

## WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA O TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO BRUTO: UM ESTUDO EM ESCALA PILOTO

Amanda Silva Nunes (\*), Ricardo Nagamine Costanzi

\* Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina, amanda\_\_nunes1@hotmail.com

### RESUMO

Os *wetlands* construídos são tecnologias de tratamento de esgoto mundialmente consolidadas e reconhecidas pela simplicidade construtiva e operacional. Este estudo apresenta o desempenho de remoção de poluentes promovido por um sistema de *wetlands* construídos de escoamento vertical em escala piloto, empregado no tratamento de esgoto sanitário bruto, ao longo de oito semanas de operação e monitoramento. O design adotado consiste em um leito ( $1 \text{ m}^3$ ) de primeiro estágio, em série com três leitos ( $0,05 \text{ m}^3$ ) do segundo estágio operando em paralelo. Durante o período avaliado, o sistema foi operado com uma vazão média de  $0,48 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , distribuída por meio de seis pulsos diários de  $0,06 \text{ m}^3$  e de taxa de aplicação hidráulica de  $272 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ . O regime hidráulico foi baseado em quatro dias consecutivos de alimentação e três dias de repouso, completando um ciclo operacional total de 7 dias. Os resultados apresentados revelaram que no geral, o sistema em escala piloto apresentou níveis relativamente baixos de remoção de ST, SST, DQO,  $\text{N-NH}_4^+$  e NTK, na ordem de  $26,8 \pm 6,1\%$ ,  $78,2 \pm 6,3\%$ ,  $40,2 \pm 7,4\%$ ,  $70,1 \pm 4,2\%$  e  $51 \pm 8,8\%$ . O curto tempo de operação manifestou-se como um fator crucial para os resultados alcançados para matéria orgânica carbonácea e nitrogênio, pois o início de operação foi insuficiente para a proliferação e adaptação de microrganismos responsáveis pelos processos de degradação e transformação. Já, para os sólidos algumas condições construtivas e operacionais parecem ter sido decisivas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento descentralizado, Tratamento de efluentes, Escoamento vertical, Nitrogênio

### INTRODUÇÃO

Os *wetlands* construídos, ou também intitulados como áreas úmidas construídas, filtros plantados com macrófitas ou sistemas alagados construídos, são sistemas de tratamento descentralizados projetados para utilizar e aprimorar componentes naturais, tais como vegetação, meio suporte e suas associações microbianas na depuração de esgotos dos mais diferentes tipos (sanitário, doméstico e industrial), podendo ser empregados em diferentes níveis: primário, secundário e terciário (VYMAZAL, 2011).

No âmbito da descentralização, os WCs tornaram-se uma alternativa promissora para o tratamento de esgoto (NANDAKUMAR et al., 2019), tendo em vista o reduzido custo de implantação, baixos requisitos de operação e manutenção, elevada eficiência na remoção de contaminantes, flexibilidade quanto ao local de implantação e valor estético (ZHI, JI, 2012).

O sistema Francês, por exemplo, é uma variante dos *wetlands* de escoamento vertical, constituído por uma sequência de dois estágios e particularizado pela capacidade de tratar esgoto em seu estado bruto diretamente no primeiro estágio, renunciando etapas de tratamento prévio. Nesta concepção, os leitos de primeiro e segundo estágio são operados alternadamente entre períodos de alimentação e repouso. Na França, tornaram-se os WCs em modelo Francês são as tecnologias de tratamento de esgoto mais populares, sendo comumente implantados em aglomerados populacionais de até 2.000 indivíduos (MOLLE et al., 2005; SILVEIRA et al., 2015).

A remoção de contaminantes e a decorrente transformação da qualidade do efluente nestes sistemas ocorrem mediante uma sucessão de processos, tais como assimilação, sedimentação, adsorção, filtração, precipitação, volatilização e biodegradação (HOFFMANN et al., 2011). Se projetados e operados adequadamente, os WCs apresentam desempenho bastante satisfatório, quanto à remoção de matéria orgânica carbonácea, sólidos em suspensão e até mesmo nitrogênio e fósforo, no entanto, vale ressaltar que, condições climáticas e parâmetros construtivos e operacionais como tempo de retenção hidráulica, taxa de aplicação, modo de alimentação, tipo de meio suporte e design das configurações podem influenciar no desempenho final dos WCs (WANG; ZHOU, 2019).

