

Remoção de nutrientes e matéria orgânica de efluente de laticínio por sistema alagado construído híbrido em Londrina - Paraná

Removal of nutrients and organic matter from dairy effluent by flooded built hybrid system in Londrina - Paraná

Mariane Libório Cardoso¹

Aline Hanny Peralta¹

Danielle Martins Cassiano de Oliveira¹

Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi¹

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, ricardocostanzi@gmail.com

Submetido em 10/03/2015

Revisado em 09/04/2015

Aprovado em 24/04/2015

Resumo: O tratamento de efluentes industriais é de suma importância para evitar a poluição dos corpos hídricos. Efluentes de laticínios podem ser considerados altamente poluentes, pois possuem carga elevada de matéria orgânica e nutrientes. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema alagado construído (SAC) híbrido em escala de bancada para tratamento do efluente de uma indústria de laticínios localizada em Londrina, PR. O sistema foi operado durante 90 dias com foco na avaliação da eficiência de remoção de nutrientes e matéria orgânica. O sistema trabalhou com ciclos de 24 horas com uma carga de aplicação de DQO de 3,0 Kg.d⁻¹. A eficiência de remoção para a DQO variou de 79 até 97 %, para o NTK variou de 81 a 100% e para P-total variou de 73% a 100%. A análise estatística indicou que o SAC de fluxo vertical tem pouca eficiência de remoção, porém diminui a variabilidade e aumenta a confiabilidade do sistema.

Palavras-chave: sistema alagado construído, nutrientes eutrofizantes, matéria orgânica, efluente de laticínios.

Abstract: The treatment of industrial wastewater is of paramount importance to prevent pollution of water bodies. Wastewater from dairy industries are highly polluting because they have high load of organic matter and nutrients. This paper presents the development of a hybrid constructed wetland system in bench scale for the treatment of wastewater from a dairy industry located in Londrina, PR. The system was operated for 90 days with focus on the evaluation of the nutrient and organic matter removal efficiency. The system worked with 24 hour cycles with an organic load (COD) of 3.0 Kg.d⁻¹. The removal efficiency of COD was in the range of 79 – 97%; the removal efficiency of NKT was in the range of 81 – 100% and the removal efficiency of COD of phosphorus was in the range of 73% – 100%. Statistical tests showed that vertical flow wetland showed little removal efficiency, but it decreases the variability and increases system reliability.

Key-words: constructed wetlands system, eutrophying nutrients, organic matter, dairy effluent.

Introdução

A qualidade dos recursos hídricos tem sido muito discutida no Brasil, principalmente, devido à escassez de água na região Sudeste. Tundisi (2008) apresenta vários fatores associados a esse problema, dentre eles destaca-se a associação entre o aumento da demanda de água com a falta de gestão hídrica que permita uma abordagem sistêmica, integrada e preditiva.

Desta forma, o tratamento de efluentes industriais é de suma importância no aspecto de preservação da qualidade de água. Pois dependendo da qualidade do efluente, o corpo receptor não tem a capacidade de se autodepurar. Efluentes de indústrias de laticínios têm alto potencial poluidor, pois a carga de matéria orgânica de seus derivados é muito alta e há excesso de nutrientes provindos de detergentes e produtos químicos das limpezas dos equipamentos em indústrias alimentícias. (Gomes, 2006)

O tratamento biológico é o mais adequado para tratar esse tipo de efluente, pois degrada a matéria orgânica e remove os nutrientes, como nitrogênio e fósforo. SAC(s) vem sendo amplamente estudados para diversos tipos de águas residuárias, por serem de fácil manutenção, ter baixo custo de implantação comparado a tratamentos convencionais e serem capaz de remover nutrientes eutrofizantes, além da matéria orgânica (Abrahão, 2006; Matos, Abrahão & Pereira, 2011). O bom desempenho do SAC é devido a processos físicos-químicos e biológicos que ocorrem no sistema pelas interações entre o efluente com a planta, os microrganismos presentes, o meio suporte e o ambiente.

Segundo Begosso (2009), para aumentar a eficiência dos processos que ocorrem no sistema, pode-se acoplar dois ou mais SAC(s) de fluxos diferentes, visando melhorar a qualidade do efluente por processos distintos e complementares.

As principais vantagens associadas a este tipo de sistema de tratamento são: a redução de odores provenientes do efluente, a necessidade de espaços menores quando comparado a tratamentos convencionais e o menor custo na operação e

manutenção desses sistemas. (Wallace, 2010). Por esse fato, objetivou-se estudar a eficiência de um sistema híbrido de sistemas alagados construídos na remoção de matéria orgânica e nutrientes de uma indústria de laticínios.

