

Balanço de fósforo e nitrogênio em leitos cultivados com *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms

*Phosphorus and nitrogen balance in constructed wetlands with *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms*

Julyenne Meneghetti Campos^{1*} , José Teixeira Filho¹ 

RESUMO

O descarte incorreto de resíduos, mesmo após tratamento, pode causar impactos negativos nos corpos d'água receptores. Em especial, substâncias como nitrogênio e fósforo podem se tornar, em função de suas concentrações, tóxicas para os organismos aquáticos ou produzir condições favoráveis à proliferação de vegetação, que podem iniciar os processos de eutrofização. Leitos cultivados são sistemas de tratamento de esgoto construídos com a finalidade de imitar a estrutura das *wetlands* naturais, promovendo mecanismos de fitorremediação. Apesar de a *Eichhornia crassipes* ser uma planta invasiva causadora de problemas em rios e lagos eutrofizados, seu uso pode ser interessante em leitos cultivados, pois é uma planta ornamental, o que aumentará a aceitação do sistema de tratamento de águas residuárias, além de poder ser reutilizada no artesanato, na produção de biocombustível e na alimentação animal. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou avaliar a eficiência de retenção/remoção de fósforo total e nitrogênio total Kjeldahl (NTK) presentes em águas residuárias a partir de dois leitos de fluxo subsuperficial horizontal cultivados com *Eichhornia crassipes*, com diferença de 43 dias de cultivo entre eles, fixados a um meio suporte. As concentrações de fósforo total variaram de 4,5 a 51 mg.L⁻¹ no afluente e de 3,2 a 4,4 mg.L⁻¹ no efluente dos leitos cultivados, enquanto as concentrações de NTK variaram de 95,9 a 104,7 mg.L⁻¹ no afluente e de 77,5 a 85,3 mg.L⁻¹ no efluente.

Palavras-chave: aguapé; escala horária; macronutrientes; balanço de massa.

ABSTRACT

Improper disposal, even after treatment, of wastewater can cause negative impacts on receiving water bodies. Particularly, substances such as nitrogen and phosphorus can become, depending on their concentrations, toxic to aquatic organisms or produce favorable conditions for the proliferation of a vegetation that can start the process of eutrophication. Constructed wetlands are a wastewater treatment built to mimic the structure of natural wetlands, promoting mechanisms of phytoremediation. Despite *E. crassipes* be an invasive plant which causes problems in eutrophic lakes and rivers, its use may be interesting in wetlands because it is an ornamental plant, which will increase wastewater treatment system's acceptance, and it can be reused in crafts, in biofuel production and in animal feed. In this context, the present study aimed to evaluate the efficiency of the retention/removal of total phosphorus and Kjeldahl nitrogen (TKN) present in wastewater by two subsurface horizontal flow constructed wetland system cultivated with *Eichhornia crassipes*, with a difference of 43 days of cultivation, fixed to a support medium. The concentrations of total phosphorus ranged from 4.5 to 51 mg.L⁻¹ in the affluent and from 3.2 to 4.4 mg.L⁻¹ in the effluent of constructed wetlands, whereas NTK concentrations ranged from 95.9 to 104.7 mg.L⁻¹ in the affluent, and from 77.5 to 85.3 mg.L⁻¹ in the effluent.

Keywords: water hyacinth; time scale; macronutrients; mass balance.

INTRODUÇÃO

Leitos cultivados são sistemas de tratamento de esgoto construídos com a finalidade de imitar a estrutura das *wetlands* naturais, transformando bioquimicamente os poluentes por meio de micro-organismos e promovendo mecanismos de fitorremediação (ITRC, 2003). Os leitos cultivados apresentam algumas vantagens no tratamento de águas superficiais (LI *et al.*, 2018) e residuárias, tais como: operação e manutenção menos complexas, adequados para implantação em comunidades pequenas e isoladas; menor produção de resíduos secundários do processo; baixos

custos de operação e manutenção; criação de um habitat protegido para espécies animais; incorporação à paisagem local; e menor rejeição da população próxima a esses sistemas (DOTRO *et al.*, 2017; USEPA, 1988). Esse tipo de sistema é considerado como tratamento secundário ou terciário (polimento). Nos leitos cultivados, as regiões próximas ao sistema radicular são aeróbias (por conta da transferência de oxigênio pelas macrófitas) e as regiões mais afastadas são anaeróbias, proporcionando, assim, tratamento aeróbio e anaeróbio pelos diferentes micro-organismos existentes nessas duas regiões de um mesmo leito (DING *et al.*, 2018).

¹Universidade Estadual de Campinas - Campinas (SP), Brasil.

*Autor correspondente: julyenne.mc@gmail.com

Recebido: 16/04/2014 - Aceito: 25/01/2018 - Reg. ABES: 133600

O descarte incorreto de resíduos, mesmo após tratamento, pode causar impactos negativos nos corpos d'água receptores. Em especial, substâncias como nitrogênio e fósforo podem se tornar, em função de suas concentrações, tóxicas para os organismos aquáticos ou produzir condições favoráveis à proliferação de vegetação, que podem iniciar os processos de eutrofização (ITRC, 2003). Nos leitos cultivados, o nitrogênio pode estar presente em forma orgânica ou inorgânica. Na forma orgânica, o nitrogênio pode ocorrer em compostos como ureia, aminoácidos, aminas, purinas e pirimidinas; na forma inorgânica, em compostos como amônia, nitrito, nitrato, nitrogênio gasoso e óxido de nitrogênio (KADLEC & WALLACE, 2009). De acordo com Vymazal & Kröpfelová (2008), as macrófitas são capazes de absorver nitrogênio na forma de amônia, nitrato e aminoácidos e, segundo GIZ (2011), a remoção de concentração de amônia do esgoto durante o período vegetativo das macrófitas em um leito cultivado fica em torno de 10 a 20%. Algumas espécies têm a capacidade de absorver nitrato pelo sistema radicular e transportá-lo até as folhas, onde será convertido na forma de amônia sob luz solar. A assimilação de nitrogênio e fósforo pelas macrófitas ocorre mais rapidamente no início do crescimento da planta, reduzindo-se ao longo do seu desenvolvimento (DOTRO *et al.*, 2017), e varia de acordo com o tipo de macrófita utilizado e sua produção de biomassa (KONNERUP; KOOTTATEP; BRIX, 2009; WU *et al.*, 2016).

O fósforo é um nutriente essencial para o crescimento de plantas e animais, entretanto suas elevadas concentrações na água podem contribuir para os processos de eutrofização (USEPA, 1999). Esse nutriente pode estar presente em leitos cultivados na forma de fosfato orgânico, fosfolipídios, ácidos nucleicos, nucleoproteínas, açúcares fosforilados, coenzimas e também na forma de fosfato inorgânico, ortofosfatos, polifosfatos, entre outros (VYMAZAL & KRÖPFELOVÁ, 2008). Os mecanismos de remoção de fósforo em leitos cultivados ocorrem por meio de adsorção, sorção, precipitação, dissolução, mineralização, sedimentação, fragmentação e assimilação pelas macrófitas e por micro-organismos (DOTRO *et al.*, 2017; GIZ, 2011; ITRC, 2003; USEPA, 1999; VYMAZAL & KRÖPFELOVÁ, 2008).