Neste contexto, estudos que explorem e debatam as condições impostas em sistemas *wetlands* aliadas aos resultados de monitoramento alcançados são de suma importância para o melhoramento e disseminação desta tecnologia de tratamento. Para este propósito, uma sequência de dois estágios de *wetlands* construídos de escoamento vertical em escala piloto foi desenvolvida para o tratamento de esgoto sanitário bruto.

## OBJETIVOS

O objetivo desse estudo foi avaliar a eficiência de tratamento promovida por uma sequência de dois estágios de *wetlands* construídos de escoamento vertical empregados no tratamento de esgoto sanitário bruto, ao longo de oito semanas de operação e monitoramento.

## PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo foi conduzido nas dependências de uma estação de tratamento de esgoto do município de Londrina, Paraná (latitude 23°17'34"S e longitude 51°10'24"O, altitude 820 m), com capacidade máxima de tratamento de 160 l.s<sup>-1</sup>. O design do tratamento adotado consiste em um leito de primeiro estágio, em série com três leitos do segundo estágio operando em paralelo. Após ser submetido aos mecanismos físicos de eliminação de sólidos grosseiros, uma fração do esgoto é bombeada intermitentemente para o leito do primeiro estágio de tratamento, denominado L<sub>1</sub>, posteriormente esta etapa inicial, o mesmo é então conduzido por gravidade e distribuído nos leitos do segundo estágio, denominados L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> e L<sub>4</sub>.

O L<sub>1</sub> possui capacidade de 1 m<sup>3</sup> e 0,60 m de meio suporte, sendo brita 0 (d<sub>10</sub> = 9,5 mm), brita 2 (d<sub>10</sub> = 25 mm) e brita 3 (d<sub>10</sub> = 50 mm) os materiais estabelecidos para compor seu maciço filtrante. L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> e L<sub>4</sub> possuem capacidade de 0,5 m<sup>3</sup> e altura do meio suporte igual a 0,45 m. Para fins comparativos, os 3 leitos do segundo estágio possuem composição do maciço filtrante distinta, L<sub>2</sub> foi preenchido com brita 2 (d<sub>10</sub> = 25 mm), brita 0 (d<sub>10</sub> = 9,5 mm) e areia (d<sub>10</sub> = 0,3 mm e U = 2,50); L<sub>3</sub> adotou-se brita 2 (d<sub>10</sub> = 25 mm), brita 0 (d<sub>10</sub> = 9,5 mm) e granulado cerâmico (d<sub>10</sub> = 5,0 mm) como meio filtrante; e por fim, L<sub>4</sub> utilizou brita 2 (d<sub>10</sub> = 25 mm), brita 0 (d<sub>10</sub> = 9,5 mm) e escória granulada de fundição (d<sub>10</sub> = 5,0 mm).

O sistema de tratamento descentralizado WCs foi alimentado com esgoto bruto e operado com uma vazão média de 0,48 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> e um regime hidráulico baseado em quatro dias consecutivos de alimentação e três dias de repouso, completando um ciclo operacional total de 7 dias. A vazão média aplicada foi distribuída por meio de seis pulsos diários de 0,06 m<sup>3</sup> de 3 minutos cada, o que resultou em uma taxa de aplicação hidráulica de 272 mm.d<sup>-1</sup>.

O afluente e efluente do sistema WCs foram monitorados ao longo das oito primeiras semanas de operação. As coletas e análises físico-químicas foram realizadas com uma frequência semanal e seguindo as recomendações de Apha (2005). Potencial hidrogeniônico (pH), nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrogênio total kjeldahl (NTK), sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST) e demanda química de oxigênio (DQO) foram os parâmetros analisados. Todos os tratamentos foram testados para distribuição normal (Shapiro-Wilk), para determinar possíveis diferenças estatísticas nas concentrações dos efluentes avaliados, foi aplicada uma análise de variância (ANOVA), a um nível de confiança de 95%.

## RESULTADOS

Na Tabela 1, é apresentado um resumo dos valores de mínimo, máximo, média aritmética e desempenho de remoção obtida no monitoramento dos leitos de WCs de escoamento vertical no decorrer de oito semanas de operação em início de estágio.