Método

O experimento foi realizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - *Campus* Londrina, sendo realizado no período de 90 dias (novembro de 2014 a fevereiro de 2015). O sistema foi confeccionado com duas caixas de polipropileno de dimensões de 0,36 x 0,20 x 0,26 m. Cada caixa foi conectada em série (adaptado de Begosso, 2009), sendo a primeira um SAC de fluxo horizontal contendo como substrato brita no 0 (malha de 12mm) com a espécie vegetal *Cyperus papyrus nanus* (mini papiro ou papiro anão) plantada; o segundo SAC de fluxo vertical contendo areia média (de 0,42 mm a 1,2 mm) com a espécie vegetal *Heliconia psittacorum* (helicônia-papagaio).

As caixas foram envolvidas com papel alumínio para evitar a proliferação de algas e os sistemas foram interligados por tubulações. O dimensionamento do sistema foi associado a uma taxa média de aplicação de DQO – Demanda Química de Oxigênio (Kadlec & Wallace, 2009).

O sistema foi alimentado em ciclos de 24 horas com volume de 8 Litros de efluente clarificado do sistema de flotação por ar dissolvido de indústria de laticínio localizada na cidade de Londrina, Paraná.

Neste local são produzidos leite do tipo UHT (*Ultra High Temperature*), leite pasteurizado, bebida láctea pasteurizada, queijo tipo mussarela, leite em pó, soro de leite e leite concentrado. O descarte de soro não é realizado na estação de tratamento de efluentes (ETE) da indústria devido à alta carga orgânica característico desse resíduo.

As análises das variáveis foram realizadas no Laboratório de Saneamento e no Laboratório de Tecnologias de Conversão de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Londrina de acordo com o *Standard*

Methods for The Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012) em conformidade com o quadro 01.

Quadro 01: Metodologias de análise

Análise	Referência	Interferências
Demanda Química de Oxigênio (DQO) (mg.L ⁻¹)	Método 5220 A	Passível de interferências com o Cloreto.
Nitrogênio Total <i>Kjeldahl</i> (NTK) (mg.L ⁻¹)	Método 4500-Norg B	Grandes concentrações de sais podem elevar a temperatura de digestão acima de 400°C, com pirólise do Nitrogênio.
Fósforo Total (P-total) (mg.L ⁻¹)	Método 4500-P A	Arsenatos reagem com o molibdato produzindo uma cor similar ao azul.

Fonte: APHA (2012)

Para avaliar diferenças significativas entre as eficiências global, intermediária e final dos SAC(s) de fluxo horizontal e vertical foi utilizado o teste estatístico de análise de variância ANOVA e pós-teste de Kruskal-Wallis, com significância $p < 0,005$. Este teste também avaliou a importância do sistema em série para a remoção de nutrientes e matéria orgânica com o SAC de fluxo vertical. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do *software* BioEstat versão 5.0.

Resultados e Discussão

O SAC foi utilizado como tratamento secundário do efluente da Indústria de laticínios basicamente composto: de água; de produtos químicos (ácidos e alcalinos) utilizados no procedimento de limpeza e desinfecção de superfície e equipamentos (Forni, 2007), de resíduos da produção de leite e de algum vazamento ocorrido no processo, com possibilidade de aumento de resíduos de gordura.

O sistema de tratamento da indústria (flotação por ar dissolvido seguido de sistema de lodos ativados) apresentava problemas, principalmente quanto à remoção de nutrientes para atendimento a Resolução CONAMA 357 (Brasil, 2005).

O uso de SAC híbrido neste estudo visou avaliar a possibilidade de implantação na ETE da indústria de laticínios como um sistema de tratamento complementar ou como substituição do sistema de lodos ativados para minimizar o consumo energético e aumentar a eficiência de remoção de nutrientes.

