

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE UM WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO HORIZONTAL

## HYDRODYNAMIC EVALUATION OF A HORIZONTAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND

Monique Nunes de Freitas<sup>1</sup>  
Catiane Pelissari<sup>1</sup>  
Benny Zuse Rousso<sup>1</sup>  
Victor Ybarzo Fechinie<sup>1</sup>  
Mayara Oliveira dos Santos<sup>1</sup>  
\*Pablo Heleno Sezerino<sup>1</sup>

Recibido el 23 de noviembre de 2017; Aceptado el 29 de marzo de 2019

### Abstract

*This paper's goal consisted on the evaluation of the hydrodynamic performance of a horizontal flow constructed wetland (HCW) component of a hybrid system employed in urban wastewater treatment, located in Florianópolis - south of Brazil. The hybrid system (composed by a downward vertical constructed wetland – DVCW, followed by the HCW) was operated under an average organic loading rate (OLR) of 40 g COD m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, whereas the WCH module was operated under an OLR of 4.4 g COD m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (considering the surface area). The HCW achieved load removals of 1.5 g COD m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (or 71% influent load removal), 0.3 g SST m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (or 73% influent load removal), 0.3 g P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (or 91% influent load removal), 1 g N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (or 81% influent load removal) and 1.6 g NT m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (or 70% influent load removal). The average WCH evapotranspiration was 2.2 mm.d<sup>-1</sup> or 8% of the hydraulic loading rate (HLR). The hydrodynamic indicators revealed that the HCW, under the smallest rainfall contribution (11 mm), showed a behavior close to the piston flow. By contrast, while under the highest rainfall contribution (57 mm), the reactor did not present a defined behavior, which resulted in a higher dispersion number and in a smaller tracer mass recovery (63.7%). The mean hydraulic detention time (HDT<sub>m</sub>) obtained was 6 days. Furthermore, two models of kinetic hydraulic were evaluated, the piston flow (PF) and the piston flow with residual concentration (PF k-C \*). The PF-C\* was the model that best represented the COD decay with a decay coefficient (k<sub>d</sub>) of 0.33 d<sup>-1</sup>.*

**Keywords:** hybrid system, hydrodynamics monitoring, urban wastewater.

<sup>1</sup>Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – ENS, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil

Autor correspondente: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, bairro Trindade, Florianópolis, Santa Catarina, CEP 88040-900, Brasil, Email: [pablo.sezerino@ufsc.br](mailto:pablo.sezerino@ufsc.br)

## Resumo

O objetivo deste artigo foi avaliar a hidrodinâmica e o desempenho de um wetland construído de fluxo horizontal (WCH) componente de um sistema híbrido, empregado no tratamento de esgoto sanitário e localizado em Florianópolis/SC, sul do Brasil. O sistema híbrido (composto por um módulo wetland construído de fluxo vertical descendente – WCVD, seguido do WCH) operou sob uma carga orgânica média afluyente de 40 g DQO m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, sendo que o módulo WCH operou sob uma carga orgânica média de 4.4 g DQO m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (considerando-se a área superficial), alcançando remoções em termos de cargas de 1.5 g DQO m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> ou 71% de eficiência, 0.3 g SST m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> ou 73% de eficiência, 0.3 g P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> ou 91% de eficiência, 1 g N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> ou 81% de eficiência e 1.6 g NT m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> ou 70% de eficiência. A evapotranspiração média obtida no WCH foi de 2.2 mm.d<sup>-1</sup> ou 8% da taxa de aplicação hidráulica (TAH). Avaliou-se o comportamento hidrodinâmico por meio de 3 testes com traçador salino NaCl, sob diferentes condições meteorológicas. Os indicadores hidrodinâmicos revelaram que o WCH, durante o período de menor contribuição pluviométrica (11 mm), apresentou comportamento próximo ao fluxo pistão, enquanto que sob maior contribuição pluviométrica (57 mm), o reator não apresentou comportamento definido, resultando em um maior número de dispersão e menor recuperação de massa do traçador (63.7%). O tempo de detenção hidráulico médio (TDH<sub>m</sub>) foi de 6 dias. Avaliou-se os modelos hidráulicos cinéticos de fluxo pistão (FP) e fluxo pistão com concentração residual (FP k-C\*), e o que melhor representou o decaimento de DQO foi o FP k-C\*, com coeficiente de decaimento (k<sub>d</sub>) de 0.33 d<sup>-1</sup>.