De acordo com Lorenzi e Souza (2001), a *E. crassipes* é uma planta herbácea aquática flutuante com raízes densas, plumosas e escuras. Nativa da América tropical, inclusive do Brasil, mede de 20 a 50 cm de altura. Tem inflorescência no verão e reproduz-se em condições quentes, águas rasas e com altas intensidades de luz, não tolerando geadas. É uma macrófita flutuante com reprodução vegetativa rápida, com tempo de duplicação entre 13 e 20 dias, que ocorre por meio da multiplicação das mudas originadas dos estolões que a planta emite (CHAVAN & DHULAP, 2012; LORENZI & SOUZA, 2001). Apesar de a *E. crassipes* ser uma planta invasiva causadora de problemas em rios e lagos eutrofizados, seu uso pode ser interessante em leitos cultivados, pois, de acordo com Lorenzi e Souza (2001), é uma espécie ornamental, o que aumentará a aceitação do sistema de tratamento de águas residuárias. Além disso, pode ser reutilizada com valor comercial:

no Mato Grosso do Sul, por exemplo, os pecíolos da *E. crassipes* são utilizados para artesanato em uma comunidade (BORTOLOTTO & GUARIM NETO, 2005). Diversas pesquisas estudam também o uso da *E. crassipes* para produção de biogás e biocombustível (BULLER *et al.*, 2013; BERGIER *et al.*, 2012; WANG & CALDERON, 2012) e para alimentação animal (THAM, 2012; LU; FU; YIN, 2008).

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou avaliar a eficiência de retenção/remoção de fósforo e nitrogênio presentes em águas residuárias a partir de sistemas de leitos de fluxo subsuperficial horizontal cultivados com *Eichhornia crassipes*, fixados a um meio suporte, com diferença de 43 dias de cultivo entre os leitos.

METODOLOGIA

O projeto foi realizado no Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI/UNICAMP), em Campinas (SP), onde foi instalado um sistema de tratamento com leitos cultivados. O Campo Experimental está localizado na latitude S22048'57" e na longitude W47003'33", a 640 m de altitude.

Abastecimento do sistema de tratamento

O sistema de tratamento foi abastecido com esgoto proveniente da FEAGRI, que é formado pela junção de todo o esgotamento sanitário oriundo do prédio administrativo e do prédio das salas de aula, dos laboratórios, da oficina, da cozinha e da cantina. O fluxo do esgoto não é contínuo durante o dia, em função da diferenciação do uso, e nos fins de semana e nas férias escolares, quando o fluxo de circulação de pessoas é menor. A captação do esgoto é realizada à montante do sistema de tratamento para que o escoamento seja feito por gravidade, economizando, assim, energia elétrica. Na Figura 1, o sistema de tratamento de esgoto da FEAGRI é apresentado de forma esquemática.

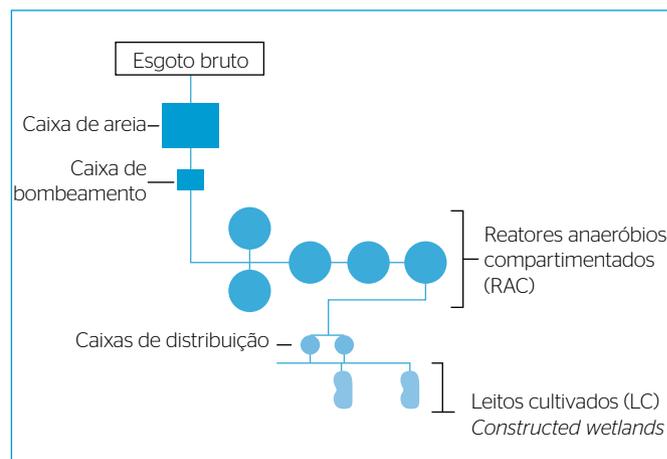


Figura 1 – Representação esquemática do sistema de tratamento de esgoto da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

O esgoto passa por tratamento primário em tanque de desarenação para a retirada de sólidos grosseiros e segue para uma caixa em fibrocimento com capacidade de 500 L. Dessa caixa, o esgoto é bombeado para tratamento secundário em reatores anaeróbios compartimentados (RACs) e, então, conduzido por gravidade até dois reservatórios plásticos (caixas de distribuição) com capacidade de 1.000 L cada, para ser distribuído para os dois leitos cultivados alvos do estudo.

Leitos cultivados

Os leitos foram montados com fluxo subsuperficial horizontal em um meio suporte de pedra de rocha basáltica com diâmetro médio entre 19 e 25 mm, preenchendo os leitos com aproximadamente 45 cm de altura. Um ensaio para determinar o volume de vazios foi realizado, com o material suporte obtendo valor de 50% do volume total. Nesse ensaio, colocou-se o meio suporte que seria utilizado nos leitos cultivados até a marcação de 2 L em uma proveta e adicionou-se água destilada. Em outra proveta foi medido o volume de água destilada que coube na proveta contendo o meio suporte. Em seguida, o volume foi anotado e o ensaio repetido por dez vezes. A média da quantidade de água comportada na proveta contendo o meio suporte foi tirada, obtendo-se o volume ocupado pela brita em uma proveta de 2 L, que correspondeu a 50% do volume total da proveta.

O Leito Cultivado Aguapé 1 (LCA1) teve o cultivo de 25 mudas de *E. crassipes* no dia 1º de julho de 2013 e foi instalado em reservatório de fibra de vidro com dimensões de 3,13 × 1,61 × 0,52 m de profundidade, 2,3 m³ de volume, 4,4 m² de área, 2.100 L de capacidade e 1.050 L de volume útil. O Leito Cultivado Aguapé 2 (LCA2) foi instalado em reservatório de fibra de vidro com dimensões de 3,20 × 1,75 × 0,55 m de profundidade, resultando em 2,5 m³ de volume, 4,6 m² de área, 2.500 L de capacidade e 1.250 L de volume útil. Após 43 dias do cultivo da macrófita no LCA1, no dia 13 de agosto de 2013, foram plantadas 25 mudas de *Eichhornia crassipes* no LCA2. Ambos os leitos foram submetidos a um tempo de detenção hidráulico (TDH) médio, no período de monitoramento, entre 2 e 3 dias, tendo em vista que um TDH menor provocará a diminuição do custo de construção de um leito cultivado (ITRC, 2003). Na Figura 2, observa-se o corte longitudinal de um leito de fluxo subsuperficial cultivado com *E. crassipes*, e

na Figura 3, o LCA1 no último dia de monitoramento. Neste trabalho definiu-se como período de monitoramento o intervalo entre o dia de plantio e o dia de corte e retirada da vegetação para cada leito.

Amostragem

A amostragem dos leitos cultivados foi realizada no período entre 19 de agosto e 27 de setembro de 2013 para o LCA2 e entre 9 e 27 de setembro de 2013 para o LCA1. O meio suporte dos reservatórios LCA1 e LCA2 foi instalado em junho de 2010 e utilizado em estudos anteriores, assim, o biofilme bacteriano já estava estabelecido no meio suporte. A coleta de amostras teve início logo após o plantio, sendo possível observar o efeito da instalação de novas plantas na remoção de nitrogênio e fósforo do esgoto pelo sistema dos leitos logo no princípio do experimento.

Pelo fato de o experimento ocorrer em uma instituição pública sem atividades no período noturno, a vazão de esgoto só existe no horário comercial. A tomada das vazões afluente e efluente ao leito foi feita pelo método direto, diariamente (segunda a sexta-feira), a cada duas horas, das 8h às 16h, assim como a coleta das amostras de esgoto.

Todas as amostras foram acondicionadas em frascos de 300 mL e armazenadas a 4°C até a realização das análises. A partir das amostras

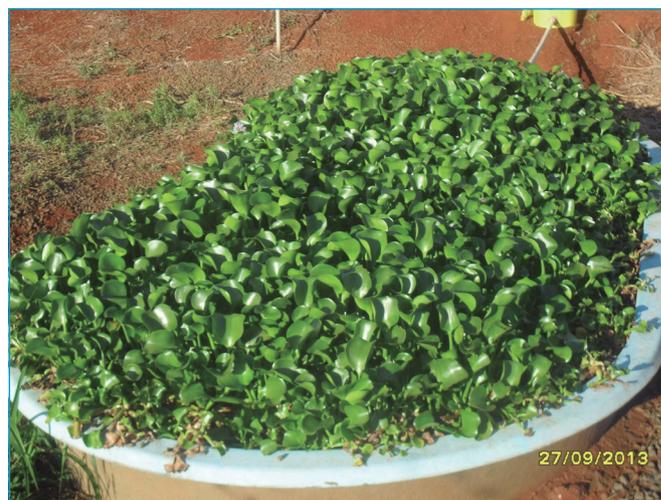


Figura 3 - Leito Cultivado Aguapé 1 no último dia de monitoramento (27 de setembro de 2013).

