

AVALIAÇÃO DE APTIDÃO DE LANÇAMENTO DO EFLUENTE TRATADO EM SISTEMA HÍBRIDO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS

Benny Zuse Rousso¹, Mayara Oliveira dos Santos², Monique Nunes de Freitas², Catiane Pelissari², Victor Ybarzo Fechine², Pablo Heleno Sezerino^{1*}

¹ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS), Membro do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 88040-900, Florianópolis, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Membro do GESAD, UFSC

*E-mail: pablo.sezerino@ufsc.br

Recebido em: 15/08/2017
Aceito em: 23/11/2017

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de remoção de poluentes de um sistema híbrido, composto por um wetland construído de fluxo subsuperficial vertical descendente (WCVD) seguido por um wetland construído de fluxo subsuperficial horizontal (WCH), empregado no tratamento de esgoto sanitário. A partir das eficiências registradas ao longo das primeiras 70 semanas de operação, avaliou-se a aptidão de lançamento do efluente tratado conforme normativas legais de âmbito nacional e estadual. O sistema híbrido apresentou elevada remoção de DQO, SST, N-NH₄⁺ e P-PO₄³⁻, na ordem superior a 90%, enquanto que a remoção de NT limitou-se a aproximadamente 69%. A remoção de NT foi incompleta devido à limitada capacidade do WCH em remover N-NO₃⁻ afluente, gerando um efluente com teor médio de 19,4 ± 10 mg N-NO₃⁻ L⁻¹. Contudo, o efluente tratado sempre se mostrou apto para lançamento conforme a resolução CONAMA 430/2011 e a Lei Estadual de Santa Catarina nº 14.675/2009, enquanto que para a resolução CONAMA 357/2005 estudos caso a caso devem ser realizados. Para corpos hídricos classes 1 a 3, vazões Q (7,10) variando de 0,5 a 13 L s⁻¹ são necessárias para não se infligir acréscimos significativos ($\Delta \leq 0,01$) nas concentrações dos diferentes parâmetros analisados na zona de mistura.

Palavras-chave: Wetlands Construídos. Esgoto Sanitário. Sistema Híbrido. Remoção de Poluentes. Aptidão de lançamento

1 Introdução

Sistemas híbridos de wetlands construídos consistem em arranjos sequenciais de diferentes wetlands construídos (WC), objetivam alcançar desempenhos superiores de remoção de poluentes quando comparados à performance de cada WC isoladamente [1]. De acordo com uma extensa revisão realizada por [2] sobre sistemas híbridos de WC, o arranjo mais comumente adotado consiste em uma sequência de um ou mais Wetland Construído de fluxo subsuperficial Vertical Descendente (WCVD) seguido por um ou mais Wetland Construído de fluxo subsuperficial Horizontal (WCH). Este arranjo, além de objetivar uma remoção depurada de matéria orgânica e sólidos suspensos totais (SST), almeja também intensificar a remoção de nitrogênio total (NT) ao favorecer os processos de nitrificação e desnitrificação em cada uma de suas unidades.

Apesar de ser uma linha de tratamento consolidada no mundo, a realização de estudos locais de sistemas híbridos WCVD-WCH são essenciais para fomentar a adoção desta tecnologia em determinado contexto. Particularmente, é de vital importância mensurar as eficiências tangíveis do arranjo tecnológico sob uma condição operacional específica, considerando condições climáticas e culturais locais e, então, compará-las com as restrições impostas por legislações regulatórias.

Dessa forma, esse estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de remoção de poluentes de esgoto sanitário submetido ao tratamento em um sistema híbrido WCVD-WCH, e comparar as eficiências de remoção e concentrações finais de poluentes com normativas legais ambientais.

2 Materiais e métodos

2.1 Local de estudo

O sistema em estudo encontra-se na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), localizada em Florianópolis (27,59° S, 48,52° O), região de clima subtropical. O esgoto tratado provinha da rede coletora municipal do bairro Pantanal de Florianópolis. Uma estação elevatória localizada dentro de um poço de visita ao lado da estação recalrava parte do esgoto da rede, que, posteriormente à passagem por um tanque séptico, era dosado na unidade vertical por meio de uma bomba centrífuga. A unidade vertical foi construída acima do nível do solo a fim de permitir o tratamento por gravidade. Após o tratamento, o esgoto tratado retornava à rede coletora em ponto a jusante da coleta. A Figura 1 apresenta um corte esquemático da linha de tratamento WCVD-WCH em estudo.