**Palavras chave:** sistema híbrido, monitoramento hidrodinâmico, esgoto sanitário.

## Introdução

Wetlands construídos (WC) são considerados uma ecotecnologia empregada no tratamento de águas residuárias, utilizando-se da interação entre as macrófitas aquáticas, as propriedades do meio filtrante e os micro-organismos para promover a remoção de matéria orgânica e de sólidos em suspensão, bem como transformar as frações nitrogenadas presentes nos esgotos afluentes (IWA, 2000). Os WC podem ser classificados em sistemas de escoamento superficial e de escoamento subsuperficial. Os de escoamento subsuperficial são os mais empregados no tratamento de esgotos sanitários, e podem ser divididos em WC verticais (WCV), ascendentes (WCVA) ou descendentes (WCVD), WC horizontais (WCH) ou, ainda, a combinação destes, resultando em sistemas híbridos.

A compreensão da vida útil de um *wetland* construído (WC), ou melhor a manutenção das condições de escoamento do meio filtrante, é um dos fatores limitantes para sua consolidação e maior adoção em escala prática. As condições de escoamento estão intrinsecamente relacionadas com as características de projeto e operação empregadas nos WC, as quais se mal conduzidas poderão influenciar no processo de colmatação precoce do maciço filtrante. A colmatação é um fenômeno caracterizado pela obstrução do meio poroso, pelo qual o meio filtrante dos WC perde, gradualmente, as características hidráulicas iniciais. Dessa forma, o aprofundamento do conhecimento acerca deste fenômeno é essencial para se alcançar a otimização desses sistemas (Nivala *et al.*, 2012; Knowles *et al.*, 2011).

Os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem dentro de um sistema de WC estão condicionados ao fluxo da água através do sistema. A importância dos fatores hidrodinâmicos na eficiência do tratamento é determinada pela duração da interação água-biota e pela proximidade das substâncias presentes na água com os locais de atividade biológica e física (Kadlec e Wallace, 2009; Ramirez, 2011). A presença de curto circuito ou zonas mortas em um WC afetam o tempo de contato e as velocidades de fluxo, sendo que alterações significativas no comportamento hidráulico culminam em modificações na eficiência de remoção de poluentes (Headley e Kadlec, 2007).

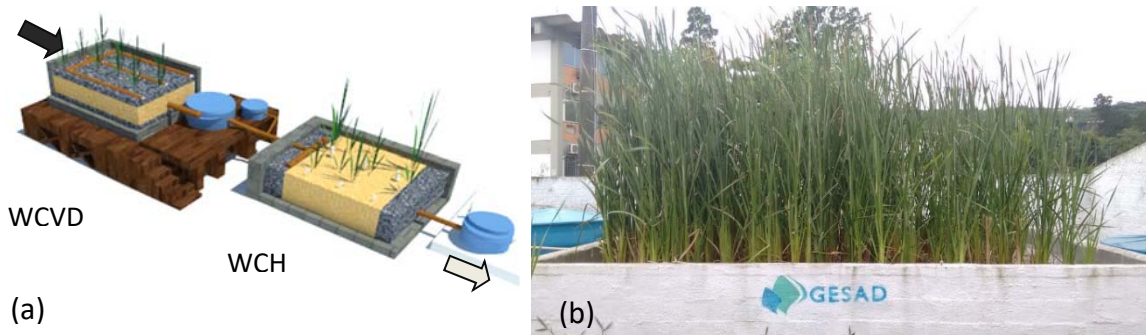
Para a compreensão acerca dos processos hidrodinâmicos que atuam no interior dos WC, o principal método que vem sendo empregado é o uso de traçadores, que permitem o acompanhamento do movimento da água em seu interior (Von Sperling e Paoli 2013; Matos *et al.*, 2015). Os resultados dos testes com traçadores permitem a detecção dos desvios da idealidade do fluxo, possibilitando determinar a distribuição dos tempos de detenção hidráulica em um sistema, sua eficiência volumétrica, dispersão e outros importantes parâmetros hidrodinâmicos.