- **Remoção de sólidos**

A Tabela 1 ilustra os perfis de concentração de sólidos do afluente e efluentes gerados nos sistemas WCs, bem como as porcentagens de remoção alcançadas. De acordo com a análise estatística empregada, as concentrações de ST e SST para os efluentes produzidos foram significativamente diferentes entre os leitos de tratamento avaliados ( $p < 0,05$ ). Ao longo da operação dos sistemas, pode-se observar ocasionalmente um acréscimo na concentração média de sólidos em L<sub>1</sub> se comparado à concentração do afluente, conduzindo a taxas médias de eliminação relativamente baixas. Atribui-se essa observação ao desprendimento e arraste de biomassa retida no fundo do WC, possivelmente ocasionado pela alta taxa aplicada e principalmente por formação de biomassa dispersa no fundo do leito.

Apesar das baixas taxas de remoção média de ST, o teste estatístico indicou haver diferença significativa ( $p > 0,05$ ) nos valores medidos para os leitos L<sub>1</sub> e L<sub>4</sub>. Neste estudo, a unidade experimental expressou bom comportamento quanto aos SST, como pode ser observado na caracterização apresentada (Tabela 1). A remoção de SST em WCs é atribuída a processos físicos, como sedimentação e filtração (TRANG et al., 2010). Estudos, como o desempenhado por Salazar et

al. (2019), apontam que a eficiência de remoção deste parâmetro apresente valores no intervalo entre 85% a 95% para esta tecnologia de tratamento.

Embora, próximas do limite inferior com a faixa evidenciada pela literatura; L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> e L<sub>4</sub> alcançaram expressivas porcentagens médias de remoção de respectivamente 76,8 ± 6,8 mg.l<sup>-1</sup>, 68,9 ± 6,4 mg.l<sup>-1</sup> e 78,2 ± 6,3 mg.l<sup>-1</sup>. A análise estatística (n = 8) apresentou diferenças significativas entre o primeiro estágio de tratamento e os três leitos do segundo estágio (p < 0,01), possivelmente, a explicação está na maior retenção física de sólidos na superfície dos filtros de segundo estágio. Justificam-se as observações pela dimensão dos materiais dos meios suportes adotados para o segundo estágio de tratamento. De acordo com Bohórquez, Paredes e Arias (2017), leitos à base de grãos mais finos, como por exemplo, a areia favorecem condições físicas para filtração, depósito e retenção de partículas sólidas e aprimoram substancialmente sua remoção, quando comparados aqueles a base de cascalho.

**Tabela 1. Caracterização físico-química do esgoto sanitário aplicado no sistema WCs estudado e dos respectivos efluentes produzidos (n = 8) (p < 0,05)**

Parâmetro	Dados	Afluente	Estágio 1		Estágio 2	
			L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
pH	Máx	<b>7,4</b>	<b>7,6</b>	<b>6,8</b>	<b>7,0</b>	<b>8,1</b>
	Méd	7,1 ± 0,1	7,2 ± 0,1	6,4 ± 0,1	6,5 ± 0,1	7,5 ± 0,1
	Mín	6,3	6,8	5,8	5,9	6,8
ST (mg.l <sup>-1</sup> )	Máx	<b>630,0</b>	<b>920,0</b>	<b>736,0</b>	<b>646,0</b>	<b>562,0</b>
	Méd	549,5 ± 25,6	600,7 ± 51,4	537,5 ± 41,1	487,7 ± 41	426,2 ± 27,1
	Mín	402,0	424,0	396,0	246,0	296,0
	Remoção	-	1,6 ± 1	10,3 ± 3,7	21,7 ± 7,8	26,8 ± 6,16
SST (mg.l <sup>-1</sup> )	Máx	<b>180,0</b>	<b>672,0</b>	<b>92,0</b>	<b>112,0</b>	<b>56,0</b>
	Méd	130,5 ± 12,7	221 ± 66,1	36,2 ± 10,3	50,5 ± 9,5	34,5 ± 5,8
	Mín	54,0	76,0	10,0	20,0	8,0
	Remoção	-	13,9 ± 1,4	76,8 ± 6,8	68,9 ± 6,4	78,2 ± 6,3
DQO (mg.l <sup>-1</sup> )	Máx	<b>963,9</b>	<b>780,5</b>	<b>395,3</b>	<b>523,7</b>	<b>670,4</b>
	Méd	671,5 ± 76,8	528,2 ± 86,4	261,5 ± 28,1	308,2 ± 66,3	349,4 ± 77,1
	Mín	377,0	211,9	156,9	101,9	120,2
	Remoção	-	34 ± 9,6	37,8 ± 7,5	40,2 ± 7,4	34,8 ± 7,1
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg.l <sup>-1</sup> )	Máx	<b>115,9</b>	<b>78,4</b>	<b>24,0</b>	<b>22,4</b>	<b>63,2</b>
	Méd	66,8 ± 7,2	48,6 ± 4,3	13,7 ± 1,5	16,5 ± 1,4	37,1 ± 3,8
	Mín	48,7	39,2	9,5	11,2	28,0
	Remoção	-	26,3 ± 1,6	70,1 ± 4,2	64,3 ± 4,2	23,8 ± 2,7
NTK (mg.l <sup>-1</sup> )	Máx	<b>364,5</b>	<b>328,1</b>	<b>238,0</b>	<b>261,5</b>	<b>297,3</b>
	Méd	170,5 ± 44,8	150,7 ± 43	98 ± 38,1	105,2 ± 40,9	126,2 ± 43,3
	Mín	75,6	58,8	14	16,8	31,3
	Remoção	-	15,6 ± 3,2	51 ± 8,8	47,2 ± 8,9	28 ± 6,1

