu baixo custo de implantação e monitoramento em comparação sistemas convencionais (Healy e Cawley, 2002; Hsu *et al.*, 2011; Mendonça *et al.*, 2012).

Nos Estados Unidos e Europa, o uso de SACs vem sendo registrado em um grande número de agroindústrias de laticínios, apresentando resultados promissores (Healy e Cawley, 2002; Mendonça *et al.*, 2012; Tunçsiper *et al.*, 2015).

Segundo Matos *et al.* (2012), no Brasil, diversos trabalhos utilizando forrageiras, como o azevém (*Lolium multiflorum*) e a aveia-preta (*Avena strigosa*) (Fia *et al.*, 2010), e os capins tifton 85 (*Cynodon* sp.) (Fia *et al.*, 2011; Matos *et al.*, 2010a; 2010b e 2010c) e capim elefante (*Pennisetum* sp.), (Matos, *et al.* 2008 e 2010a), têm demonstrado elevada eficiência como extratores de nutrientes e poluentes de diversos tipos de águas residuárias tratadas por SACs.

Segundo Hsu *et al.* (2011), os SACs simulam zonas úmidas naturais e combinam processos físicos, químicos e biológicos para purificar águas residuais de origem urbana e agroindustrial, removendo satisfatoriamente DBO, DQO, ST, azoto, fósforo, dentre outros.

As espécies vegetais selecionadas para cultivos em SACs devem ser perenes, tolerantes ao excesso de água e a ambientes eutrofizados, possuir fácil propagação e crescimento rápido, de fácil colheita e manejo e possuir relevante capacidade de remoção de nutrientes e poluentes (Matos *et al.*, 2008; Hsu *et al.*, 2011).

Visando contribuir e suplementar dados sobre a eficiência de remoção de carga de poluentes orgânicos e nutrientes por SACs de águas residuais de laticínios, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a capacidade de remoção de cargas de nitrogênio (NTK), fósforo total (Pt), DBO e DQO da ARL, por SACs, operados com um tempo de residência hidráulica de 3,5 dias.

MATERIAL E MÉTODOS

Glossary of abbreviations for English: ARL = DW; DBO = BOD; DQO = COD; TDH = HRT; NTK = TNK; PEAD = HDP; SACs = CWs; TCO = OLR.

O experimento foi conduzido nas instalações do Laticínio Flórida no município de Juiz de Fora – Minas Gerais, Brasil, nas coordenadas geográficas 21°40'45" de latitude sul e 43°26'31" de longitude oeste, no período de março a agosto de 2014.

Seis leitos horizontais foram instalados em paralelo, por meio de recipientes de polietileno etileno de alta densidade (PEAD) com o volume útil 75 L. Cada unidade apresentava seção transversal semi-circular com raio interno aproximado de 0,25 m e comprimento de 1,10 metros, com uma declividade média de 0,01% sobre o solo.

Como substratos foram utilizados: brita n. 0 nos SACs 1,2 e 6 e brita n. 0 e areia nos SACs 3,4 e 5, na proporção de 80% brita e 20% de areia.

A brita n. 0 possuía granulometria de 4,8 mm e a areia média lavada, granulometria de 2,4 mm,

sendo suas porosidades médias de $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente.

Os SACs 1 e 3 foram cultivados com *Typha domingensis* (taboa), os SACs 2 e 4 com *Hedychium coronarium* (lírio do brejo) e as unidades 5 e 6 não foram cultivadas, servindo como testemunhas.

A montante dos SACs a ARL foi submetida a tratamento preliminar composto por grades finas em alumínio (1) de $9,52 \times 25,4 \text{ mm}$, com espaçamento de 25 mm , largura de $0,30 \text{ m}$, altura de $0,60 \text{ m}$ e ângulo de inclinação de 60° , caixa de areia (2) com $0,30 \text{ m}$ de comprimento e $1,55 \text{ m}$ de largura, uma calha Parshall (3) com garganta de $2,54 \text{ cm}$, com

e $1,5 \text{ m}$ de altura com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 2 horas. A ARL foi desviada após a caixa de gordura para os SACs e o caudal ajustado por um registro de gaveta (5). Os reservatórios de entrada da ARL nos SACs foram numerados de R1 a R6 e os reservatórios de saída e amostragem do efluente tratado numerados de R1' a R6', conforme ilustrado na Figura 1.

O TDH (tempo de detenção hidráulica ou retenção hidráulica) foi calculado levando em consideração o volume útil das unidades experimentais e a porosidade do meio filtrante. Foi adotado um TDH de 3,5 dias para os SACs, fazendo uso de um caudal constante de $7,5 \text{ L d}^{-1}$.