Os valores dos coeficientes cinéticos de decaimento de poluentes são comumente estipulados assumindo-se a condição de comportamento de reatores com escoamento em pistão (Von Sperling e Paoli, 2013). Todavia, estes coeficientes acabam, em muitas situações, sendo subestimados em projeto, resultando em grandes áreas superficiais requeridas. Isto posto, torna-se fundamental expandir o conhecimento acerca do comportamento hidrodinâmico dos WCH, a fim de obter previsões mais satisfatórias na concepção final do sistema (García *et al.*, 2004), gerando assim maior confiabilidade para o dimensionamento dessa modalidade WC. Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar a hidrodinâmica e o desempenho de tratamento associando às condições de projeto e operação de um WCH, componente de um sistema híbrido, empregado no tratamento de esgoto sanitário.

## Metodologia

### Descrição da estação de tratamento de esgoto

O WCH estudado é uma unidade componente de uma estação experimental de tratamento de esgoto, a qual estava em operação desde junho de 2015, recebendo esgoto sanitário proveniente de uma rede coletora de esgoto municipal (Figura 1). A planta de tratamento é composta por um decanto digestor tipo tanque séptico (TS) seguido por um sistema híbrido de WC (WCVD seguido de um WCH). As duas unidades de WC foram plantadas com a macrófita *Typha domingensis* e areia grossa ( $d_{10} = 0.29$  mm e  $U = 4$ ) foi utilizada como material filtrante. Ressalta-se que ambos os WC operaram com um regime hidráulico com ciclos de alimentação e repouso de 3.5 dias na semana. Os critérios de projeto, bem como as dimensões de cada módulo estão descritos na Tabela 1.



**Figura 1.** (a) Esquema representativo do sistema híbrido e (b) vista do WCH.

**Tabela 1.** Critérios de projeto e aspectos construtivos do sistema híbrido de WC.

Parâmetro	WCVD	WCH
Carga orgânica carbonácea	41g DQO m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> (SEZERINO, 2006)	Depende do desempenho do WCVD
Desempenho de remoção de poluentes	Experimento de bancada	Cinética de primeira ordem (k=0.36d <sup>-1</sup> ) (SEZERINO, 2006)
Regime hidráulico	Ciclos de operação e repouso de 3.5 dias na semana	Ciclos de alimentação e repouso de 3.5 dias na semana
Alimentação	3 a 4 pulsos dia (PLATZER, 1999)	Dependente da alimentação do WCVD
Altura construída (m)	0.81	0.83
Altura útil (m)	0.70	0.60
Comprimento (m)	3.30	5.30
Largura (m)	2.30	3.00
Altura de saturação (m)	-	0.50

O sistema híbrido estudado foi submetido a uma carga orgânica carbonácea afluente média de 40 g DQO m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (considerando-se área superficial do WCVD de 7.5 m<sup>2</sup>), operando sob vazão média de 532 ± 158 L.d<sup>-1</sup>, referente a uma taxa de aplicação hidráulica (TAH) média de 69 ± 21 mm.d<sup>-1</sup>. A alimentação do WCVD foi realizada por bombeamento, com 3 a 4 pulsos no dia (192 L por pulso), totalizando uma vazão diária de 576 e 768 L.d<sup>-1</sup>, para os dias com 3 e 4 pulsos, respectivamente. No WCH, por esta unidade encontrar-se a jusante do WCVD, a alimentação foi realizada por gravidade, conforme o regime hidráulico operado no WCVD. Dessa forma, o WCH operou sob uma carga de 4.4 g DQO m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (considerando-se área superficial de 16 m<sup>2</sup>), e uma vazão média de 472 ± 129 L.d<sup>-1</sup> referente a uma TAH média de 27 ± 9 mm.d<sup>-1</sup>.