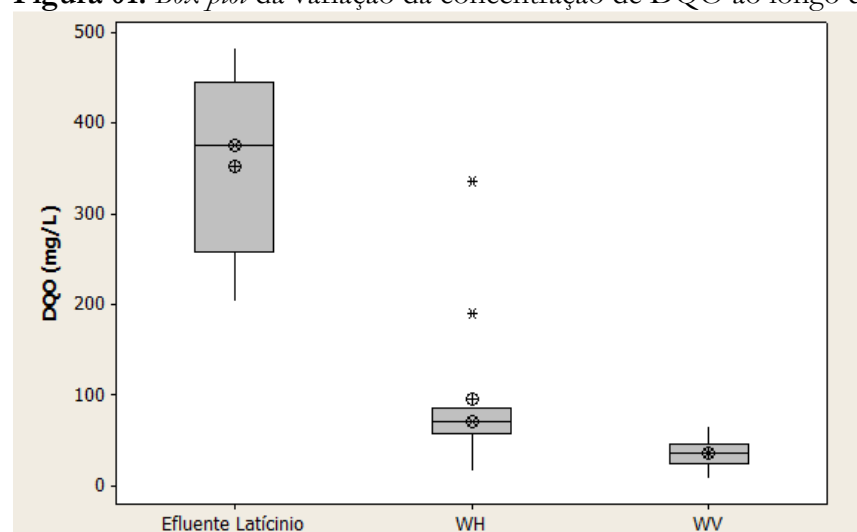
As variáveis DQO, NTK e P-total foram avaliadas na entrada, após o SAC horizontal e no final do sistema (após o SAC vertical) durante o tempo de aproximadamente 90 dias.

Remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A concentração de matéria orgânica medida na forma de Demanda Química de Oxigênio variou de 200 a 460 mg.L⁻¹ na entrada do sistema de SAC, dependendo das características operacionais que foi gerado pelo efluente coletado na indústria de laticínios.

O efluente de laticínio possui uma variabilidade relativamente pequena na sua composição, com coeficiente de variação para a DQO igual a 0,27 e média de concentração de 375±100 mg.L⁻¹. Na figura 01 podem ser observadas as variações de DQO para o efluente bruto (efluente de laticínio), SAC horizontal (WH) e SAC vertical (WV).

Figura 01: *Box plot* da variação da concentração de DQO ao longo do sistema.



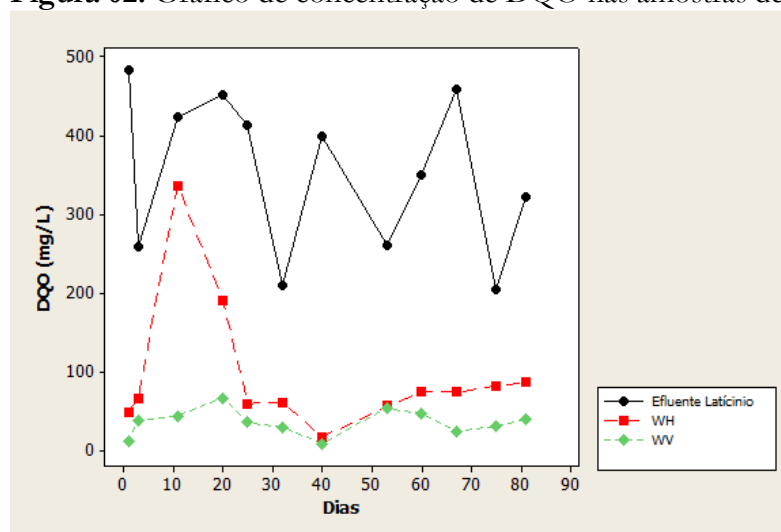
Elaborado pelos autores.

O sistema de fluxo horizontal apresentou variabilidade maior que a do efluente com coeficiente de variação igual a 1,23 e média igual a $70 \pm 86 \text{ mg.L}^{-1}$. Porém, em duas semanas amostrais, a concentração da amostra tratada no SAC horizontal extrapolou a sua variabilidade normal, provavelmente pelo arraste de material orgânico.

Nesses casos, o sistema de fluxo vertical regularizou e diminuiu a variabilidade das concentrações de DQO finais. O SAC vertical apresentou um coeficiente de variação para DQO muito menor do que o horizontal com coeficiente de variação igual a 0,45 e média igual $37 \pm 16 \text{ mg.L}^{-1}$.

Na figura 02 podem ser observadas as variações de DQO ao longo do tempo para o efluente bruto (efluente de laticínio), SAC horizontal (WH) e SAC vertical (WV).

Figura 02: Gráfico de concentração de DQO nas amostras de entrada, intermediária e saída.