Figura 1 – Corte lateral do sistema híbrido WCVD-WCH em estudo

Ambas unidades WCVD e WCH foram compostas por material filtrante tipo areia grossa ($d_{10} = 0,29$ e $U = 4,05$), com camadas de brita na entrada e saída, de acordo com o fluxo hidráulico. A macrófita empregada foi a *Typha domingensis*. As características construtivas das unidades WCVD e WCH estão sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características construtivas do sistema híbrido

Parâmetro	WCVD	WCH
Altura útil (m)	0,70	0,60
Comprimento (m)	3,30	5,30
Largura (m)	2,30	3,00
Área superficial (m ²)	7,60	16,00
Espessura camada de brita na entrada (m)	0,05	0,50
Espessura camada de brita na saída (m)	0,05	0,60
Espessura camada de areia (m)	0,60	4,20
Altura de saturação (m)	0,00	0,50
Macrófita transplantada	<i>Typha domingensis</i>	
Densidade de transplântio (plantas m ⁻²)	4,20	3,30

As condições operacionais no sistema híbrido levaram em consideração uma carga aplicada de projeto de 41 g DQO m⁻² d⁻¹ [3], um regime intermitente de aplicação de esgoto com pulsos espaçados de 3 em 3 horas [4] e a adoção de ciclos de operação e repouso de 3,5 dias [5]. As condições operacionais do sistema híbrido estão sumarizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições operacionais do sistema híbrido

Parâmetro	Valor
Número de pulsos por dia	3-4 ^a
Intervalo entre pulsos (horas)	3
Período de repouso das unidades (dias)	3,5
Vazão média de aplicação (L min ⁻¹)	62,7 ± 1,1
Carga aplicada estimada no WCVD (gDQO.m ⁻² d ⁻¹)	39,6 ± 11,5
Volume aplicado por dia no sistema híbrido (L d ⁻¹)	300-450 ^a
Taxa de Aplicação Hidráulica no WCVD (mm d ⁻¹)	63 ± 14
Frequência de poda das macrófitas (meses)	3

^a: Na segunda-feira e quinta-feira são aplicados 3 pulsos, enquanto que na terça-feira e quarta-feira, 4 pulsos.

2.2 Monitoramento físico-químico

O monitoramento físico-químico foi realizado desde a 1ª semana de operação do sistema híbrido até a 70ª semana. Foram analisadas amostras da entrada e saída de cada WC, com frequência que variou de semanal a quinzenal ao longo do período de monitoramento. Os parâmetros analisados foram pH, Alcalinidade, DQO, SST, P-PO₄³⁻, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ e NT. Todos os parâmetros foram determinados a partir da metodologia

proposta em [6], exceto o N-NH₄⁺, que foi realizado segundo recomendações de [7].

2.3 Aptidão para lançamento

A aptidão para lançamento foi avaliada considerando os limites impostos pelas resoluções CONAMA 430/2011 [8] e 357/2005 [9] e pela Lei Estadual SC 14.675/2009 [10]. Para a resolução CONAMA 357/2005, realizaram-se simulações para as diferentes classes de corpos d'água.

Para tal, sempre arbitrou-se um cenário crítico do corpo receptor, no qual a concentração do rio anterior ao lançamento já se encontrava no limiar imposto por sua classe. Nesse contexto, juntamente com as cargas de saída médias (casos médios) e críticas do sistema híbrido (momentos de menor desempenho registrados, piores casos), calcularam-se as $Q(7,10)$ mínimas do corpo receptor para que um aumento na zona de mistura $\Delta \leq 0,01$ ocorresse. Este aumento foi considerado pequeno, fazendo com que o lançamento fosse considerado apto para a classe em análise.

3 Resultados e discussões

3.1 Desempenho de remoção de poluentes

Os resultados obtidos ao longo das primeiras 70 semanas de operação apontam para eficiências elevadas de remoção (>90%) de DQO, SST, N-NH₄⁺ e P-PO₄³⁻, superiores aos valores médios relatados na revisão de [2]. Já o parâmetro NT apresentou uma eficiência satisfatória, próxima a 69%, mostrando-se similar ao usualmente apresentado por sistemas híbridos tipo WCVD-WCH. As concentrações de entrada e saída de cada WC, suas respectivas eficiências de remoção e comparativo com os valores médios relatados por Vymazal (2013) são apresentados na Tabela 4.