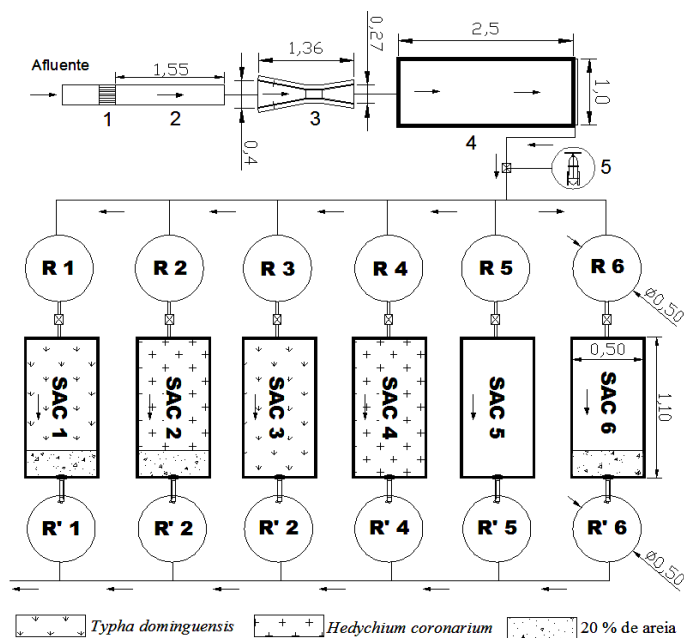


Figura 1 - Layout das unidades experimentais, evidenciando o tratamento preliminar e os SACs.

seção convergente de $0,4 \text{ m}$ e seção divergente de $0,27 \text{ m}$, e uma caixa de gordura em concreto armado (4), com $2,5 \text{ m}$ de comprimento, $1,0 \text{ m}$ de largura,

As características médias, mínimas, máximas e o desvio padrão (DP) dos parâmetros analisados na ARL são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros analisados na ARL após passagem pela caixa de gordura

Parâmetros	Unidade	Média	DP	Máximo	Mínimo
pH	---	6,0	$\pm 0,81$	6,7	5
¹ DQO	mg L^{-1}	2.456	± 957	4.100	1.200
² DBO	mg L^{-1}	1.675	± 938	3.900	890
³ NTK	mg L^{-1}	26,5	$\pm 7,5$	43,1	19
⁴ P-total	mg L^{-1}	16,8	$\pm 4,9$	24	8

¹DQO = CQO, ²DBO = CBO, ³Nitrogênio total de Kjeldahl, ⁴P-total = Fósforo total

Durante 45 dias fez-se saturação dos SACs diariamente, com a ARL, objetivando-se adaptação microbológica para iniciar a formação do biofilme no substrato.

Em seguida, foram plantadas as vegetações por meio de propágulos vegetativos (rizoma + caule) com aproximadamente, 10 cm de comprimento, no caso de *Typha domingensis*. *Hedychium coronarium* foi inserido ao substrato, plantando-se mudas entre 10 a 12 cm, ambas com adensamento de plantio de 14 propágulos por m².

Durante 20 dias continuou-se aplicando a ARL aos SACs, já com as vegetações plantadas, durante este período de tempo, houve a adaptação das vegetações nos sistemas e início do brotamento de *Typha domingensis*.

A partir de então, foi iniciado o monitoramento dos SACs, realizando amostragens de 15 em 15 dias mensurando valores de entrada e saída dos sistemas por 165 dias. Foram contemplados no estudo os parâmetros: pH, determinado em campo por medidor de pH digital, DQO, pelo método de oxidação química de refluxo aberto, DBO, pelo método iodométrico, nitrogênio total de Kjeldahl (NTK), pelo método semimicro de Kjeldahl e fósforo total (P-total), por espectrofotometria ótica, em conformidade com as recomendações da APHA (2005).

As taxas de carregamento aplicadas aos SACs, são apresentadas no Quadro 2, em conformidade com os valores dos parâmetros analisados e o caudal aplicado aos sistemas em 10 instantes de tempo.

Quadro 2 - Taxas de carregamento orgânico aplicados aos SACs ao longo do tempo

*ITs	Taxas de carregamento Kg ha ⁻¹ d ⁻¹			
	DQO	DBO	NTK	P-total
30	307	164	3,5	3,0
45	273	136	3,4	2,3
60	205	135	2,6	2,2
75	164	121	5,9	2,9
90	322	245	4,8	1,1
105	423	273	4,0	1,4
120	286	184	2,9	2,0
135	280	154	3,0	2,2
150	532	341	3,4	2,6
165	559	532	2,7	3,3

*ITs – Instantes de tempo (dias)

Para avaliar se houberam diferenças significativas entre as médias das eficiências dos tratamentos dos SACs cultivados e não cultivados, fez-se uso de análise de variância ANOVA para medidas repetidas no tempo e os testes de Dunnett e Tukey ambos para P = 5%. Os testes estatísticos e os gráficos foram realizados por meio do software SigmaPlot versão 12.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Remoção de carga de NTK e P-total

Os valores de eficiência de remoção de NTK (à esquerda) e fósforo total (P-total) (à direita) em função de suas respectivas taxas de carregamento ao longo dos instantes de tempo (ITs), são apresentados no Quadro 3.

Na Figura 2 são apresentados os comportamentos temporais da ARL coletada após a caixa de gordura (afluente – Af), aplicada aos SACs e a respectiva remoção das cargas de NTK e Pt durante o período experimental.

A remoção de carga de NTK e P-total pelos sistemas cultivados superou os sistemas não cultivados (testemunhas), havendo diferenças significativas entre as médias pelos testes ANOVA, Dunnett e Tukey, todos a nível de probabilidade de 5% (p < 0,05), demonstrando que a presença das vegetações intensificaram significativamente a remoção dos nutrientes.