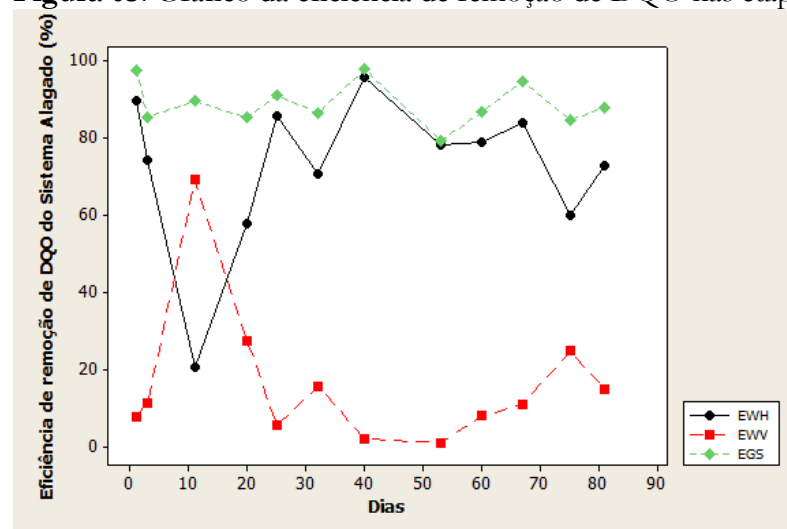
Elaborado pelos autores.

Durante o período de tratamento, a eficiência de remoção do sistema apresentou valores de DQO menores que 67 mg.L^{-1} , porém entre os dias 15 e 30, o SAC de fluxo horizontal apresentou valores de DQO superiores a este valor, ressaltando a importância do sistema híbrido, ou seja, associado ao SAC vertical.

O SAC de fluxo vertical apresentou valores relativamente baixos de DQO, com o menor valor correspondente a 8 mg.L^{-1} . Nota-se que a remoção de DQO ocorre principalmente no primeiro SAC de fluxo horizontal. O SAC de fluxo vertical tem a função destacada como complemento para diminuição da variabilidade de DQO.

Na figura 03 é expressa a eficiência global do sistema e a contribuição dos SACs horizontal (EWH) e vertical (EWV) para obtenção desta eficiência total. Observa-se que a eficiência global (EGS) nos 90 dias variou entre 73,1 a 97,7%.

Figura 03: Gráfico da eficiência de remoção de DQO nas etapas do sistema.



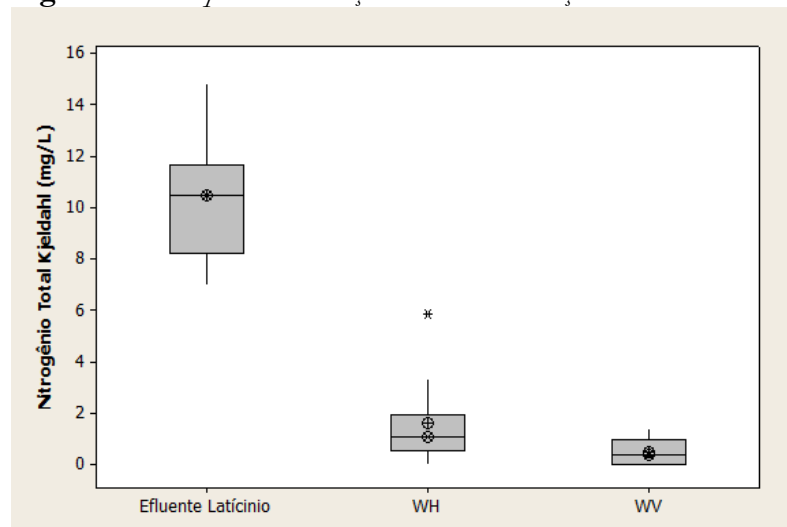
Elaborado pelos autores.

A contribuição global da eficiência do SAC horizontal para o sistema variou entre 20,5 a 96%, porém a maioria dos valores foi predominantemente maior que 60%. Em contrapartida, a contribuição do SAC vertical para a eficiência global apresentou valores entre 4,4 a 86,9%, sendo que a maioria dos valores permaneceu menor que 30%.

Remoção de Nitrogênio (NTK)

A figura 04 representa a variação da concentração do NTK durante os 90 dias do experimento. O efluente de entrada apresentou baixa variabilidade com valor de 0,23 e concentrações entre 7 a 15 mg.L⁻¹. A concentração média de NTK foi de 11±10 mg.L⁻¹.

Figura 04: *Box plot* da variação da concentração de NTK ao longo do sistema.



Elaborado pelos autores.