Pôde-se observar que o sistema híbrido foi capaz de gerar um efluente com concentrações médias de DQO, N-NH₄⁺ e P-PO₄³⁻ iguais a 12, 6 e 1 mg L⁻¹, respectivamente, todas inferiores aos valores médios de efluentes tratados dos sistemas abordados por [2]. O teor de SST no efluente foi próximo de zero, já com baixas concentrações na saída da unidade WCVD (4 mg SST L⁻¹).

O efluente da unidade WCVD possuiu uma concentração média de N-NO₃⁻ de 28 ± 10 mg L⁻¹. Este valor indica que no WCVD a nitrificação foi responsável por 78% da remoção de N-NH₄⁺ ou na conversão de 48% do total de N-NH₄⁺ afluente à unidade. Por sua vez, o efluente do WCH apresentou concentração de 19,4 ± 10 mg L⁻¹, representando uma remoção de apenas 36,3 ± 31 % da carga afluente.

Tabela 4 - Comparativo entre os resultados obtidos neste estudo e entre a média fornecida na revisão de sistemas híbridos tipo WCVD-WCH realizada por [2].

	Afluentes WCVD		Efluentes WCVD		Efluentes WCH		Remoção WCVD		Remoção WCH		Remoção sistema Híbrido	
	(mg L ⁻¹)		(mg L ⁻¹)		(mg L ⁻¹)		(%)		(%)		(%)	
	Rouso et al. (2017)	Vymazal (2013)	Rouso et al. (2017)	Vymazal (2013)	Rouso et al. (2017)	Vymazal (2013)	Rouso et al. (2017)	Vymazal (2013)	Rouso et al. (2017)	Vymazal (2013)	Rouso et al. (2017)	Vymazal (2013)
DQO n = 27	586 ± 154	951 ± 1250	53 ± 15	425 ± 585	12 ± 9	200 ± 355	87 ± 8	72 ± 10	80 ± 13	51 ± 16	98 ± 2	81 ± 11
SST n = 27	44 ± 19	199 ± 226	4 ± 5	70 ± 79	0 ± 0	46 ± 90	93 ± 11	67 ± 17	99 ± 3	56 ± 36	99 ± 3	87 ± 17
NT n = 27	76 ± 15	66 ± 26	52 ± 13	16 ± 14	25 ± 11	24 ± 10	33 ± 12	28 ± 39	52 ± 23	46 ± 20	69 ± 13	60 ± 15
N-NH ₄ ⁺ n = 27	76 ± 11	104 ± 128	28 ± 7	29 ± 18	6 ± 6	46 ± 72	63 ± 8	45 ± 30	80 ± 18	29 ± 28	91 ± 9	60 ± 33
P-PO ₄ ³⁻ n = 27	32 ± 5	6 ± 5 ^a	8 ± 3	4 ± 3 ^a	1 ± 1	2 ± 2 ^a	74 ± 5	49 ± 24	88 ± 5	24 ± 62	96 ± 3	61 ± 22

As células em verde se referem aos casos onde um estudo apresentou valores superiores ao outro; as em vermelho quando os valores foram menores e, em amarelo quando similares.

^a: Os valores de [2] foram convertidos de PT para P-PO₄³⁻ utilizando a relação [PO₄³⁻] ≈ [0,7PT] [11]

3.2 Aptidão para lançamento

O monitoramento revelou que o efluente final do sistema híbrido sempre mostrou-se apto para lançamento em corpos hídricos conforme restrições impostas por normativas legais de lançamento de nível nacional (CONAMA 430/2011) e estadual (Lei de SC no 14.675/2009).

Referente ao lançamento em rios enquadrados em classes de uso conforme a resolução CONAMA 357/2005, as simulações evidenciaram que para os rios de classe 4 o lançamento sempre é possível sem tratamento complementar. Já para as classes 1 a 3, baixas Q (7,10) do corpo receptor são necessárias para não causar alterações significativas ($\Delta \leq 0,01$) do poluente na zona de mistura. Na Tabela 5 são fornecidos os resultados da análise de aptidão de lançamento para as diferentes normativas legais.