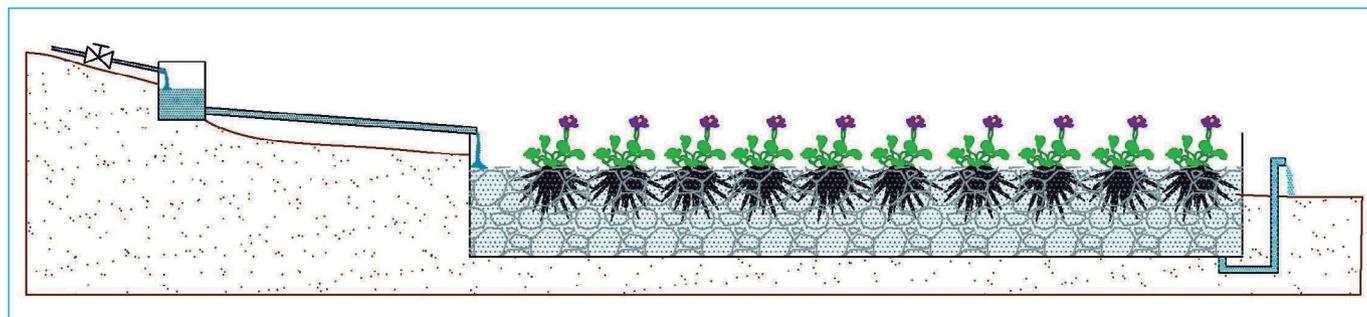


Figura 2 - Corte longitudinal de um leito de fluxo subsuperficial cultivado com *Eichhornia crassipes*.

coletadas na escala horária, foram preparadas as amostras de 500 mL (volume necessário para a realização de todas as análises laboratoriais), ou amostras de escala diária, que foram obtidas com base na Equação 1.

$$V_{hACi} = \frac{Q_{hi}}{(\sum Q_h \times V_{TAC})} \quad (1)$$

Em que:

V_{hACi} = o volume a ser coletado da amostra horária no instante i (mL);
 Q_{hi} = a vazão horária da amostra no instante i (mL.s⁻¹);
 $\sum Q_h$ = a somatória das vazões horárias do dia (mL.s⁻¹);
 V_{TAC} = o volume total desejado de amostra (mL).

Transpiração nos leitos cultivados

A transpiração nos leitos cultivados foi obtida a partir da diferença entre o volume total de água residuária que entrou no leito e o volume total de água residuária que saiu do leito. Neste trabalho não foi considerada a evaporação da água armazenada no leito, pois o nível de água permaneceu 7 cm abaixo da superfície do meio suporte, e a vegetação (*Eichhornia crassipes*) cobriu rapidamente toda a área do leito cultivado.

Variáveis monitoradas

Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Saneamento da FEAGRI/UNICAMP e seguiram *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2005). Para fósforo total foi escolhido o método do ácido ascórbico (4.500 – PE), utilizando digestão ácida em bloco digestor *Marconi* (Micro – MA 850/16) e espectrofotômetro *Hach* DR-4000U. Para nitrogênio total Kjeldahl (NTK) foram utilizados bloco digestor *Marconi* (Macro – MA 850/16) e destilador *Marconi* MA-036, analisados pelo método 4.500 *Nitrogen (Organic)*. O resultado das análises representa as concentrações médias diárias dos parâmetros.

Neste estudo foi realizado o balanço de carga mássica das variáveis fósforo e nitrogênio na escala diária, na entrada e saída dos leitos cultivados. A carga foi calculada de acordo com Von Sperling (2007), conforme a Equação 2:

$$K_{\text{parâmetro}} = V_{\text{parâmetro}} \times V_{\text{total}} \quad (2)$$

Em que:

$K_{\text{parâmetro}}$ = a carga diária do parâmetro de entrada ou saída do leito (g.dia⁻¹);
 $C_{\text{parâmetro}}$ = a concentração média diária do parâmetro de entrada ou saída do leito (mg.L⁻¹);
 Q_{total} = a vazão total diária de entrada ou saída do leito (L.dia⁻¹).

Eficiência da retenção dos nutrientes monitorados

A eficiência de retenção dos nutrientes monitorados foi calculada para os valores de concentração e carga na escala diária. A Equação

3 apresenta o cálculo da eficiência de retenção de concentração, e a Equação 4, o cálculo da eficiência de retenção de massa.

$$ERT_C = 100 - \left(\frac{C_{\text{saída}} \times 100}{C_{\text{entrada}}} \right) \quad (3)$$

Em que:

ERT_C = a eficiência de retenção de concentração do nutriente analisado (%);
 $C_{\text{saída}}$ = a concentração média diária do nutriente na saída do leito cultivado (mg.L⁻¹);
 C_{entrada} = a concentração média diária do nutriente na entrada do leito cultivado (mg.L⁻¹).

$$ERT_K = 100 - \left(\frac{K_{\text{saída}} \times 100}{K_{\text{entrada}}} \right) \quad (4)$$

Em que:

ERT_K = a eficiência de retenção da carga do nutriente analisado (%);
 $K_{\text{saída}}$ = a carga média diária do nutriente analisado na saída do leito cultivado (g.dia⁻¹);
 K_{entrada} = a carga média diária do nutriente analisado na entrada do leito cultivado (g.dia⁻¹).

Análise estatística

Os valores de eficiência de retenção da concentração e da carga dos nutrientes foram analisados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov com 5% de significância. Aos valores que se ajustaram a esse teste foi aplicada análise de variância (ANOVA) com 5% de significância. Já a eficiência de retenção entre os leitos foi analisada pelo teste de Tukey com 5% de significância. Todos os cálculos foram realizados com auxílio do *software* estatístico SPSS® versão 21.0.

Quantificação das fitomassas aérea e radicular

Ao final do período de monitoramento (11 de dezembro de 2013), toda a vegetação (partes aérea e radicular) foi retirada dos leitos para calcular o balanço de massa dos nutrientes nela retidos. A retirada de amostras da vegetação, ao longo do experimento, não foi realizada pelas limitações da área de plantio, que poderiam alterar as condições do leito. O material retirado foi separado entre parte aérea e parte raiz, as quais foram pesadas individualmente logo após a retirada (massa úmida). Uma amostra de cada parte foi coletada e pesada em balança *Marte* modelo AY-220. Essas amostras foram secas em estufa *FANEM*, modelo 320-SE, a 65°C até peso constante, seguindo metodologia descrita por Boaretto *et al.* (2009). Após resfriamento em dessecador, as

amostras foram pesadas (massa seca). Os valores amostrais de massa seca e umidade foram utilizados para calcular os valores totais de massa seca aérea e de raiz dos leitos.

Remoção de nutrientes

Neste estudo, definiu-se como remoção de fósforo e nitrogênio a quantidade total em massa desses nutrientes retirados a partir do corte da vegetação. As amostras de fitomassa seca (partes aérea e raiz) foram trituradas manualmente e enviadas ao Laboratório de Tecidos Vegetais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), para análise da quantidade dos nutrientes e outros macronutrientes absorvidos na vegetação dos leitos. Com os resultados das amostras calculou-se a quantidade total dos nutrientes removidos a partir das relações de massa seca e massa úmida retiradas do leito.

Simulação do balanço de massa dos valores dos nutrientes retidos no período de monitoramento

O balanço de massa dos nutrientes analisados nos leitos cultivados foi realizado a partir da elaboração de um modelo de simulação simplificado. O modelo considerou que as concentrações e os volumes médios diários de entrada e saída, calculados no período de amostragem, foram representativos em todo o período de monitoramento. Assim, a carga total do período de amostragem dos nutrientes de entrada e saída foi calculada pelo produto da concentração média diária, do volume médio diário e do número de dias úteis. O modelo considerou os dias úteis como segunda a sexta-feira, não levando em consideração sábados, domingos e feriados, quando a produção de esgoto era praticamente nula.