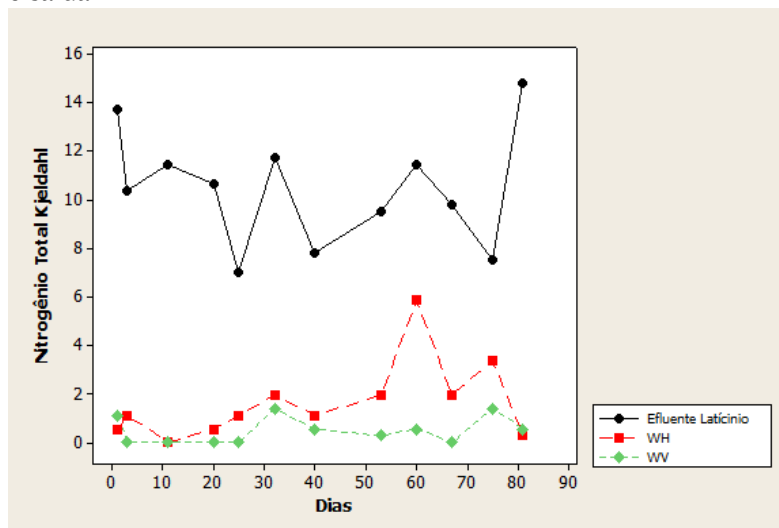
As amostras do efluente intermediário apresentaram um coeficiente de variação alto com valor de 1,44, devido a uma amostra com concentração mais elevada de 6 mg.L⁻¹. Porém o valor médio de NTK no SAC horizontal foi de 1,12±1,62 mg.L⁻¹. O SAC de fluxo vertical apresentou valor de concentração médio de 0,42±0,55 mg.L⁻¹.

O *Box plot* da concentração de NTK ao longo do sistema de tratamento por SAC de fluxo horizontal e vertical indica comportamento semelhante ao da DQO, ou seja, apresentam valores de máximo e mínimo distantes da média e no SAC horizontal a variabilidade aumenta.

A concentração de NTK do efluente da indústria de laticínios variou de acordo com as características do efluente coletado. Na figura 05, observa-se que a remoção de NTK intermediária (SAC fluxo horizontal) e de saída (SAC fluxo

vertical) variaram em conformidade com a concentração de entrada em pontos de pico.

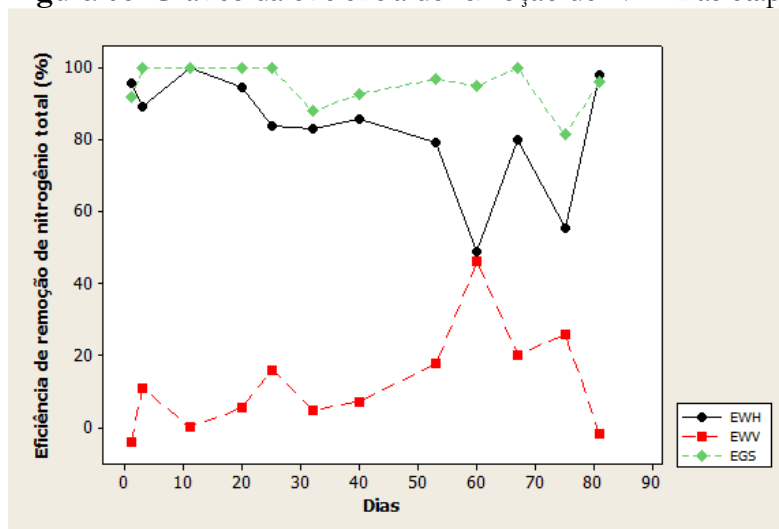
Figura 05: Gráfico da variação na concentração de NTK nas amostras de entrada, intermediária e saída.



Elaborado pelos autores.

A eficiência do SAC híbrido conectado em série pode ser considerada elevada para a remoção de NTK, com a eficiência global variando de 81,5 a 100% (figura 06).

Figura 06: Gráfico da eficiência de remoção de NTK nas etapas do sistema.



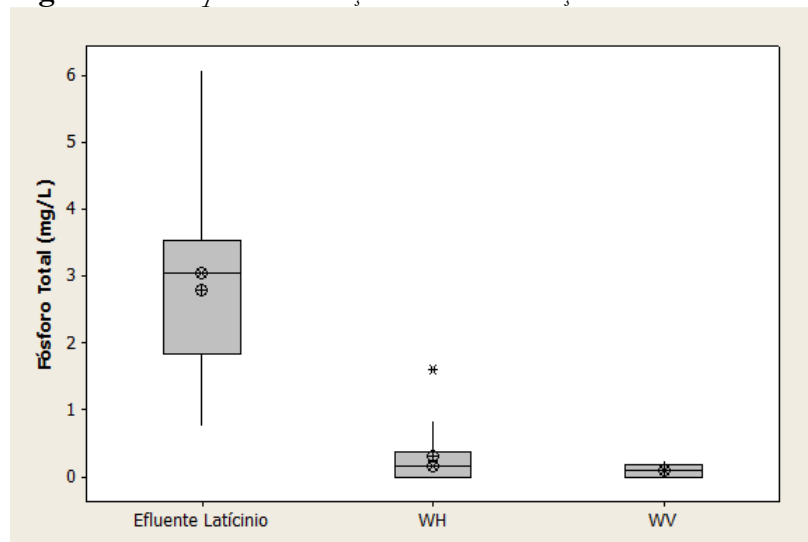
Elaborado pelos autores.