O mesmo efeito estatístico foi citado por Matos *et al.* (2012) para compostos nitrogenados, onde os SACs não vegetados apresentaram desempenho semelhante aos dos SACs vegetados na remoção de DBO, DQO, ST, SST e Na, enquanto os cultivados com capim tifton 85 (*Cynodon* sp.), foram mais eficiente na remoção de NTK.

A remoção de NTK foi maior no início do experimento e ao decorrer do tempo a eficácia de tratamento foi sendo reduzida. Isto ocorre devido às vegetações ter atingido a senescência, reduzindo a extração dos nutrientes do substrato. Segundo Eustáquio Jr. *et al.* (2010) a biomassa da planta cultivada nos SACs, deve ser regularmente removida para assegurar elevada remoção de nutrientes do

Quadro 3 - Remoção percentual de carga de NTK e Pt da ARL pelos SACs

Remoção percentual (%) de NTK e Pt por pares						
¹ IT	SAC 1	SAC 2	SAC 3	SAC 4	SAC 5	SAC 6
	NTK - Pt	NTK - Pt	NTK - Pt	NTK - Pt	NTK - Pt	NTK - Pt
30	69 - 55	61 - 50	52 - 53	56 - 41	15 - 38	25 - 39
45	60 - 49	55 - 40	50 - 46	41 - 34	38 - 13	30 - 7
60	60 - 51	53 - 41	47 - 41	32 - 44	19 - 14	30 - 19
75	49 - 29	55 - 38	70 - 31	66 - 27	21 - 5	40 - 9
90	53 - 36	51 - 38	57 - 44	43 - 45	41 - 25	27 - 11
105	46 - 42	48 - 42	55 - 29	49 - 48	47 - 15	33 - 32
120	34 - 37	28 - 27	33 - 44	29 - 37	26 - 7	24 - 13
135	44 - 44	34 - 40	35 - 44	32 - 44	27 - 13	18 - 19
150	48 - 42	36 - 45	39 - 45	41 - 37	40 - 16	32 - 18
165	40 - 46	25 - 38	25 - 42	30 - 33	25 - 17	20 - 19
Média	50 - 43	45 - 40	46 - 42	42 - 39	30 - 16	28 - 19
Máx	68 - 55	61 - 50	70 - 53	66 - 48	47 - 38	40 - 39
Mín	34 - 29	25 - 27	25 - 29	29 - 27	15 - 5	18 - 7
² DP	± 10,4 - 7,7	± 12,6 - 5,9	± 13,2 - 7,4	± 12 - 6,6	± 10,8 - 9,4	± 6,6 - 10

¹IT = Instante de tempo, ²DP = Desvio padrão

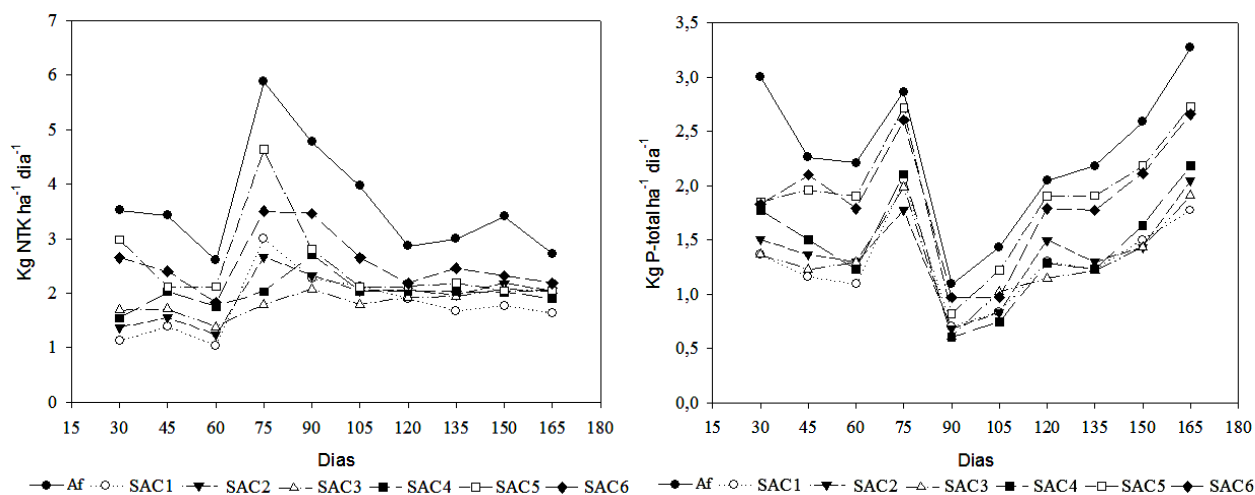


Figura 2 - Comportamento temporal da ARL e da remoção da taxa de carregamento de NTK e fósforo total pelos SACs.

meio, uma vez que as maiores taxas de remoção dos elementos dar-se-ão no período de brotamento e desenvolvimento vegetativo da cultura.

Tal fato pode ser verificado na Figura 2 na remoção de NTK, que a partir dos 120 dias ocorre uma tendência à estabilização da remoção do elemento. No caso do Pt a redução da extração do elemento é mais evidente a partir do 90º dia experimental, onde a concentração deste tende a aumentar na saída dos sistemas.

Matos *et al.* (2010c) ao tratar águas residuárias da suinocultura em SACs com escoamento sub superficial, concluiu que a fração de fósforo orgânico era removida pela imobilização microbiológica no meio filtrante, tal como observado por Mendonça *et al.* 2012 e Xu *et al.* (2015).