O volume total de esgoto de entrada e saída foi calculado a partir da integração dos valores diários medidos da vazão de esgoto. A média do volume total de esgoto de entrada e saída dos leitos nos dias de amostragem foi calculada e multiplicada pela média das concentrações de fósforo total e NTK obtidas no mesmo período. Multiplicando esse valor pelo número de dias de operação dos leitos, obteve-se o balanço de massa, ou seja, a quantidade total de fósforo e nitrogênio que entrou e saiu dos leitos em todo o período de operação. Esse cálculo pode ser visualizado nas Equações 5 e 6.

$$KP_{(entrada)} = [V_{\text{esgoto}(entrada)} \times CP_{(entrada)}] \times nd \quad (5)$$

Em que:

$KP_{(entrada)}$ = a carga diária total de entrada dos nutrientes analisados nos leitos (g);

$V_{\text{esgoto}(entrada)}$ = o volume médio diário de esgoto de entrada nos leitos (L);

$CP_{(entrada)}$ = a concentração média diária dos nutrientes de entrada nos leitos (mg.L^{-1});

nd = o número de dias de operação dos leitos cultivados (dias).

$$KP_{(saída)} = [V_{\text{esgoto}(saída)} \times CP_{(saída)}] \times nd \quad (6)$$

Em que:

$KP_{(saída)}$ = a carga total de saída dos nutrientes analisados nos leitos (g);

$V_{\text{esgoto}(saída)}$ = o volume médio de esgoto na saída dos leitos (L);

$CP_{(saída)}$ = a concentração média dos nutrientes na saída dos leitos (mg.L^{-1});

nd = o número de dias de operação dos leitos cultivados (dias).

Com os valores obtidos nas Equações 5 e 6, foi possível determinar a retenção dos nutrientes no período de monitoramento. As quantidades dos nutrientes retidos nos leitos foram calculadas a partir da diferença entre os valores de entrada/saída e a quantidade de nutrientes removidos pela vegetação (Equação 7) em cada leito. A quantidade de nutrientes removida pela vegetação foi obtida pela concentração de nitrogênio e fósforo (g.kg^{-1}) resultante da análise de macronutrientes nas macrófitas, multiplicada pela quantidade total de biomassa seca (aérea e radicular) retirada dos leitos.

$$\text{Retenção} = (KP_{\text{entrada}} - KP_{\text{saída}}) - M_{\text{nutriente}} \quad (7)$$

Em que:

Retenção = a quantidade total do nutriente que ficou no leito cultivado (g);

KP_{entrada} = a quantidade total do nutriente que entrou no leito cultivado (g);

$KP_{\text{saída}}$ = a quantidade total do nutriente que saiu do leito cultivado (g);

$M_{\text{nutriente}}$ = a quantidade total do nutriente que foi removido do leito pelas plantas (g).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quantidade de água residuária

Difícilmente são encontrados estudos que avaliam o desempenho dos leitos cultivados em escala horária ou a cada duas horas, como foi realizado neste experimento. A metodologia utilizada por Mohan *et al.* (2010) de coletas diárias em triplicata, das 8 às 8h30 e das 16 às 16h30, é a que mais se aproxima da aplicada neste estudo. Chavan e Dhulap (2012) realizavam coletas pontuais após quatro dias de detenção hidráulica, e Wang e Calderon (2012) faziam coletas quinzenais em uma lagoa com *E. crassipes*. Na Figura 4, observa-se a dinâmica horária da vazão de entrada e saída de esgoto no LCA1 nos dias 26 de setembro de 2013 (Figura 4A) e 27 de setembro de 2013 (Figura 4B), e, no LCA2, nos dias 26 de setembro de 2013 (Figura 4C) e 27 de setembro de 2013 (Figura 4D). Nessa figura, pode-se verificar que os valores de vazão são crescentes no início da manhã e decrescentes no final do dia, entretanto não existe padrão na variação ao longo do tempo. A distribuição dos valores de vazão nos dois leitos é randômica. Assim, há necessidade

de coletar amostras ao longo do dia para representar melhor o funcionamento dos leitos. Os valores diários dos volumes de entrada e saída foram calculados pela integração das vazões horárias.

As vazões diárias foram calculadas a partir dos volumes diários divididos pelo intervalo de operação do leito das 8 às 16h (Tabela 1). Os volumes diários de entrada e saída dos leitos foram utilizados para o cálculo dos valores transpirados e do TDH de cada leito. Observa-se, na Tabela 1, que a vazão no LCA1 foi em média 13% maior que no LCA2, o que resultou em um TDH médio 15% menor que o do LCA2. Grande parte das pesquisas que utilizaram *E. crassipes* trabalhou com vazões menores e TDH maiores do que os empregados neste estudo. Chavan e Dhulap (2012) trataram esgoto municipal em recipientes de 0,01 m³ com *E. crassipes* flutuante de fluxo superficial, utilizando TDH de 4 dias e vazão média de 0,5 L.h⁻¹. Jonas e Hussar (2010) utilizaram três recipientes com *E. crassipes* flutuante de 0,6 m³ cada e vazão de 5,2 L.h⁻¹, resultando em um TDH de 8 dias, enquanto Mohan *et al.* (2010) e Kumar *et al.* (2011), utilizando um tanque de macrófitas flutuantes (*Eichhornia crassipes* + *Cyphoma gibbosum* + algas) de 0,02 m³ e areia de lagoa como meio suporte, mantiveram vazão afluente de 0,8 L.h⁻¹. O TDH de 7 a 12 dias foi utilizado em um leito de superfície livre de aproximadamente 1.000 m³, com vazão afluente de 100 m³.d⁻¹, cultivado com *E. crassipes* e *Typha domingensis* por Maine *et al.* em

2009. Altos valores de TDH também podem inviabilizar um sistema de tratamento desse tipo por necessidade de grandes áreas de instalação, o que pode se tornar economicamente inviável.

A maior transpiração média ocorreu no LCA1, com 152 L.d⁻¹, 55% maior que no LCA2, e a maior média de lâmina d'água transpirada também ocorreu no LCA1, com 35 mm.d⁻¹, 49% maior que no LCA2 (Tabela 1).

O maior fluxo de transpiração e lâmina d'água transpirada ocorreu no LCA1 por receber o plantio da vegetação 43 dias antes, produzindo densidade de folhas maior que o LCA2 (Tabela 1). Konnerup, Koottatep e Brix (2009) observaram, em leitos cultivados de fluxo subsuperficial com 2 m³, altura média da lâmina d'água transpirada de 28 mm.dia⁻¹ para *Canna × generalis* L. Bailey e de 8 mm.dia⁻¹ para *Heliconia*

Tabela 1 - Vazão média diária afluente, tempo de detenção hidráulica, transpiração e lâmina d'água transpirada médios dos leitos cultivados no período de amostragem.

Leito	Vazão (L.h ⁻¹)	TDH (dias)	Transpiração (L.dia ⁻¹)	Lâmina d'água transpirada (mm.dia ⁻¹)
LCA1	54,0	2,2	152,0	35,0
LCA2	47,1	2,6	68,0	18,0

TDH: tempo de detenção hidráulica; LCA1: Leito Cultivado Aguapé 1; LCA2: Leito Cultivado Aguapé 2.