Mendonça *et. al.* (2012) retrata uma remoção menor para um sistema de fluxo horizontal tratando efluente de laticínio, com a eficiência entre 46 a 79%. Já Silva (2010) obteve uma eficiência de remoção de NTK similar ao sistema híbrido estudado, com um sistema de fluxo subsuperficial horizontal a eficiência foi de 88,56%. Novamente a eficiência de remoção do SAC de fluxo horizontal foi maior que a do SAC vertical.

Remoção de Fósforo (P-total)

No efluente de laticínio as concentrações de P-total tiveram grande variação (figura 07). As concentrações de P-total na entrada variaram de 0,75 a 6,10 mg.L⁻¹, sendo a concentração média de $3,06 \pm 1,46$ mg.L⁻¹. O coeficiente de variação na entrada foi baixo com valor de 0,48.

Figura 07: Box plot da variação da concentração de P-total ao longo do sistema.



Elaborado pelos autores.

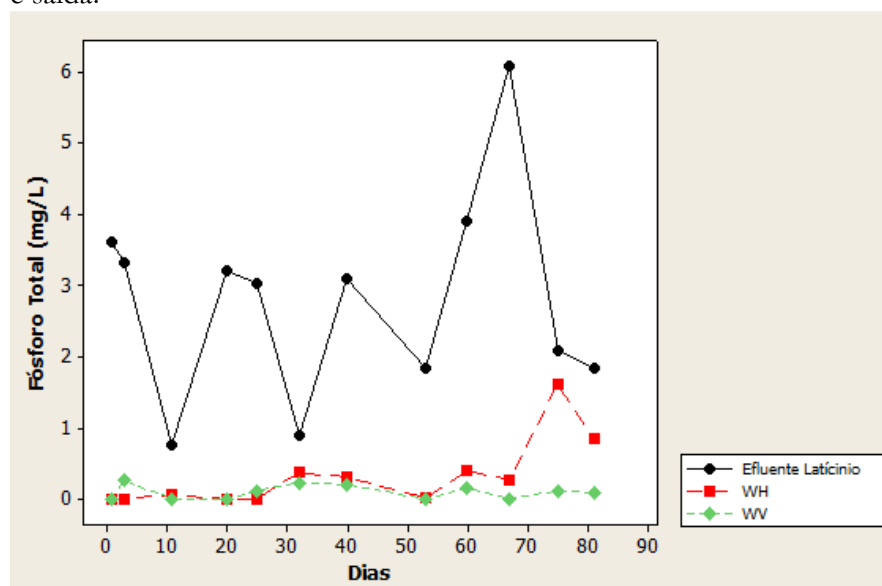
No SAC horizontal a concentração variou de 0 a 1,61 mg.L⁻¹ e a variabilidade desse ponto do sistema foi de 1,49. A concentração média foi de $0,16 \pm 0,48$ mg.L⁻¹.

Na saída do SAC vertical a concentração teve uma variação menor comparada ao SAC horizontal, de 0 a 0,26 mg.L⁻¹, com o valor médio de $0,1 \pm 0,1$ mg.L⁻¹. O coeficiente de variação nesse ponto para P-total foi de 1,02.

A variação na concentração de P-total no sistema ocorreu de forma similar a DQO e ao NTK.