- **Remoção de matéria orgânica carbonácea**

O conjunto de dados obtidos após as primeiras semanas de operação e monitoramento mostrou que as concentrações de DQO se diferem conforme as etapas de tratamento, porém os resultados evidenciam que não há diferenças estatisticamente significativas entre os quatro tratamentos avaliados (p > 0,05). A concentração média de DQO para o afluente neste estudo foi de 671,5 ± 76,8 mg.l<sup>-1</sup>, já as médias de concentrações para os efluentes produzidos foram: 528,2 ± 86,4 para L<sub>1</sub>, 261,5 ± 28,1 para L<sub>2</sub>, 308,2 ± 66,3 para L<sub>3</sub> e 349,4 ± 77,1 mg.l<sup>-1</sup> para L<sub>4</sub>.

A redução dos níveis de DQO em WCs pode ser atribuída ao processo de biodegradação aeróbia, realizado especialmente por bactérias aderidas ao meio suporte e ao sistema radicular das macrófitas. O regime de alimentação intermitente adotado por unidades de escoamento vertical fornecem a microbiota circunstâncias oportunas ao processo de degradação da matéria carbonácea (ILYAS; MASHI, 2017). Os WCs de escoamento vertical são reconhecidos pelo

bom desempenho de remoção de matéria orgânica (HOFFMANN et al., 2011), no entanto para este estudo foram obtidas taxas de remoção instáveis. O tempo de operação da unidade experimental manifestou-se como um fator crucial para os resultados alcançados, pois o início de operação foi insuficiente para a proliferação e adaptação de microrganismos (ZHOU et al., 2017).

Os resultados obtidos pelo presente estudo foram consistentes com as elucidações expostas por Paing et al. (2015), que evidenciaram que a idade da planta de tratamento tem efeito direto sobre o desempenho de remoção das concentrações de DQO, sendo quanto maior o tempo de operação, maior será a taxa de remoção. A eliminação de DQO, em contraste com desempenho eficaz eliminação de sólidos, foi menor, permitindo inferir que os processos físicos de filtração e sedimentação foram dominantes sobre os processos biológicos nesta etapa inicial de operação e monitoramento da unidade em escala piloto.

- **Remoção de nitrogênio**

A partir da caracterização apresentada na Tabela 1, verificou-se que as concentrações de  $N-NH_4^+$  e NTK dos efluentes produzidos reduziram quando comparados ao afluente e com base no teste estatístico, evidencia que há diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos avaliados quanto ao parâmetro  $N-NH_4^+$  ( $p < 0,05$ ). Os leitos de escoamento vertical são reconhecidos pela alta conversão de nitrogênio amoniacal, a alimentação do tipo intermitente contribui efetivamente na transferência de oxigênio e conseqüentemente ao processo de nitrificação, ou seja, oxidação da amônia a nitrato (PELLISSARI et al., 2017). Considerando o design de configuração adotado, pode-se atribuir a nitrificação, como o principal mecanismo de eliminação de nitrogênio no caso presente.