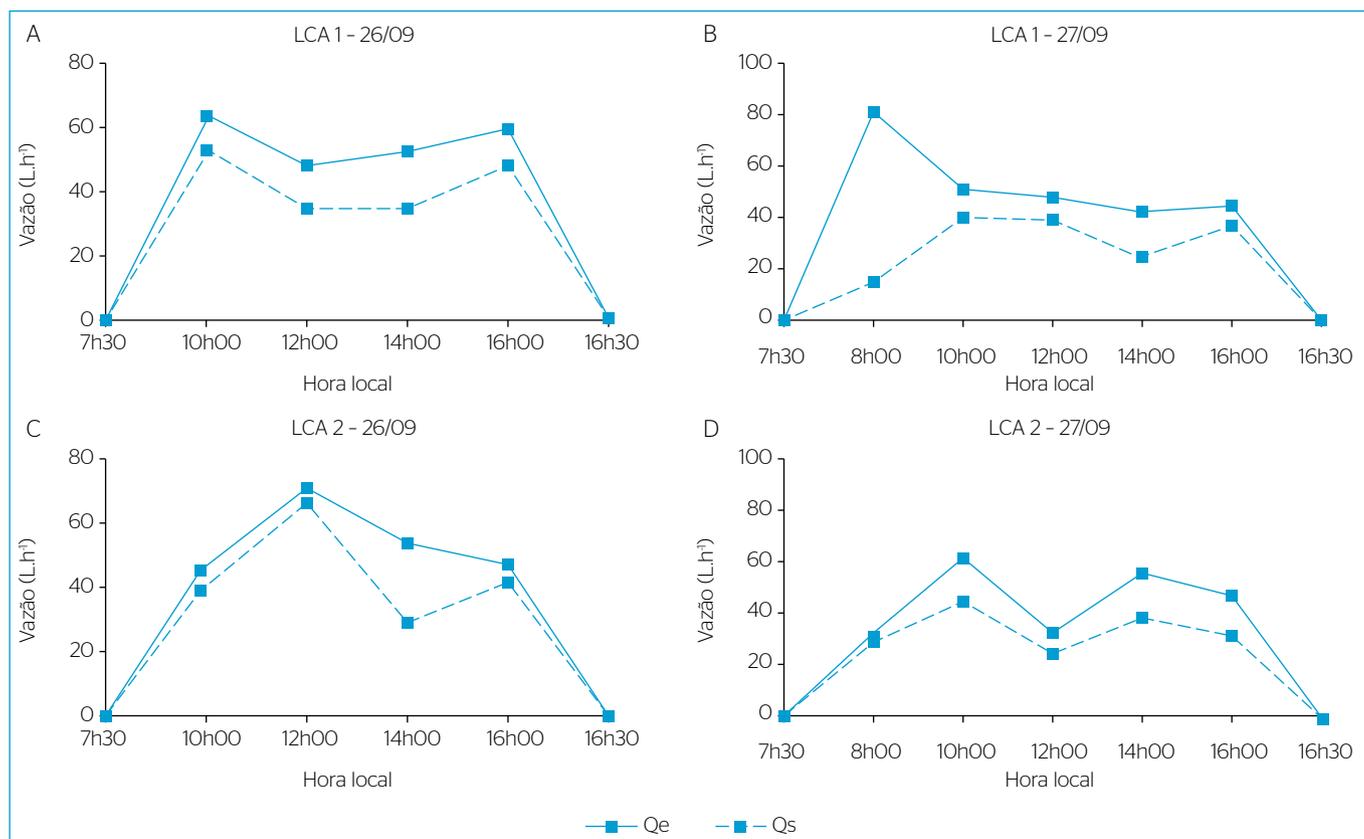


Figura 4 - Comportamento da vazão de entrada e saída de esgoto no Leito Cultivado Aguapé 1 (LCA1) nos dias (A) 26 de setembro de 2013 e (B) 27 de setembro de 2013 e no Leito Cultivado Aguapé 2 (LCA2) nos dias (C) 26 de setembro de 2013 e (D) 27 de setembro de 2013.

psittacorum L.f. × *H. Spathocircinata* na Tailândia. Os leitos cultivados possuíam volume próximo ao deste estudo e os valores encontrados de transpiração para *Canna × generalis* L. Bailey foram os que mais se aproximaram aos desta pesquisa com *Eichhornia crassipes* para o LCA2. Weber e Legge (2013) estudaram três leitos de fluxo vertical cultivados com *Phragmites australis* e três sem vegetação com volume de 0,17 m³, obtendo média de lâmina d'água transpirada de 0,66 mm.dia⁻¹ nos leitos vegetados e 0,35 mm.d⁻¹ nos leitos sem vegetação.

Retenção de nutrientes

Os nutrientes discutidos a seguir são NTK e fósforo total, os quais foram analisados em valores de concentração e carga. Na Tabela 2 são apresentadas as concentrações e cargas médias diárias de fósforo

total e NTK no LCA1 e no LCA2 durante o período de amostragem. Observa-se, para ambos os nutrientes, tanto em concentração quanto em carga, que, apesar de as médias de entrada no LCA1 serem maiores que no LCA2, as médias de saída são menores, evidenciando maior eficiência de retenção pelo leito mais desenvolvido.

Na Figura 5A são apresentados os valores médios de retenção de NTK (mg.L⁻¹), que foram de 23,6% para o LCA1 e de 9,6% para o LCA2. Os valores mínimos ocorreram quando houve acúmulo de 12,9% para o LCA2 e de 15,9% para o LCA1 na saída do sistema. Para o LCA1, a máxima retenção foi de 55,1%, enquanto para o LCA2 a máxima foi de 36,6%. Utilizando comparação múltipla de Tukey, o LCA1 obteve o maior desempenho para retenção de concentração de NTK, com maior média de eficiência (p = 0,021). Na Figura 5B são apresentadas

Tabela 2 - Concentrações e cargas médias diárias de fósforo total e de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) no Leito Cultivado Aguapé 1 (LCA1) e no Leito Cultivado Aguapé 2 (LCA2) durante o período de amostragem.

	Fósforo (mg.L ⁻¹)		Fósforo (g.dia ⁻¹)		NTK (mg.L ⁻¹)		NTK (g.dia ⁻¹)	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
LCA1	5,1	3,2	2,7	1,2	104,7	77,5	55,0	29,0
LCA2	4,5	4,4	1,9	1,6	95,9	85,3	39,5	30,5