Durante o período desse estudo (janeiro de 2016 a novembro de 2017), coletou-se amostras para o monitoramento da qualidade do efluente tratado, em diferentes pontos de amostragens. Os pontos amostrados compreenderam o efluente do WCVD, efluente do WCH, bem como 3 pontos parciais, localizados centralmente na seção da unidade distribuídos a 25%, 50% e 75% ao longo do comprimento da unidade (Figura 2). As tubulações instaladas para coleta dos pontos parciais consistem em tubulações (DN150) perfuradas e envoltas com uma tela, para evitar a passagem de areia. Além de servirem como pontos de coleta, estas tubulações também foram utilizadas como piezômetros para aferir o nível de esgoto dentro do do WCH. A coleta de efluente em cada tubulação foi feita utilizando uma bomba peristáltica.



**Figura 2.** Pontos parciais de amostragem (tubulações centrais brancas) ao longo do comprimento do WCH.

As análises físico-químicas foram realizadas no mesmo dia das coletas, com periodicidade de quinze dias (sempre às 8h). Os parâmetros analisados foram, demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST), fósforo ortofosfato ( $P-PO_4^{3-}$ ), nitrogênio amoniacal ( $N-NH_4^+$ ), nitrogênio nitrito ( $N-NO_2^-$ ), nitrogênio nitrato ( $N-NO_3^-$ ) e nitrogênio total (NT). As análises dos parâmetros avaliados seguiram as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WEF, 2005), com exceção do  $N-NO_3^-$  que seguiu o método de Cataldo et al. (1975) e  $N-NH_4^+$  que foi realizado de acordo com recomendações de Vogel (1981).

### Caracterização hidrodinâmica

Para a caracterização hidrodinâmica, realizaram-se 3 testes com traçador salino (NaCl) aplicado em 200 L de esgoto afluente ao WCH. Os testes 1, 2 e 3 foram realizados em agosto de 2016 (após 1 ano e 1 mês de operação do WCH), em maio de 2017 (após 1 ano e 11 meses de operação do WCH) e em julho de 2017 (após 2 anos e 1 mês de operação do WCH), respectivamente. Para identificar as concentrações do traçador salino presente no efluente do WCH foram realizadas medições da condutividade elétrica do efluente, por meio de um condutímetro portátil (AKSO – modelo AK50). Cada teste teve um intervalo de duração de 2 semanas, sendo que a leitura da

condutividade elétrica foi realizada manualmente a cada 15 minutos, totalizando 11.5 h por dia de análises (8h às 19:30h). No período em que não obteve-se leituras de condutividade, assumiu-se que os volumes de saída contabilizados tivessem valores de condutividade hidráulica elétrica entre a última leitura de campo da noite e a primeira leitura de campo da manhã seguinte.

Para o cálculo da recuperação do traçador, utilizou-se o método dos momentos descrito por Kadlec e Wallace (2009). Determinou-se a porcentagem recuperada na saída do sistema mediante uma relação porcentual, dividindo a massa recuperada ( $M_0$ ) pela massa aplicada ( $M_t$ ) (Equação 1).

$$\% \text{ recuperado} = \frac{M_0}{M_t} \times 100 = \left[ \frac{\int_0^{\infty} Q(t)C(t)dt}{M_t} \right] \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$M_0$  = massa de traçador recuperada (g);

$C(t)$  = concentração do traçador na saída no tempo  $t$  ( $\text{g.L}^{-1}$ );

$Q$  = Vazão de saída no tempo  $t$  ( $\text{L.d}^{-1}$ );

$t$  = tempo, em dias (d);

$M_t$  = massa aplicada (g).

Por meio dos testes com traçador foi determinado o tempo de detenção hidráulica médio ( $\text{TDH}_m$ ) da unidade (Equação 2). Os resultados obtidos através dos testes subsidiaram a modelagem hidráulica-cinética de 1ª ordem, para determinação do coeficiente de decaimento de DQO ( $k_d$ ) para fluxo pistão (Equação 3) e fluxo pistão com concentração residual (Equação 4), bem como outros indicadores (Tabela 2). O número de dispersão foi calculado por meio da variância, considerando o modelo de dispersão de grande intensidade ( $d > 0.01$ ) e pequena intensidade ( $d < 0.01$ ), descrito por Levenspiel (2000). O número de tanques em série ( $N$ ) foi determinado conforme citado por Kadlec e Wallace (2009).