4 Conclusões

O sistema híbrido em estudo apresentou um excelente desempenho de tratamento, gerando efluentes depurados em termos de DQO, SST, N-NH₄⁺ e P-PO₄³⁻. A principal limitação se deu em virtude da presença considerável de N-NO₃⁻ no efluente final. Contudo, o efluente sempre mostrou-se apto para lançamento, segundo os parâmetros analisados. Além, disso, cabe ressaltar a possibilidade de reutilização do efluente final, dado as concentrações de nitrato disponíveis.

Dessa forma, a adoção deste arranjo tecnológico, dadas as condições construtivas e operacionais, apresenta uma elevada potencialidade como solução viável de tratamento de esgotos para localidades com limitado acesso às soluções centralizadas e com condições ambientais que exijam um maior controle de lançamento de efluentes

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e à FUNASA pelo financiamento fornecido para a pesquisa.

EVALUATION OF THE DISCHARGE SUITABILITY OF THE TREATED EFFLUENT OF A CONSTRUCTED WETLANDS HYBRID SYSTEM ACCORDING TO BRAZILIAN REGULATIONS

ABSTRACT: This paper goal was to evaluate pollutant removal performance of a constructed wetlands hybrid system, comprised by a downflow vertical subsurface constructed wetland (VFCW) followed by a horizontal subsurface constructed wetland (HFCW). The hybrid system was employed on treating sanitary wastewater. According to the performance throughout the first 70 weeks of operation, the suitability of the final effluent to be discharged was evaluated in regards to the Brazilian regulations in both National and State levels. The hybrid system presented removal rates greater than 90% for COD, TSS, NH₄⁺-N and PO₄³⁻-P, while TN removal was limited to 69%. TN removal was lower due to the limited capacity of the HFCW to remove influent NO₃⁻-N, which resulted in a final effluent with 19.4 ± 10 mgN-NO₃⁻.L⁻¹. Even though, the hybrid system final effluent was suitable to be discharged according to the National Regulation CONAMA 430/2011 and the Santa Catarina State Law n° 14.675/2009. Concerning the regulation CONAMA 357/2005, case-to-case studies, depending on the receptor waterbody, must be conducted to evaluate effluent discharge fitness. For waterbodies classified from 1 to 3, Q(7,10) ranging from 0.5 to 13 L.s-1 are required in order to not inflict significant increments ($\Delta \leq 0.01$) in the various analysed water quality parameters.

Keywords: Constructed wetlands. Sanitary wastewater. Hybrid System. Pollutant Removal. Discharge suitability.

Tabela 5 – Aptidão de lançamento do efluente do sistema híbrido considerando diferentes legislações