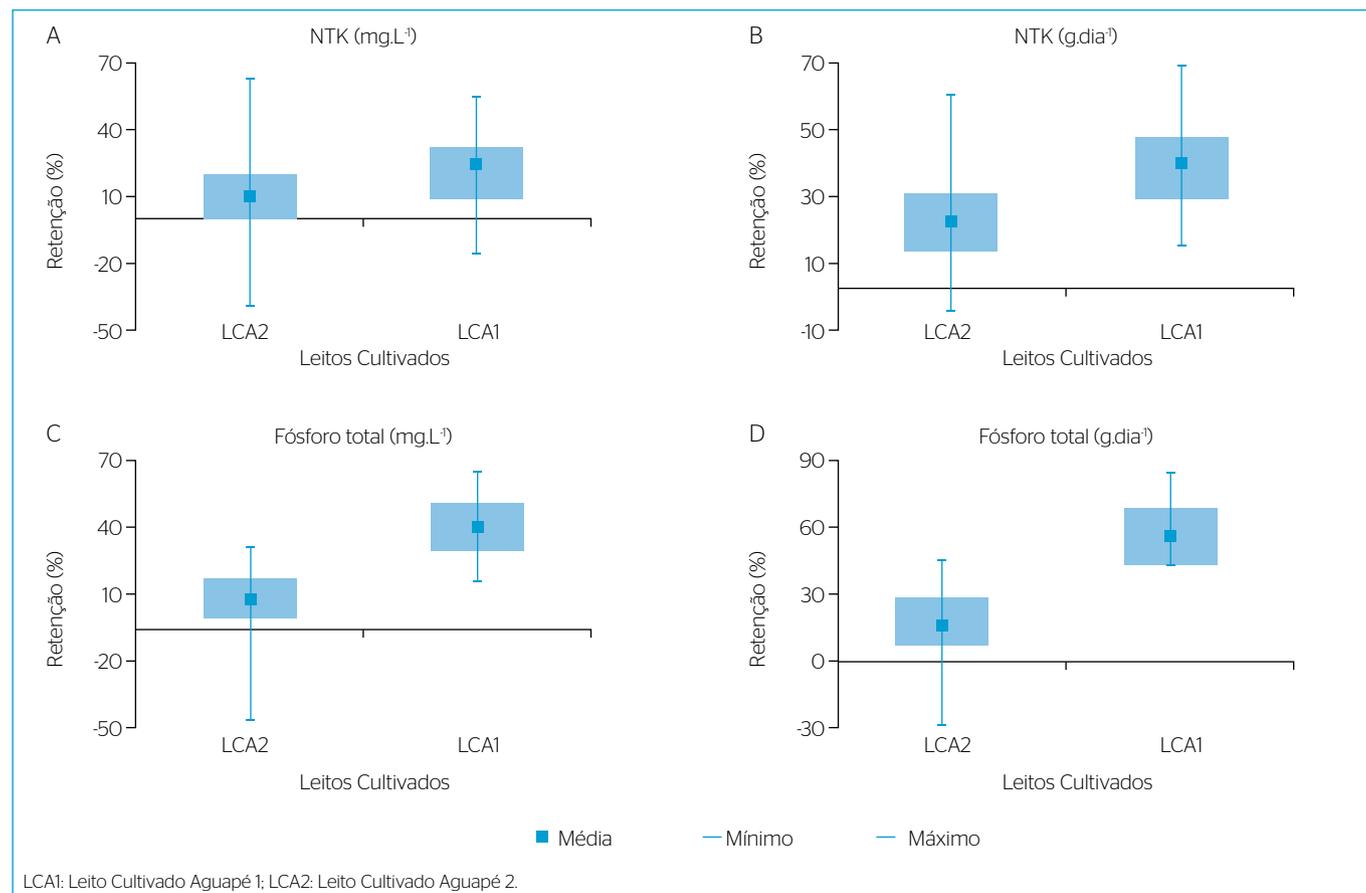


Figura 5 - Eficiência de retenção de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) em (A) concentração e (B) massa e de (C) fósforo total em concentração e (D) massa, máximas, médias e mínimas nos leitos cultivados no período de amostragem.

as retenções médias, máximas e mínimas de NTK (g.dia⁻¹) no período de amostragem. As retenções médias foram de 21,6 e 41,2% para LCA2 e LCA1, respectivamente, e as mínimas foram de 13,4% para LCA1 e um acúmulo de 8,6% na saída de LCA2, enquanto as máximas foram de 52,4% para LCA2 e 74,4% para LCA1. Por meio da comparação múltipla de Tukey, verificou-se que o LCA1 foi o leito mais eficiente na retenção de massa de NTK, com p-valor igual a 0,025.

Em razão da dificuldade de encontrar trabalhos científicos que avaliassem a remoção de nutrientes em termos de carga, a comparação dos resultados foi realizada em termos de concentração, pois os dados deste trabalho foram apresentados em ambas as unidades. Os resultados de carga são mais robustos por levarem em conta a vazão de esgoto da amostra no momento da coleta e também por indicarem a quantidade de massa do poluente que está entrando e saindo do sistema de tratamento. Wang *et al.* (2013) obtiveram redução de 76% de nitrogênio total na água de um lago eutrofizado, com concentração média de 14 mg.L⁻¹ antes da passagem pelo canal de *E. crassipes* e de 3,3 mg.L⁻¹ após a passagem. Mees *et al.* (2009) relataram remoção média de 21,2% e máxima de 87,9% de nitrogênio total, com TDH de 5 dias. Gentelini *et al.* (2008) obtiveram remoções médias de 21% com TDH de 4 horas, 33% com TDH de 8 horas e 40% com TDH de 12 horas, evidenciando que, quanto maior o TDH, maior será a taxa de remoção do nutriente. O valor de nitrogênio total no afluente foi, em média, de 1,94 ± 0,87 mg.L⁻¹ e no efluente, de 1,17 ± 0,55 mg.L⁻¹ a 1,53 ± 0,44 mg.L⁻¹. Lu, Fu e Yin (2008) estudaram um leito cultivado com *E. crassipes* flutuante para tratar água residuária de uma fazenda produtora de ovos de pata, obtendo taxas médias de remoção de nitrogênio total de 21,8%, com concentração afluente de 12,7 mg.L⁻¹ e efluente de 9,9 mg.L⁻¹. Wang *et al.* (2013) observaram altas taxas de retenção de NTK, porém trabalharam com concentrações afluente e efluente mais baixas do que as obtidas neste estudo. As taxas de retenção relatadas pelos demais autores apresentados corroboram as taxas de retenção de concentração ou de massa do parâmetro obtidas neste estudo.

As retenções médias, máximas e mínimas de fósforo total nos leitos cultivados (em mg.L⁻¹) são apresentadas na Figura 5C. A retenção mínima observada no LCA1 foi de 18,4%, enquanto no LCA2 houve aumento de 31,7% na saída do sistema. Para o LCA2 e o LCA1, as retenções máximas foram de 36,4 e 65,5%, respectivamente. A média de retenção foi mais alta para o LCA1, com 37,6%, do que para o LCA2, com 0,6%. A comparação múltipla de Tukey mostrou que o LCA1 foi novamente o leito mais eficiente para retenção de fósforo total em concentração, apresentando p-valor menor que 0,001.

Quanto à massa, observa-se na Figura 5D que as máximas retenções foram de 42,0 e 80,3%, e as retenções médias, de 2,9 e 51,4% para LCA2 e LCA1, respectivamente. A mínima retenção para LCA1 foi de 23,4%, enquanto no LCA2 ocorreu acúmulo de 20,8% na saída do sistema. Para retenção de massa de fósforo total, a comparação múltipla de Tukey mostrou que o LCA1 foi o leito mais eficiente, apresentando p = 0,000.

Travaini-Lima e Sipaúba-Tavares (2012) observaram remoções de 91,0% de fósforo total na estação seca, com concentrações variando entre 0,3 e 3,8 mg.L⁻¹, e de 60,5% na estação chuvosa, com concentrações entre 0,1 e 0,2 mg.L⁻¹. Chen *et al.* (2010) obtiveram remoções médias de 75,8 a 87,0% em um tanque com *E. crassipes* no verão, com concentração afluente variando entre 33 e 56 mg.L⁻¹ e efluente entre 7,3 e 8,2 mg.L⁻¹. Já no inverno, os autores observaram remoções de 50,0 a 62,4%, com fósforo total afluente variando entre 45,2 e 58 mg.L⁻¹ e efluente entre 17 e 28 mg.L⁻¹.

Em 2010, Jonas e Hussar trabalharam com concentrações afluente de fósforo total entre 37,8 e 42,5 mg.L⁻¹ e efluente entre 4 e 17,8 mg.L⁻¹, resultando em remoções entre 55,5 e 89,5% com média de 74,8%. As taxas de remoção observadas pelos autores mencionados anteriormente são bem mais elevadas do que as encontradas neste estudo, independentemente do fato de as concentrações no afluente serem maiores ou menores. No entanto, não foram encontrados trabalhos para comparação que tenham utilizado *E. crassipes* fixa a outro meio suporte.

Maine *et al.* (2009) obtiveram remoção média de -8% de fósforo total, com concentração média afluente de 0,25 mg.L⁻¹ e efluente de 0,27 mg.L⁻¹. Já Mees *et al.* (2009) relataram taxas de remoção média de 11,1% e máxima de 38,9% em uma lagoa com *E. crassipes*. Gentelini *et al.* (2008) obtiveram redução de 20,3% com TDH de 4 horas, 32,2% com TDH de 8 horas e 40,7% com TDH de 12 horas; a concentração afluente foi, em média, de 0,59 mg.L⁻¹ e a efluente variou entre 0,35 e 0,47 mg.L⁻¹.

Lu, Fu e Yin (2008) relataram retenção média de 23,0%, com médias afluente de 8,86 mg.L⁻¹ e efluente de 6,82 mg.L⁻¹. Apesar de as concentrações afluente e efluente variarem bastante, as taxas de retenção obtidas por Maine *et al.* (2009), Mees *et al.* (2009) e Gentelini *et al.* (2008) são as mais próximas às observadas neste estudo.