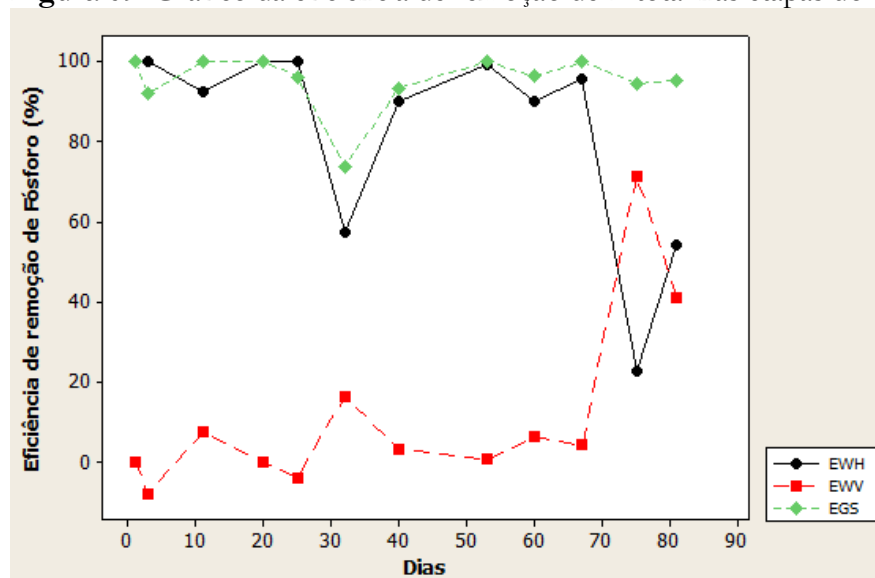
Os valores de concentração de P-total no efluente de laticínios alcançaram valores de até 6 mg.L^{-1} (figura 08). Porém, como nutriente limitante da eutrofização de corpos hídricos, sua remoção é de suma importância no tratamento de efluentes. Assim, o SAC de fluxo horizontal e vertical removeram significativamente o P-total presente neste tipo de efluente visando atender padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005) que determina uma concentração de $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$ de fósforo total como padrão de qualidade de corpos hídricos.

Figura 08: Gráfico da variação de concentração de P-total nas amostras de entrada, intermediária e saída.



Elaborado pelos autores.

A remoção de P-total apresentado na figura 09 indica que a melhor eficiência de remoção prevaleceu no SAC horizontal, com a eficiência global de até 100% quando considerado o SAC híbrido. Mendonça *et al.* (2012) apresentou eficiência média na remoção do fósforo de 34,3%.

Figura 09: Gráfico da eficiência de remoção de P-total nas etapas do sistema.

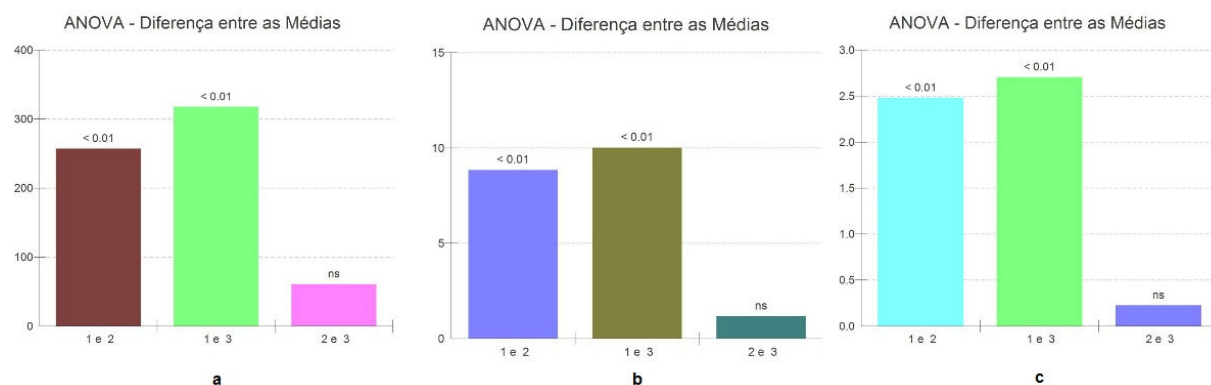
Elaborado pelos autores.

A remoção de nutrientes e de matéria orgânica do efluente de laticínio tratado por sistema alagado construído de fluxo horizontal seguido de um fluxo vertical apresentou resultados de remoção de DQO e nutrientes elevadas durante os 90 dias em que o experimento foi operado. Este sistema alcançou eficiências máximas próximas a 100% nas remoções de DQO, NTK e P-total.

Comparação da eficiência de remoção da DQO, NTK e P-TOTAL

Para verificar a diferença entre a remoção da DQO, NTK e P-total, aplicou-se a análise de variância pelo teste de Kruskal-Wallis, pois as médias eram desiguais o que indica a necessidade de teste não-paramétrico. Na figura 10 pode-se observar a semelhança no comportamento de remoção dos 3 fatores, sendo que 1 representa o efluente da indústria de laticínio, 2 o SAC de fluxo horizontal e 3 o SAC de fluxo vertical.