As maiores médias de remoção de carregamento de NTK e Pt foi atingida pelo SAC 1, cultivado com *Typha domingensis* possuindo como substratos brita e areia, alcançando uma remoção de 50 e 43% dos elementos, respectivamente. O SAC 3 cultivado *Typha domingensis* tendo como substrato apenas Brita, atingiu a segunda melhor eficiência na remoção dos nutrientes com 46% de remoção de NTK e 42% de Pt.

As unidades experimentais cultivadas com *Hedychium coronarium*, SAC 2, com brita e areia e SAC 4 com apenas brita, obtiveram remoções médias de NTK da ordem de 45 e 42% e de Pt entre 40 e 39%.

Os SACs testemunhas 5 (somente brita) e 6 (brita e areia), obtiveram remoções médias de NTK de 30 e 28% e Pt de 16 a 19%. A remoção de compostos nitrogenados nos leitos não vegetados pode ser atribuída à imobilização do nitrogênio orgânico junto ao biofilme formado no substrato e a oxidação anaeróbia da amônia, fato reportado também por Mendonça *et al.* (2012).

No caso do fósforo poder-se-á aferir que a extração nas unidades testemunhas deu-se por adsorção do íon fosfato PO_4^{3-} ao substrato uma vez que a brita utilizada na pesquisa foi retirada de jazidas de granito, rocha ígnea que possui em sua composição biotita e feldspato ricas em óxidos de ferro e alumínio, que intensificam o fenômeno de adsorção e fixação fósforo junto ao substrato (Mendonça *et al.*, 2012). Neste caso, como os sistemas não foram vegetados a fração dos elementos não foram absorvidas pelos rizomas das culturas tendo seus valores aumentados na saída dos sistemas, justificando as menores eficiências das unidades testemunhas.

Valores semelhantes aos desta pesquisa acerca da remoção de compostos nitrogenados da ARL foram relatados por Matos *et al.* (2008), os SACs avaliados pelos autores atingiram eficiências de remoção de NTK entre 29,3 a 70,4%, fazendo uso de um TDH de 4,8 dias. Para o fósforo total os autores relatam

que a remoção do elemento foi insatisfatória, em função da evapotranspiração, o que proporcionou concentração de solutos no meio, não havendo remoção do elemento pelos sistemas.

Mendonça *et al.* (2012), tratando ARL em SACs operados em bateladas com tempo de ciclo de 2 dias, atingiram uma eficiência máxima na remoção de NTK de 73,4% cultivando a espécie *Typha domingensis*. Neste estudo as eficiências médias de extração do nutriente variaram de 53,47% a 46,01% para leitos cultivados com *Typha domingensis* e *Hedychium coronarium*, respectivamente. No mesmo estudo, no que tange a extração do fósforo total, os autores relatam que a remoção do elemento foi inferior aos compostos nitrogenados, obtendo-se eficiências entre 18,61 a 34,3%. Neste caso, é observado que com menores tempos de detenção da água residual os efeitos da evapotranspiração são reduzidos, havendo maior quantidade de solvente na saída dos sistemas, porém a remoção do elemento da ARL pode ser considerada baixa.

Na presente pesquisa os valores máximos e mínimos na remoção de fósforo total variaram entre 27 a 55% para os leitos vegetados e de 5 a 39% para os leitos não vegetados, indicando que as vegetações utilizadas, assim como o TDH utilizado de 3,5 dias proporcionaram melhores eficácias de remoção do elemento em relação às pesquisas citadas anteriormente, em especial nos leitos vegetados.

Horn *et al.* (2014), conduziram um experimento no tratamento de esgoto sanitário em dois SACs tendo como substrato brita n. 4, cultivados com *Hymenachne grumosa*, antecedidos por um tanque de sedimentação. O experimento foi conduzido em duas fases, uma com escoamento contínuo usando um TDH de 1,87 dias (fase 1) e outra em bateladas com tempo de ciclo de 7 dias (fase 2). A remoção média NTK e Pt na fase 1 um foi de 17,6% e 51,6 respectivamente. Na fase 2 em regime intermitente as remoções de NTK e Pt foram de 28,7% e 50,3. O estudo indica que SACs operados em bateladas possuem melhor eficácia na remoção do fósforo mesmo a TDHs reduzidos. A extração de NTK pelos SACs encontrada pelos autores pode ser considerada inferior aos estudos anteriormente citados em função da capacidade extratora do nutriente pela vegetação utilizada na pesquisa.

Pelissari *et al.* (2014) tratando águas residuais geradas em instalações de gado de leite por SACs cultivados com *Typha domingensis*, usando como substrato areia de granulometria 0,33 mm aplicando cargas de NTK entre 10,3 g m⁻² semana⁻¹ e 21,6 g m⁻² semana⁻¹, obtiveram uma remoção de 59% de NT e 58% de amônia e 23% de NT e 80% de amônia, respectivamente. No estudo os autores reportaram a remoção da carga de nutrientes pelas vegetações entre 5,1% e 0,88% quando foram aplicadas as taxas de carregamento de NTK de 10,3 e 21,6 g m⁻² semana⁻¹, respectivamente, indicando que as vegetações extraem de forma mais eficiente compostos nitrogenados a menores taxas de aplicação do elemento.