Balanco de massa

Os valores de absorção de nutrientes pela vegetação e o balanço de massa de nutrientes nos leitos são apresentados pela Tabela 3, na qual é possível observar que a absorção média de nitrogênio na parte aérea e no sistema radicular é maior no LCA1 do que no LCA2.

A absorção de fósforo na parte aérea do LCA1 foi maior do que no LCA2, e o contrário foi observado para a remoção pelo sistema radicular. Em média, porém, o LCA2 removeu mais fósforo total do que o LCA1. É interessante observar que a remoção média de potássio foi igual no LCA2 e no LCA1, no entanto um leito absorveu mais na parte aérea e o outro no sistema radicular. As remoções médias de cálcio, magnésio e enxofre foram maiores no LCA2.

Wang *et al.* (2013) relataram que o nitrogênio absorvido pela *E. crassipes* representou 64% do nitrogênio afluente ao sistema. Os autores verificaram que 761 t de *E. crassipes* (massa seca) retiradas do lago continham 486 t de nitrogênio. Lee *et al.* (2013) obtiveram absorções

máximas de 583 g.m⁻² de nitrogênio total e 62 g.m⁻² de fósforo total no mês de setembro, em experimento realizado na Coreia do Sul. Segundo Wang e Calderon (2012), 1 t de massa úmida de *E. crassipes* pode absorver cerca de 2,01 kg de nitrogênio e 0,30 kg de fósforo (taxas médias de absorção de 0,2% para nitrogênio e 0,03% para fósforo). Esses valores são inferiores aos obtidos no presente estudo (Tabelas 4 e 5).

Konnerup, Koottatep e Brix (2009) observaram absorção média de nitrogênio de 41% para a planta *Canna indica* e de 12% para *Heliconia psittacorum* L.f. × *H. Spathocircinata* (taxas de 84,7 e 12,2 g.m⁻².ano⁻¹ para *Canna* e *Heliconia*, respectivamente). Mees *et al.* (2009) obtiveram 4,3% de nitrogênio total, 0,7% de fósforo total e 3,4% de potássio na biomassa de *E. crassipes* utilizada em um leito cultivado que tratava dejetos suínos.

Os resultados obtidos apresentaram composição percentual e taxas de absorção/remoção de macronutrientes geralmente maiores

Tabela 3 - Macronutrientes removidos pela massa seca de *Eichhornia crassipes* no Leito Cultivado Aguapé 1 (LCA1) e no Leito Cultivado Aguapé 2 (LCA2).

Macronutrientes (g.kg ⁻¹)						
	N	P	K	Ca	Mg	S
Parte Aérea						
LCA1	50,7	14,7	56,6	15,4	4,8	4,6
LCA2	47,7	13,6	62,7	20,9	6,6	5,1
Sistema Radicular						
LCA1	33,8	7,8	10,7	11,8	1,7	8,5
LCA2	30,8	11,1	4,6	10,8	2,6	13,8
Total						
LCA1	84,5	22,5	67,3	27,2	6,5	13,1
LCA2	78,5	24,7	67,3	31,7	9,2	18,9

Tabela 4 - Composição percentual de macronutrientes da massa seca de *Eichhornia crassipes* do Leito Cultivado Aguapé 1 (LCA1) e do Leito Cultivado Aguapé 2 (LCA2).

	Composição percentual de macronutrientes (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
LCA1	8,5	2,3	7,0	2,8	0,7	1,5
LCA2	7,9	2,5	6,7	3,2	0,9	1,9
Média	8,2	2,4	6,9	3,0	0,8	1,7

Tabela 5 - Massa de macronutrientes removida diariamente do Leito Cultivado Aguapé 1 (LCA1) e do Leito Cultivado Aguapé 2 (LCA2).

	Massa diária removida de macronutrientes (g.m ⁻² .dia ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
LCA1	1,2	0,3	1,0	0,4	0,1	0,2
LCA2	1,3	0,5	1,2	0,4	0,2	0,4
Média	1,3	0,4	1,1	0,4	0,2	0,3

do que os estudos encontrados na literatura. Os valores deste estudo são superiores quando comparados a *E. crassipes* e outras plantas cultivadas com água de rio, lago ou lagoa, água residuária de suinocultura e esgoto doméstico. Isso evidencia que a macrófita proporciona altas taxas de remoção de fósforo e nitrogênio, o que provavelmente se deve aos diferentes manejos da planta ou ao fato de absorver mais nutrientes quando fixada a um meio suporte em comparação ao cultivo flutuante no espelho d'água.

O balanço de massa de nitrogênio e de fósforo foi calculado a partir da diferença entre os valores de massa afluentes e efluentes e os valores removidos, obtidos no momento do corte e da retirada. O resultado do balanço de massa para nitrogênio total e fósforo total é apresentado nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Na Tabela 6, pode-se observar que a massa de nitrogênio total retida pelos leitos cultivados, em ambos os casos, foi maior do que a removida pela planta. No LCA1, a remoção representou 14% e no LCA2, 73%. Esses valores indicam que o leito plantado 43 dias antes se mostrou mais eficiente na remoção de nitrogênio. A massa de nitrogênio pode ter ficado retida no substrato do leito cultivado, no biofilme do meio suporte ou ter sido degradada. O mesmo acontece com a massa retida de fósforo total. A massa de fósforo removida no LCA1 foi de 120 g e a massa retida, de 94 g. Já no LCA2, o valor da remoção foi de 125 g e o valor retido foi negativo, mostrando que a vegetação retirou 94 g de fósforo total que provavelmente já estavam aderidos ao biofilme do meio suporte, o qual já havia sido utilizado em estudos anteriores. Essa condição explicita que, no início do seu desenvolvimento, a *E. crassipes* demanda mais nutrientes do que na fase de maturação, ou que as condições hidráulicas dos leitos propiciaram a formação de caminhos preferenciais. Assim, é necessário conhecer a demanda de nutrientes para *E. crassipes* ao longo do seu desenvolvimento, além do movimento do esgoto dentro do meio suporte. Esses conhecimentos

Tabela 6 - Balanço de massa de nitrogênio total no Leito Cultivado Aguapé 1 (LCA1) e no Leito Cultivado Aguapé 2 (LCA2) durante o período estendido.

Balanço de massa - Nitrogênio total					
	Massa afluente (g)	Massa efluente (g)	Diferença (g)	Remoção planta (g)	Retenção (g)
LCA1	8.133	4.514	3.619	446	3.173
LCA2	4.074	3.135	939	397	542

Tabela 7 - Balanço de massa de fósforo total no Leito Cultivado Aguapé 1 (LCA1) e no Leito Cultivado Aguapé 2 (LCA2) durante o período estendido.

Balanço de massa - Fósforo total					
	Massa afluente (g)	Massa efluente (g)	Diferença (g)	Remoção planta (g)	Retenção (g)
LCA1	399	185	214	120	94
LCA2	193	161	32	125	-94

devem balizar as futuras regras de manejo com o objetivo de melhorar a eficiência da redução de nutrientes de efluentes nos leitos cultivados.

CONCLUSÕES

Os valores médios da retenção de concentração de NTK foram de 23,6% para o LCA1 e 9,6% para LCA2. Para fósforo total, a retenção média também foi mais alta para o LCA1 (37,6%) do que para o LCA2 (0,6%). Com os resultados apresentados neste trabalho, é possível concluir que, estatisticamente, o LCA1 foi mais eficiente na retenção de nitrogênio ($p = 0,025$) e fósforo total ($p < 0,001$), com 5% de significância. A maior eficiência do LCA1 é provavelmente explicada pelo diferente

estágio de desenvolvimento vegetativo desse aguapé, que recebeu o plantio da vegetação 43 dias antes do LCA2.

Em ambos os leitos, os valores de retenção de nitrogênio foram maiores do que os de remoção pela macrófita. Entretanto, em relação à remoção de fósforo, o LCA2 mostrou melhor desempenho, produzindo valores mais elevados do que os de retenção. O LCA1 obteve menor taxa de retenção quando comparado ao LCA2, porém manteve maiores taxas de remoção.