$$\text{TDH}_m = \left[ \frac{\int_0^{\infty} tQ(t)C(t)dt}{\int_0^{\infty} Q(t)C(t)dt} \right] \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$C(t)$  = concentração do traçador na saída no tempo  $t$  ( $\text{g.L}^{-1}$ );

$Q$  = Vazão de saída no tempo  $t$  ( $\text{L.d}^{-1}$ ).

$$C_e = C_a e^{-k_d t} \quad \text{Equação (3)}$$

$$C_e - C^* = (C_a - C^*) e^{-k_d t} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$C_e$  = concentração efluente ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C_a$  = concentração afluenta ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C^*$  = concentração residual ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$k_d$  = constante de reação de primeira ordem ( $\text{d}^{-1}$ );

$t$  =  $\text{TDH}_m$  (d).

**Tabela 2.** Indicadores hidrodinâmicos obtidos com os ensaios de traçador salino conduzidos no WCH.

Índice	Definição	Interpretação
Índice de Dispersão de Morril	$IDM = \frac{T_{90}}{T_{10}}$	Deve ser 1 para sistema pistonado ideal e por volta de 22 para sistema de mistura completa.
Índice de Curto Circuito	$ICC = \frac{T_i}{TDH_{teórica}}$	Para sistema com comportamento pistonado ideal, a razão é 1 e aproximadamente 0 para sistema com comportamento de mistura completa.
Índice de Tempo Modal de Retenção	$ITMR = \frac{T_p}{TDH_{teórico}}$	A relação se aproximará de 1 para comportamento pistonado e de 0 para comportamento de mistura completa. O valor da razão maior ou menor que 1 indica que a distribuição não está uniforme.
Eficiência volumétrica	$e_v = \frac{TDH_{médio}}{TDH_{teórico}}$	O valor 1 indica que foi feito uso integral do volume do sistema. O valor da razão maior ou menor que 1 indica a existência de curto circuitos e zonas mortas.

*Nota:*  $T_i$ : tempo no qual o traçador começa a aparecer;  $T_p$ : tempo no qual a concentração de pico do traçador é registrada;  $T_{10}$ : tempo no qual 10% do traçador passou pelo sistema; e  $T_{90}$ : tempo no qual 90% do traçador passou pelo sistema.

*Fonte:* Adaptada de Metcalf e Eddy (2003).

### Desempenho de remoção de poluentes

A avaliação do desempenho de tratamento foi realizada baseado em termos de carga aplicada e carga removida. Para isso, foi contabilizado os valores diários de vazão de entrada e saída de ambos os WC, por meio de medidores de vazão instalados afluente e efluente de cada módulo. Considerando os dados obtidos de vazão, foi possível realizar um balanço hídrico, considerando a diferença de vazão de entrada e vazão de saída e precipitação para quantificar as perdas hídricas devido a evapotranspiração (Equação 5).

$$V_{\text{aplicado}} + V_{\text{precipitação}} - V_{\text{saída}} - V_{\text{perdas}} = 0$$

**Equação (5)**

Onde:

$V_{\text{aplicado}}$  = volume de esgoto aplicado no WC (L);

$V_{\text{precipitação}}$  = volume referente a precipitação (L);

$V_{\text{saída}}$  = volume de esgoto efluente;

$V_{\text{perdas}}$  = volume referente às perdas do sistema (evapotranspiração, absorção pelas plantas).

Desta forma, com os dados de vazão de entrada e saída, perdas e os dados de concentração dos parâmetros analisados, foi possível inferir sobre o desempenho em termos de cargas aplicadas e removidas. Destaca-se que para efeito de cálculo, as perdas foram consideradas como evapotranspiração.

## **Resultados**

### Perdas hídricas no sistema híbrido

Em relação ao módulo de WCVD, utilizaram-se dados de 31 semanas de operação para a determinação das perdas do sistema, que para efeito de cálculo de cargas, foram consideradas

como evapotranspiração. O WCVD apresentou evapotranspiração média de  $7.9 \pm 4.2 \text{ mm.d}^{-1}$ , referente a 9.6% da TAH. O valor obtido de  $6.7 \pm 4.2 \text{ mm.d}^{-1}$ , como mediana, foi similar ao parâmetro de projeto ( $6 \text{ mm.d}^{-1}$ ), estabelecido a partir de estudo sob mesma condição climática (subtropical) em WCVD plantado com *Typha domingensis* (Pelissari, 2013). Para o cálculo das cargas aplicadas, optou-se pela utilização da mediana, devido a não normalidade da série histórica.