Neste presente estudo o mesmo foi verificado por meio da Figura 2, onde quanto maior foi a aplicação de NTK, menores foram as eficiências de extração do elemento.

Mantovi *et al.* (2003), cultivando a macrófita *Phragmites australis* em dois SACs em série preenchidos com cascalho, obtiveram uma remoção média de 48,5% de NTK e 60,6% de Pt, de águas residuais de uma sala de ordenha misturada com águas residuais da bovinocultura, em condições de clima frio na Itália usando um TDH de 10 dias.

Sobre o Pt a presente pesquisa obteve resultados próximos aos encontrados por Valentim (2003) e

Brasil *et al.* (2005), que obtiveram eficiência média de remoção de fósforo total da ordem de 23 a 36% (tempo de detenção hidráulica entre 2 a 4 dias), 38% (tempo de detenção hidráulica de 0,75 a 2,9 dias) e de 31 a 48% (tempo de 1,9 a 3,8 dias), respectivamente, em SACs cultivados com *Typha domingensis* no tratamento de esgoto sanitário.

Remoção de carga de DBO e DQO

As eficiência de remoção de DBO e DQO em função de suas respectivas taxas de carregamento ao longo dos instantes de tempo (IT), são apresentados no Quadro 4.

Não foram verificadas diferenças significativas pelos testes ANOVA, Dunnett e Tukey, em nível de probabilidade de 5% ($P > 0,05$), na remoção de taxas de carga orgânica em termos de DBO e DQO entre os leitos cultivados e os leitos não cultivados.

O mesmo comportamento estatístico foi verificado por Mendonça *et al.* (2015) e Matos *et al.* (2012) ao se tratar a ARL em SACs, indicando que as vegetações cultivadas não influenciam na remoção destes parâmetros.

Em média todos os SACs obtiveram eficácia na remoção de DBO superiores a 90%, exceto o SAC 2, que obteve 89%, valor próximo ao encontrado por Tunçsiper *et al.* (2015) de 83% ao tratar ARL em SACs nos EUA com TDH de 3 dias. As eficiências

Quadro 4 - Remoção percentual média, máxima, mínima e desvio padrão (DP) da carga de DBO e DQO pelos SACs

Remoção percentual (%) de DBO e DQO por pares						
¹ IT	SAC 1	SAC 2	SAC 3	SAC 4	SAC 5	SAC 6
	DBO - DQO	DBO - DQO	DBO - DQO	DBO - DQO	DBO - DQO	DBO - DQO
30	92 - 87	91 - 86	90 - 87	90 - 86	92 - 85	90 - 84
45	94 - 89	91 - 85	95 - 89	90 - 88	92 - 88	92 - 87
60	93 - 87	93 - 88	94 - 88	91 - 88	95 - 86	94 - 87
75	95 - 90	89 - 88	92 - 88	90 - 88	91 - 82	92 - 85
90	89 - 83	86 - 83	90 - 83	92 - 82	90 - 81	89 - 80
105	90 - 84	89 - 83	91 - 82	92 - 83	90 - 86	90 - 81
120	93 - 88	93 - 87	92 - 85	89 - 88	91 - 83	93 - 84
135	86 - 86	85 - 81	80 - 72	89 - 82	82 - 77	86 - 83
150	90 - 88	86 - 78	90 - 86	88 - 82	88 - 80	84 - 78
165	91 - 79	89 - 76	87 - 77	92 - 74	92 - 75	91 - 77
Média	91 - 86	89 - 84	90 - 84	90 - 84	90 - 82	90 - 83
Máx	95 - 90	93 - 88	95 - 89	94 - 88	95 - 88	94 - 87
Mín	86 - 79	85 - 76	80 - 72	88 - 74	82 - 75	84 - 77
² DP	± 2,7 - 3,3	± 2,9 - 4,1	± 4,2 - 5,5	± 1,4 - 4,5	± 3,4 - 4,2	± 3,1 - 3,5

¹IT = Instante de tempo, ²DP = Desvio padrão

máximas foram obtidas pelo SAC 1 cultivado com *Typha domingensis*, tendo como substrato brita e areia e o SAC 5 testemunha, contendo somente brita.

Na remoção de carga de DQO as eficiências dos tratamentos ficaram acima de 83%, com destaque para o SAC 1, que obteve media geral no tratamento de 86%. As eficiências máximas foram atribuídas aos SACs 1 e 3 com 90 e 89% de eficácia na remoção da DQO. Os SACs 2, 4 e 8 obtiveram uma eficácia máxima similar de 88% e o SAC 6, 87%.

De forma geral as eficiências mínimas ficaram entre 80 e 86% para DBO e 72 a 79% para DQO, apresentando os sistemas excepcional capacidade de depuração da ARL a um TDH de 3,5 dias em termos de compostos orgânicos.

Na Figura 3 (A e C) são apresentados os comportamentos temporais da ARL coletada após a caixa

de gordura (afluente – Af) aplicada aos SACs e a respectiva remoção das cargas de DBO e DQO durante o período experimental. Na mesma figura nos gráficos (B e D) é apresentado um *zoom* do comportamento temporal na remoção da carga orgânica de DBO e DQO.