FONTE DE FINANCIAMENTO

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processo n.º 133352/2012-9.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION (WEF). (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. ed. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF.
- BERGIER, I.; SALIS, S.M.; MIRANDA, C.H.B.; ORTEGA, E.; LUENGO, C.A. (2012) Biofuel production from water hyacinth in the Pantanal wetland. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 12, n. 1, p. 77-84. <http://dx.doi.org/10.2478/v10104-011-0041-4>
- BOARETTO, A.E.; VAN RAIJ, B.; SILVA, F.C.; CHITOLINA, J.C.; TEDESCO, M.J.; CARMO, C.A.F.S. (2009) *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 672 p.
- BORTOLOTTI, I.M.; GUARIM NETO, G. (2005) O uso do camalote, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, Pontederiaceae, para confecção de artesanato no Distrito de Albuquerque, Corumbá, MS, Brasil. *Acta Botanica Brasílica*, v. 19, n. 2, p. 331-337. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062005000200016>
- BULLER, L.S.; BERGIER, I.; ORTEGA, E.; SALIS, S.M. (2013) Dynamic energy valuation of water hyacinth biomass in wetlands: an ecological approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 54, p. 177-187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.006>
- CHAVAN, B.L.; DHULAP, V.P. (2012) Treatment of Sewage through Phytotechnological Studies with Constructed Wetland Using *Eichhornia crassipes*. *Journal of Environmental Research and Development*, v. 7, n. 2, p. 660-667.
- CHEN, X.; CHEN, X.; WAN, X.; WENG, B.; HUANG, Q. (2010) Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) waste as an adsorbent for phosphorus removal from swine wastewater. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 23, p. 9025-9030. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.013>
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT GMBH (GIZ). (2011) *Technology review of constructed wetlands: subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Sustainable sanitation – ecosan program. Eschborn: GIZ. 36 p.
- DING, X.; XUE, Y.; ZHAO, Y.; XIAO, W.; LIU, Y.; LIU, J. (2018) Effects of different covering systems and carbon nitrogen ratios on nitrogen removal in surface flow constructed wetlands. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 541-551. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.170>
- DOTRO, G.; LANGERGRABER, G.; MOLLE, P.; NIVALA, J.; PUIGAGUT, J.; STEIN, O.; VON SPERLING, M. (2017) *Biological Wastewater Treatment Series: Treatment Wetlands*. IWA Task Group on Mainstreaming the Use of Treatment Wetlands. Londres: IWA Publishing. 172 p.
- GENTELINI, A.L.; GOMES, S.D.; FEIDEN, A.; ZENATTI, D.; SAMPAIO, S.C.; COLDEBELLA, A. (2008) Produção de biomassa das macrófitas aquáticas *Eichhornia crassipes* (aguapé) e *Egeria densa* (egeria) em sistema de tratamento de efluente de piscicultura orgânica. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 29, n. 2, p. 441-448.
- INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL (ITRC). (2003) *Technical and Regulatory Guidance Document for Constructed Treatment Wetlands*. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council. 128 p.
- JONAS, T.C.; HUSSAR, G.J. (2010) Utilização do aguapé no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado. *Engenharia Ambiental*, v. 7, n. 4, p. 20-32.
- KADLEC, R.H.; WALLACE, S.D. (2009) *Treatment Wetlands*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group. 366 p.

- KONNERUP, D.; KOOTTATEP, T.; BRIX, H. (2009) Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*. *Ecological Engineering*, v. 35, n. 2, p. 248-257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.04.018>
- KUMAR, A.K.; CHIRANJEEVI, P.; MOHANAKRISHNA, G.; MOHAN, S.V. (2011) Natural attenuation of endocrine-disrupting estrogens in an ecologically engineered treatment system (EETS) designed with floating, submerged and emergent macrophytes. *Ecological Engineering*, v. 37, n. 10, p. 1555-1562. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.009>
- LEE, S.Y.; MANIQUIZ, M.C.; CHOI, J.Y.; JEONG, S.M.; KIM, L.H. (2013) Seasonal nutrient uptake of plant biomass in a constructed wetland treating piggery wastewater effluent. *Water Science & Technology*, v. 67, n. 6, p. 1317-1323. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.002>
- LI, B.; CHEN, J.; WU, Z.; WU, S.; XIE, S.; LIU, Y. (2018) Seasonal and spatial dynamics of denitrification rate and denitrifier community in constructed wetland treating polluted river water. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 126, p. 143-151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.008>
- LORENZI, H.; SOUZA, H.M. (2001) *Plantas ornamentais no Brasil: arbustivas, herbáceas e trepadeiras*. 3. ed. Nova Odessa: Plantarum. 1.088 p.
- LU, J.; FU, Z.; YIN, Z. (2008) Performance of a water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) system in the treatment of wastewater from a duck farm and the effects of using water hyacinth as duck feed. *Journal of Environmental Sciences*, v. 20, n. 5, p. 513-519.
- MAINE, M.A.; SUÑE, N.; HADAD, H.; SÁNCHEZ, G.; BONETTO, C. (2009) Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 1, p. 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.10.004>
- MEES, J.B.R.; GOMES, S.D.; VILAS BOAS, M.A.; FAZOLO, A.; SAMPAIO, S.C. (2009) Removal of organic matter and nutrients from slaughterhouse wastewater by using *Eichhornia crassipes* and evaluation of the generated biomass composting. *Engenharia Agrícola*, v. 29, n. 3, p. 466-473. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000300013>
- MOHAN, S.V.; MOHANAKRISHNA, G.; CHIRANJEEVI, P.; PERI, D.; SARMA, P.N. (2010) Ecologically engineered system (EES) designed to integrate floating, emergent and submerged macrophytes for the treatment of domestic sewage and acid rich fermented-distillery wastewater: Evaluation of long term performance. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 10, p. 3363-3370. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.027>
- THAM, H.T. (2012) *Water Hyacinth (Eichhornia crassipes) – Biomass Production, Ensilability and Feeding Value to Growing Cattle*. 64 f. Tese (Doutorado em Nutrição e Gestão Animal) – Faculty of Veterinary Medicine and Animal Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- TRAVAINI-LIMA, F.; SIPAÚBA-TAVARES, L.H. (2012) Efficiency of a constructed wetland for wastewaters treatment. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 24, n. 3, p. 255-265. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000043>
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (1988) *Design manual on constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment*. EPA/625/1-88/022. Cincinnati: CERL. 83 p.
- USEPA. *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. Manual. EPA/625/R-99/010, Cincinnati, Ohio/USA. 1999. 165p.
- VON SPERLING, M. (2007) *Biological Wastewater Treatment Series: Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. Londres: IWA Publishing. 304 p.
- VYMAZAL, J.; KRÖPFLOVÁ, L. (2008) *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*. Berlin: Springer Science + Business Media B. V. 579 p.
- WANG, Z.; CALDERON, M.M. (2012) Environmental and economic analysis of application of water hyacinth for eutrophic water treatment coupled with biogas production. *Journal of Environmental Management*, v. 110, p. 246-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.031>
- WANG, Z.; ZHANG, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, J.; YAN, S.; GUO, J. (2013) Nitrogen removal from Lake Caohai, a typical ultra-eutrophic lake in China with large scale confined growth of *Eichhornia crassipes*. *Chemosphere*, v. 92, n. 2, p. 177-183. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.014>
- WEBER, K.P.; LEGGE, R.L. (2013) Comparison of the catabolic activity and catabolic profiles of rhizospheric, gravel-associated and interstitial microbial communities in treatment wetlands. *Water Science & Technology*, v. 67, n. 4, p. 886-893. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.637>
- WU, H.; XU, K.; HE, X.; WANG, X. (2016) Removal of Nitrogen by Three Plant Species in Hydroponic Culture: Plant Uptake and Microbial Degradation. *Water Air Soil Pollution*, v. 227, n. 9, p. 1-11.