Figura 10: a) Diferença da eficiência de remoção de DQO no sistema; b) Diferença da remoção de NTK no sistema e c) Diferença de remoção de P-total no sistema.



Elaborado pelos autores.

Entre 1 e 2 e 1 e 3, o valor de p é menor que 0,05, ou seja, existe diferença significativa entre as concentrações das amostras. Já a comparação entre 2 e 3 indica que não há diferença significativa nas amostras coletadas no ponto intermediário (SAC de fluxo horizontal) e na saída do sistema (SAC de fluxo vertical). Nesse caso, estatisticamente, o fluxo vertical seria desnecessário para o sistema global.

As análises estatísticas indicaram que não houve diferença significativa entre as remoções de nutrientes e matéria orgânica entre o SAC de fluxo horizontal e o SAC de fluxo vertical, ou seja, o SAC horizontal que utiliza brita zero como substrato e onde foi cultivada a espécie *Cyperus papyrus nanus*, foi responsável por remover a maioria dos contaminantes do efluente e seu papel no tratamento global foi predominante. Já o SAC de fluxo vertical, composto de areia com a espécie *Heliconia psittacorum* apresentou valores de remoção auxiliar não significativa.

Porém, ao avaliar as variações do sistema, observa-se que a presença do SAC vertical é importante como fator de segurança e confiabilidade do SAC híbrido, pois a variação dos valores de DQO, NTK e P-total no SAC vertical são menores que no SAC horizontal. Desta forma, valores extremos pontuais no SAC horizontal podem ser regularizados e minimizados no SAC vertical.

Conclusão

Este trabalho apresentou como principais conclusões:

- A inexistência de diferença significativa entre os valores de DQO, NTK e P-total após a remoção ocorrida no SAC horizontal com os valores apresentados no SAC vertical;
- O sistema de SAC horizontal seguido de SAC vertical apresentou valores de remoção de DQO, NTK e P-total elevados, comparado a outros estudos similares, o que promove possibilidade de tratamento por SAC híbrido no tratamento de efluentes de indústrias de laticínios visando minimizar o descarte de nutrientes em corpos hídricos;
- A análise do sistema indicou que apesar da baixa eficiência de remoção global do SAC de fluxo vertical, este compartimento é importante no sistema híbrido para diminuir a variabilidade e aumentar a confiabilidade do processo de tratamento.
- As espécies de plantas utilizadas foram eficientes na remoção de nutrientes e matéria orgânica, além de necessitarem de pouca manutenção durante o período do estudo.

Referências

ABRAHÃO, S. S. **Tratamento de água residuária de laticínios em sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras**. 2006. 110f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

AMERICAN Public Health Association. **Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater**. 22 ed. Washington: APHA, 2012.

BEGOSSO, L. **Determinação de parâmetros de projeto e critérios para dimensionamento e configuração de *wetlands* construídas para tratamento de água cinza**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

BRASIL. Resolução CONAMA N° 357 de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 18 mar. 2005. N° 053, p. 58-63.

FORNI, R. **Projeto mecânico de um sistema de higienização CIP (Cleaning in Place)**. 2007. 114f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2007.

GOMES, A. L. **Análise técnico-econômica de filtro anaeróbio utilizado para o tratamento de efluentes líquidos de uma indústria de laticínios: estudo de caso**. 2006. 117f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2006.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment Wetlands**. 2. Ed., 2009.

MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; PEREIRA, O. G. Desempenho agrônômico de capim napier (*pennisetum purpureum*) cultivado em sistemas alagados construídos. **Engenharia na agricultura**, Viçosa - MG, v.19, n.5, p. 469-477 p, setembro / outubro. 2011. Disponível em: <<http://migre.me/pDvmN>>. Acesso em: 01 de outubro de 2014.

MENDONÇA, H. V.; RIBEIRO, C. B. M.; BORGES, A. C.; BASTOS, R. R. Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de laticínios por sistemas alagados construídos operando em bateladas. **Revista Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 75-87, 2012. Disponível em: <<http://migre.me/pDvk9>>. Acesso em: 15 de outubro de 2014.

SILVA, A. C. F. M. **Tratamento de resíduos líquidos de laticínios em Reator Anaeróbio Compartimentado seguido de Leitos Cultivados**. 2010. 166f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas/SP, 2010.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Revista Estudos Avançados**. São Paulo, v. 22, n. 63, 2008.

WALLACE, S. D. Application of Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment. In: 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Venice, **Anais eletrônicos...** Italy, 2010. Disponível em: <<http://migre.me/pDvlv>>. Acesso em: 20 de Outubro de 2014.