Para todos os instantes de tempo analisados, o comportamento da remoção de DBO e DQO seguiu um padrão, onde, quanto maior a carga aplicada, menor era a eficácia de tratamento. Porém independente da carga aplicada, compreendida entre as faixas 164 a 559 Kg DQO ha⁻¹ d⁻¹ e 121 a 532 Kg DBO ha⁻¹ d⁻¹, todos os sistemas apresentaram capacidade promissora na remoção dos parâmetros.

Matos *et al.* (2012), aplicando TCOs entre de 66; 130; 190; 320 e 570 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO atingiram eficiência de remoção na ARL entre 79 a 96% e de DQO entre 85 a 97%, cultivando tifton 85 (*Cynodon*

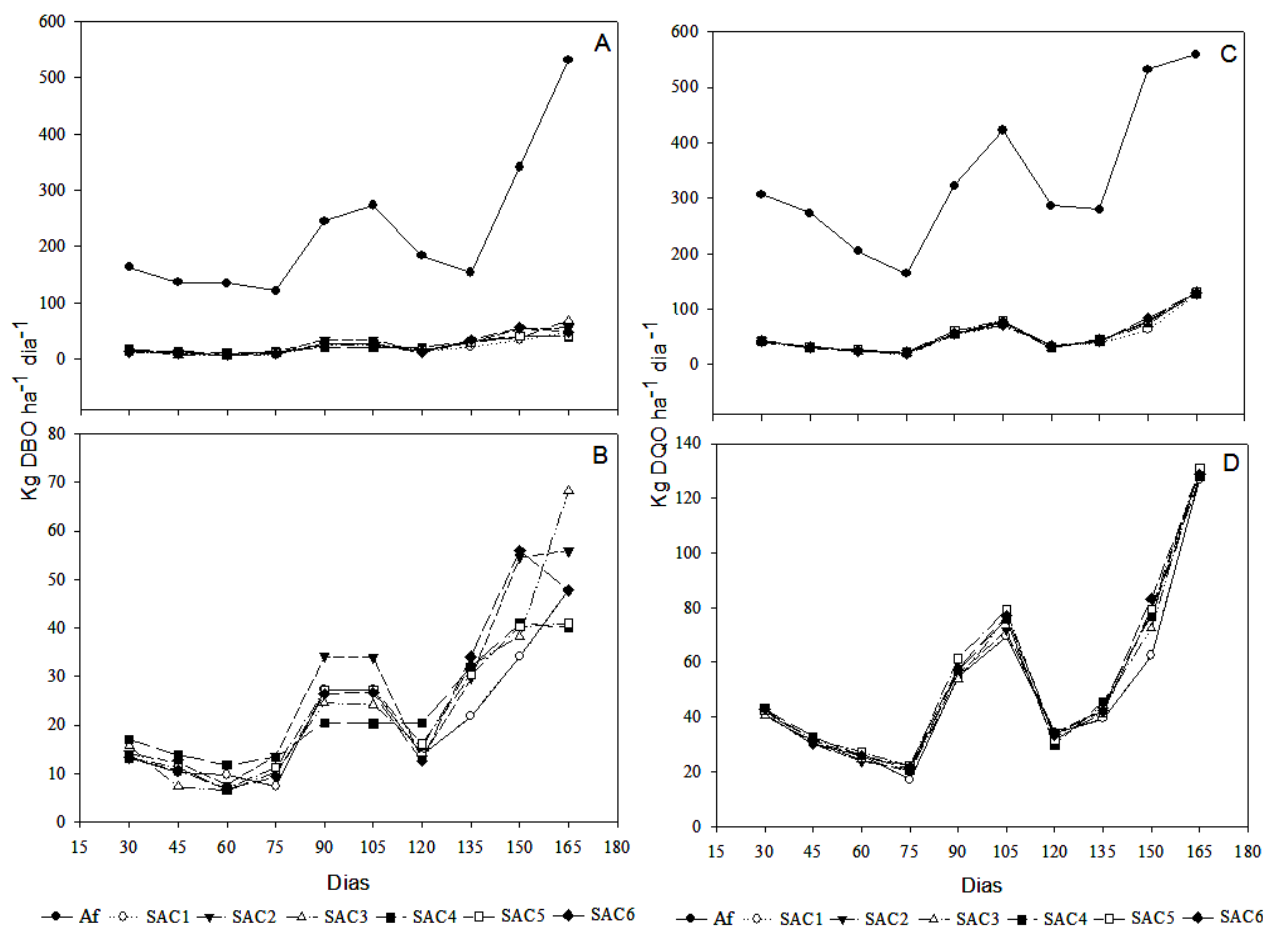


Figura 3 - (A e C) Comportamento temporal da ARL afluente aos SACs e da remoção da taxa de carregamento de DBO e DQO. (B e D) Zoom da remoção da carga orgânica em termos de DBO e DQO pelos SACs, respectivamente.

sp.) e capim elefante (*Pennisetum* sp.), fazendo uso de TDH de 4,8 dias. As eficácias de tratamento em termos de DBO encontrada pelos autores foram similares ao do presente estudo, porém a remoção de DQO foi em média superior, devido ao maior TDH utilizado na pesquisa.