Parâmetro		Referência Legal						Efluente sistema híbrido						
		CONAMA 430/20011	Lei Estadual 14675/09 SC	CONAMA 357/2005				mg L ⁻¹			Remoção %			
				Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	
pH	Restrição	5 ≤ x ≤ 9	6 ≤ x ≤ 9	6 ≤ x ≤ 9	6 ≤ x ≤ 9	6 ≤ x ≤ 9	6 ≤ x ≤ 9	6,71	5,66	7,49	-	-	-	
	Status	OK	OK	OK	OK	OK	OK							
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	Restrição	≤ 120 mg.L ⁻¹ ou 60%	≤ 60 mg.L ⁻¹ ou 80%	≤ 3	≤ 5	≤ 10	-	12 ^a	0 ^a	43 ^a	98	93	100	
	Status	OK	OK	Q (7,10) ≥ 0,5 L.s ⁻¹ (caso médio) ou ≥ 2 L.s ⁻¹ (pior caso)	Q (7,10) ≥ 0,4 L.s ⁻¹ (caso médio) ou ≥ 1,8 L.s ⁻¹ (pior caso)	Q (7,10) ≥ 0,1 L.s ⁻¹ (caso médio) ou ≥ 1,5 L.s ⁻¹ (pior caso)	OK							
Sólidos (mg.L ⁻¹)	Restrição	Sedimentáveis ≤ 1mL.L ⁻¹	Caso a caso	Sólidos totais ≤ 500				-	0,04 _b	0,0 ^b	0,4 ^b	99	85	100
	Status	OK ^c	OK ^c	OK				OK						
N-NH ₄ ⁺ (mg.L ⁻¹)	Restrição	≤ 20 mg.L ⁻¹	-	≤ 3,7 (pH ≤ 7,5) ≤ 2 (7,5 ≤ pH ≤ 8) ≤ 1 (8 ≤ pH ≤ 8,5) ≤ 0,5 (pH > 8)	≤ 13,3 (pH ≤ 7,5) ≤ 5,6 (7,5 ≤ pH ≤ 8) ≤ 2,2 (8 ≤ pH ≤ 8,5) ≤ 1 (pH > 8)	-	-	6,7	0	19,5	91	68	100	
	Status	OK	OK	Q (7,10) ≥ 3 L.s ⁻¹ (caso médio) ou ≥ 9 L.s ⁻¹ (pior caso)	Q (7,10) ≥ 0,3 L.s ⁻¹ (caso médio) ou ≥ 0,9 L.s ⁻¹ (pior caso)	OK	OK							
N-NO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹)	Restrição	-	-	≤ 10				-	19,4	0	43	-	-	-
	Status	OK	OK	Q (7,10) ≥ 0,5 L.s ⁻¹ (caso médio) ou ≥ 1,5 L.s ⁻¹ (pior caso)				OK						
N-NO ₂ ⁻ (mg.L ⁻¹)	Restrição	-	-	≤ 1				-	0,02	0,00	0,10	-	-	-
	Status	OK	OK	OK				OK						
PT (mg.L ⁻¹)	Restrição	-	≤ 4 mg.L ⁻¹ ou 75% (lagoas, lagunas e estuários)	≤ 0,02 (lêntico) ≤ 0,025 (interm.) ≤ 0,1 (lótico)	≤ 0,03 (lêntico) ≤ 0,05 (interm.) ≤ 0,1 (lótico)	≤ 0,05 (lêntico) ≤ 0,075 (interm.) ≤ 0,16 (lótico)	-	1,5 ^e	0 ^e	3 ^e	96	85	100	
	Status	OK	OK	Q (7,10) ≥ 6,5 L.s ⁻¹ (caso médio) ou ≥ 13,5 L.s ⁻¹ (pior caso)	Q (7,10) ≥ 6,1 L.s ⁻¹ (caso médio) ou ≥ 12,9 L.s ⁻¹ (pior caso)	OK	OK							

As células em verde representam os casos tais que o parâmetro encontra-se sempre apto a ser lançado quando comparado com a respectiva normativa legal enquanto que as células em amarelo representam o caso em que o efluente encontra-se apto para lançamento dado uma condição especificada.

^a: Valores em DQO; ^b: Valores em SST; ^c: Apesar dos sedimentáveis não terem sido quantificados, os mesmos mostraram-se virtualmente ausentes; ^d: Apesar do estudo ser caso a caso, o efluente mostrou-se ausente de sólidos, provavelmente não implicando restrição de lançamento em nenhum caso; ^e: Valores de P-PO₄³⁻ foram convertidos para PT utilizando a relação [PO₄³⁻] ≈ [0,7PT]

[11]

Referências

- [01] KADLEC, R. H.; WALLACE, S. C. Treatment Wetlands. 2 ed. Florida, USA. Taylor & Francis Group, INC. 1000 p, 2009.
- [02] VYMAZAL, J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: a review of a recent development. *Water Research*, v. 47, p. 4795-4811, 2013.
- [03] SEZERINO, P. H. Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (Constructed Wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condição de clima subtropical. Tese de Doutorado - Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.
- [04] PLATZER, C. Design recommendations for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. *Water Science and Technology*, v. 40, n. 3, p. 257-264, 1999.
- [05] SANTOS, M. O. et al. Influência da saturação de fundo de maciços filtrantes componentes de wetlands construídos verticais aplicados no tratamento de esgoto sanitário. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, v. 9, p. 303-316, 2016.
- [06] APHA. American Public Health Association.. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 ed. Washington: APHA-AWWA-WEF, 2005.
- [07] VOGEL, A.I. Química analítica qualitativa. 5.ed, editora Mestre Jou, São Paulo, 1981, 665p.
- [08] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA . Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 9 p. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>> Acesso em: 28 mar. 2017.
- [09] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Alterada pela Resolução CONAMA 410/2009 e 430/2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2017.
- [10] SANTA CATARINA. Lei nº 14.675 de 13 de abril de 2009. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências, 64 p. Disponível em <http://agenciaal.alesc.sc.gov.br/images/uploads/fotonoticia/14675_2009_lei.docx> Acesso em 28 mar 2017.
- [11] WPC. Water Pollution Control (1983). Nutrient Control. Manual of Practice FD-7 Facilities Design. Water Pollution control Federation. 203p.