As eficiências de remoção observadas estão em conformidade com os resultados obtidos por Silveira et al. (2015), que relataram concentrações de seus efluentes na faixa de  $24 \pm 9$  e  $26 \pm 10$  para  $N-NH_4^+$  e  $25 \pm 9,6$  e  $28 \pm 10$  para NTK para dois filtros de fluxo vertical plantados com *Phragmites australis* e alimentados com esgoto bruto proveniente de uma estação de tratamento de população equivalente a 400.000 habitantes. Associada à análise de desempenhos dos WCs, acompanharam-se alterações visuais na superfície de  $L_4$ . Quatro semanas após o início da operação, este leito apresentou grande acúmulo de esgoto superficial visível, o que provavelmente se deve à colmatação inicial do meio suporte. As menores taxas de remoção de  $N-NH_4^+$  e NTK para  $L_4$ , se comparado aos demais leitos deste estágio, devem-se provavelmente a menor taxa de conversão de matéria carbonácea para este leito.

## CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo comprovam que os *wetlands* construídos são soluções eficazes e promissoras para o tratamento de esgoto sanitário. Ao longo do estágio inicial observado com a operação e monitoramento da unidade experimental piloto, revela-se uma eficiência de remoção de DQO e nitrogênio satisfatória. Observa-se que os leitos efetivaram os processos biológicos de eliminação da matéria orgânica carbonácea e nitrogenada. No entanto, considerando a ação decisiva das comunidades microbianas nestes processos, um maior tempo de operação é recomendado para desenvolvimento por completo e adaptação do biofilme e decorrente aperfeiçoamento do desempenho do tratamento. Ressalta-se, assim, que o tempo de operação, as estratégias construtivas e operacionais são fatores decisivos na eficiência da unidade experimental em remover poluentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BOHÓRQUEZ, E.; PAREDES, D.; ARIAS, C. A. Vertical flow-constructed wetlands for domestic wastewater treatment under tropical conditions: effect of different design and operational parameters. **Environmental Technology**, v. 38, n. 2, p. 199-208, 2017.
2. HOFFMANN, H. et al. Technology review of constructed wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. Eschborn: **Giz**, p. 36, 2011.
3. ILYAS, H.; MASIH, I. The performance of the intensified constructed wetlands for organic matter and nitrogen removal: A review. **Journal of Environmental Management**, p. 372-383, 2017.
4. MOLLE, P. et al. How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. **Water Science e Technology**, v. 51, n. 9, p. 11-21, 2005.
5. NANDAKUMAR, S. et al. Removal of phosphorous and nitrogen from wastewater in *Brachiaria* based constructed wetland. **Chemosphere**, v. 233, p. 216-222, 2019.

6. PAING, J. et al. Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: A survey based on 169 full scale systems. **Ecological Engineering**, 2015.
7. PELISSARI, C. et al. Unraveling the active microbial populations involved in nitrogen utilization in a vertical subsurface flow constructed wetland treating urban wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 584-584, p. 642-650, 2017.
8. SALAZAR, P. et al. Biogardens as constructed wetlands in tropical climate: A case study in the Central Pacific Coast of Costa Rica. **Science of the Total Environment**, v. 658, p. 1023-1028, 2019.
9. SILVEIRA, D. D. Influence of partial saturation on total nitrogen removal in a single-stage French constructed wetland treating raw domestic wastewater. **Ecological Engineering**, v. 77, p. 257-264, 2015.
10. TRANG, N. T. D. et al. Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: Effects of hydraulic loading rate. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 527-535, 2010.
11. TREIN, C. et al. Reduction of area and influence of the deposit layer in the first stage of a full-scale French system of vertical flow constructed wetlands in a tropical area. **Water Science e Technology**, v. 80, n. 2, p. 347-356, 2019.
12. VYMAZAL, J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. **Environmental Science and Technology**, v. 45, p. 61-69, 2011.
13. WANG, B. Z. T. ZHOU, M. Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage in the hilly area of the central Sichuan Basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 570, p. 839-849, 2019.
14. ZHI, W.; JI, G. Constructed wetlands, 1991 – 2011: A review of research development, current trends, and future directions. *Science of the Total Environment*, v. 441, p. 19-27, 2012.
15. ZHOU, X. et al. Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using a biochar amended aerated vertical flow constructed wetland. **Bioresource Technology**, 2017.