Tal fato também pôde ser constatado por Fia *et al.* (2010), os quais concluíram que TDH superiores a 100 h (4,17 dias) proporcionaram maiores eficiências na remoção de DQO e DBO que os de aproximadamente 60 h (2,5 dias) aplicados nas fases iniciais do experimento, no tratamento de água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro (ARC), em SACs cultivados com taboa (*Typha latifolia*) e *Alternanthera* sp.

Por outro lado Mendonça *et al.* 2015, operando SACs em bateladas no tratamento da ARL, com tempo de ciclo de 2 dias e TCO constante de 232 kg DBO ha⁻¹ d⁻¹, obtiveram remoções médias de DBO entre 89,4 a 91,5%. Segundo os mesmos autores os sistemas mantiveram as faixas de pH próximos a neutralidade o que é reportado a degradação predominantemente anaeróbia no meio, favorecendo a produção de ácidos orgânicos voláteis no processo.

Nesta pesquisa a relevante remoção de compostos orgânicos também foi atribuída ao processo de degradação anaeróbia, proporcionada pelos microrganismos formadores de biofilmes junto ao substrato, fato também reportado por De la Varga *et al.* (2015), que detectaram emissões de CH₄ da ordem de 267 a 543 mg m² d⁻¹ e de CO₂ entre 3.500 e 5.800 mg m² dia⁻¹, confirmando a preponderância do processo de metanogênese em SACs operados na Espanha para pós tratamento de reatores UASB.

Mantovi *et al.* (2003) atingiram eficiências de remoção médias de 93,7% para DBO e 91,9% de DQO, operando dois SAC de escoamento sub superficial aplicando uma TCO inferior ao da presente pesquisa, de 19 Kg DBO ha⁻¹ d⁻¹, com TDH de 10 dias, no tratamento de águas residuais da bovinocultura misturadas com águas de lavagem de sala de ordenha. Os autores utilizaram como meio filtrante cascalho lavado e brita n. 3, cultivando a macrófita *Phragmites australis*. Os valores médios na remoção de DBO e DQO encontrado pelos autores superam os da presente pesquisa em função do TDH adotado de 10 dias, associados a menores TCOs aplicadas. Silva *et al.* (2015) utilizaram

uma taxa de aplicação hidráulica entre 4,8 e 15 cm d⁻¹ em SACs cultivados com *Oryza Sativa*, contendo como meio filtrante Latossolo Vermelho Amarelo e areia na proporção 1:1,5, obtendo uma remoção de DBO entre 97 a 99%. O resultado encontrado pelos autores foi o maior dentre as literaturas consultadas e também aos da presente pesquisa, pelo fato do meio filtrante possuir menor índice de vazios do que os habituais como brita, areia e cascalho, o que intensificou o mecanismo de filtração da água residual.

Matos *et al.* (2010b) em sua pesquisa com águas residuárias da suinocultura tratadas por SACs com TDH de 4,8 dias, aplicando uma TCO média de 154,8 Kg DBO_{total} ha⁻¹ d⁻¹, verificaram eficiências na remoção de DBO_{total} e DQO entre 86 e 89%, com médias estatisticamente iguais entre si, (p>0,05).

Fia *et al.* (2012), tratando efluentes da suinocultura (ARS) por meio de SACs em escala laboratorial, condicionados a uma temperatura de 20° C, sob duas taxas de carregamento orgânico (TCOs) de 246 e 328 Kg DBO ha⁻¹ d⁻¹, com TDH de 1,463 e 1,052 dias, obtiveram eficiências de remoção de DBO entre 66 e 73% e 55 a 58% de DQO. Os menores valores de remoção encontrados pelos autores são atribuídos ao menor TDH utilizado em função das relevantes TCOs aplicadas.

De forma geral os SACs utilizados na presente pesquisa obtiveram sucesso na remoção do material orgânico aplicado aos leitos sujeitos a diferentes TCOs com TDH de 3,5 dias em comparação às pesquisas supracitadas.

CONCLUSÕES

Os SACs proporcionaram relevantes remoções de DBO, DQO, NTK e P-total da ARL, mesmo com amplas variações das taxas de aplicação de carga orgânica e de nutrientes. A remoção de DBO e DQO, não é influenciada pela presença vegetações, sendo atribuída ao biofilme formado no meio filtrante. A remoção de nutrientes é maior nos sistemas vegetados, verificado estatisticamente com 95% de confiança. Este estudo indica que os sistemas alagados construídos operados em escoamento contínuo com TDH de 3,5 dias podem ser utilizados para tratamento de águas residuais de agroindústrias de produtos lácteos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA. (2005) – *Standard methods*. 19th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
- Brasil, M.S.; Matos, A.T.; Soares, A.A. e Ferreira, P.A. (2005) – Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos, utilizados no tratamento de esgoto doméstico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 9, Suplemento, p. 133-137.
- De la Varga, D.; Ruiz, I.; Álvarez, A.J. e Soto, M. (2015) – Methane and carbon dioxide emissions from constructed wetlands receiving anaerobically pretreated sewage. *Science of the Total Environment*, vol. 538, p. 824-833. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.090>
- Eustáquio Jr., V.; Matos, A.T.; Campos, L.C. e Borges, A. C. (2010) – Desempenho agrônômico da aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb), cultivada em sistemas alagados construídos. *Revista Ambiente e Água*, vol. 5, n. 1, p. 68-78.
- Fia, F.R.L.; Matos, A.T.; Fia, R.; Borges, A.C. e Teixeira, D.L. (2012) – Remoção de matéria orgânica e determinação de parâmetros cinéticos em sistemas alagados construídos em escala laboratorial. *Revista Acta Scientiarum*, vol. 34, n. 2, p. 149-156.
- Fia, F.R.L.; Matos, A.T.; Fia, R.; Lambert, T.F. e Matos, M.P. (2011) – Remoção de nutrientes por *Typha latifolia* e *Cynodon* spp. cultivadas em sistemas alagados construídos. *Revista Ambiente e Água*, vol. 6, n. 1, p.77-89.
- Fia, R.; Matos, A.T.; Matos, M.P.; Abreu, E.C. e Fia, F.R.L. (2010) – Tratamento das águas do processamento dos frutos do cafeeiro em filtro anaeróbio seguido por sistema alagado construído: I – remoção de matéria orgânica. *Engenharia Agrícola*, vol. 30, n. 6, p. 1191-1202. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162010000600019>
- Healy, M.G. e Cawley, A.M. (2002) – The nutrient processing capacity of a constructed wetland in western Ireland. *Journal of Environmental Quality*, vol. 31, n. 5, p. 1739-1747. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2002.1739>
- Horn, T.B.; Zerwes, F.V.; Kist, L.T. e Machado, Ê.L. (2014) – Constructed wetland and photocatalytic ozonation for university sewage treatment. *Ecological Engineering*, vol. 63, p. 1533-1545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.012>
- Hsu, C.B.; Hsieh, H.L.; Yang, L.; Wu, S.H.; Chang, J.S.; Hsião, S.C.; Su, H.C.; Yeh, C.H.; Ho, Y.S e Lin, H.J. (2011) – Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, vol. 37, n. 10, p. 1533-1545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.002>
- Mantovi, P.; Marmiroli, M.; Maestri, E.; Tagliavini, S.; Piccinini, S. e Marmiroli, N. (2003) – Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater. *Bioresource Technology*, vol. 88, n. 2, p. 85-94. [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00291-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00291-2)
- Matos, A.T.; Abrahão, S.S. e Lo Monaco, P.A.V. (2012) – Eficiência de sistemas alagados construídos na remoção de poluentes de águas residuárias da indústria de laticínios. *Revista Engenharia Agrícola*, vol. 32, n. 6, p. 1144-1155.
- Matos, A.T.; Abrahão, S.S. e Pereira, O.G. (2008) – Desempenho agrônômico de capim tifton 85 (*cynodon* spp) cultivado em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de água residuária de laticínios. *Revista Ambiente e Água*, vol. 3, n. 1, p. 43-53.
- Matos, A.T.; Abrahão, S.S.; Borges, A.C. e Matos, M.P. (2010a) – Influência da taxa de carga orgânica no desempenho de sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 15, n. 1, p.83-92. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522010000100010>
- Matos, A.T.; Freitas, W.S.; Brasil, M.S. e Borges, A.C. (2010b) – Influência da espécie vegetal cultivada nas condições redox de sistemas alagados construídos. *Revista Engenharia Agrícola*, vol. 30, n. 3, p. 518-526.
- Matos, A.T.; Freitas, W.S. e Lo Monaco, P.A.V. (2010c) – Eficiência de sistemas alagados construídos na remoção de poluentes de águas residuárias da suinocultura. *Revista Ambiente e Água*, vol. 5, n. 2, p. 119-132. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.142>
- Mendonça, H.V.M.; Ribeiro, C.B.M.; Borges, A.C. e Bastos, R.R. (2012) – Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de laticínios por sistemas alagados construídos operando em bateladas. *Revista Ambiente e Água*, vol. 7, n. 2, p. 75-87. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.805>
- Mendonça, H.V.M.; Ribeiro, C.B.M.; Borges, A.C. e Bastos, R.R. (2015) – Sistemas alagados construídos em bateladas: remoção de demanda bioquímica de oxigênio e regulação d pH no tratamento de efluentes de laticínios. *Revista Ambiente e Água*, vol. 10, n. 2, p. 442-453. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1511>

- Pelissari, C.; Sezerino, P.H.; Decezaro, S.T.; Wolff, D.B.; Bento, A.P.; Júnior, O.C. e Philippi, L.S. (2014) – Nitrogen transformation in horizontal and vertical flow constructed wetlands applied for dairy cattle wastewater treatment in southern Brazil. *Ecological Engineering*, vol. 73, p. 307-310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.085>
- Silva, C.S.; Bernardes, R.S. e Ramos, M.L.G. (2015) – Remoção de matéria orgânica do esgoto em solo de wetland construído. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 20, n. 4, p. 533-542. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522015020040075357>
- Tunçsiper, B.; Drizo, A. e Twohig, E. (2015) – Constructed wetlands as a potential management practice for cold climate dairy effluent treatment – VT, USA. *Catena*, vol. 135, n. 12, p. 184-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.028>
- Valentim, M.A.A. (2003) – *Desempenho de leitos cultivados (“Constructed Wetlands”) para tratamento de esgoto: contribuições para concepção e operação*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Brasil. 233 p.
- Xu, J.; Lo, S.L. & Xu, L. (2015) – Removal of pollutants during storm and non-storm events by two wetlands. *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, n. 22, p. 10391-10402. <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2015.1036466>