Para o balanço hídrico do módulo WCH, utilizaram-se dados de 23 semanas de operação. A evapotranspiração média obtida para o espaço amostral considerado ( $n = 23$ ) foi de  $2.7 \pm 1.8 \text{ mm.d}^{-1}$  e mediana de  $2.2 \text{ mm.d}^{-1}$ , a qual foi considerada no cálculo das cargas, representando 8% da TAH. O valor mediano de evapotranspiração obtido no WCH se assemelha aos menores valores obtidos por Headley et al. (2012), em WCH na Austrália, utilizando brita como meio suporte, plantados com *Phragmites australis*. Os autores obtiveram valores de evapotranspiração de  $3.2 \text{ mm.d}^{-1}$  a  $15.1 \text{ mm.d}^{-1}$ , com os menores valores de evapotranspiração nos primeiros meses, devido a necessidade de adaptação das plantas. Matos *et al.*, (2015), sob clima tropical, obteve evapotranspiração de 19% em WCH com 7 anos de operação empregado no tratamento de esgoto doméstico, utilizando escória de alto forno como material filtrante e plantado com *Typha latifolia*. Pelissari (2013), sob condição clima subtropical, obteve  $22 \text{ mm.d}^{-1}$  de evapotranspiração em WCH plantando com *Typha domingensis*, utilizando areia grossa como material filtrante.

#### Desempenho de remoção de poluentes nos módulos WCVD, WCH e sistema híbrido

O sistema híbrido apresentou elevado desempenho na remoção de matéria orgânica carbonácea, sólidos suspensos e nutrientes, com destaque para a unidade horizontal na remoção de nitrogênio total (redução de 70% em termos de carga). Ressaltando que o WCVD, a montante da unidade horizontal, exerceu papel importante na nitrificação em função das características aeróbias do meio filtrante. A remoção global do sistema esteve a cima de 90% para todos os parâmetros analisados (Tabela 3).

**Tabela 3.** Eficiência média de remoção promovida pelo WCVD, pelo WCH e pelo sistema híbrido, em termos de cargas aplicadas e removidas.

Parâmetros	Cargas médias aplicadas ( $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )	Efluente do WCVD		Efluente do WCH		Efluente do Híbrido	
		Eficiência de remoção (%)	Carga removida ( $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )	Eficiência de remoção (%)	Carga removida ( $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )	Eficiência de remoção (%)	Carga removida ( $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )
DQO	$40 \pm 10$	$89 \pm 3$	$35 \pm 10$	$71 \pm 11$	$1.5 \pm 0.6$	$98 \pm 0.8$	$38 \pm 11$
NT	$5.7 \pm 1.4$	$33 \pm 14$	$2 \pm 1$	$70 \pm 19$	$1.6 \pm 0.7$	$90 \pm 5$	$5 \pm 1$
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	$5.8 \pm 1.4$	$69 \pm 10$	$4 \pm 1$	$81 \pm 12$	$1 \pm 0.4$	$98 \pm 2$	$6 \pm 1$
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-	-	-	$98 \pm 1$	$0.1 \pm 0.1$	-	-
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-	-	$55 \pm 22$	$0.6 \pm 0.3$	-	-
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	$2.2 \pm 0.6$	$74 \pm 9$	$1.7 \pm 0.5$	$91 \pm 8$	$0.3 \pm 0.1$	$99 \pm 1$	$2 \pm 0.5$
SST	$4.3 \pm 2.7$	$89 \pm 13$	$3.9 \pm 1.4$	$72 \pm 31$	$0.3 \pm 0.2$	$98 \pm 2$	$5 \pm 3$



### Teste com Traçador no WCH

O Quadro 1 sumariza as informações referentes aos 3 testes realizados ao longo do período de pesquisa. Cabe destacar que o teste 1 foi realizado sob uma condição operacional distinta dos outros 2 testes, visto que a TAH média durante o teste 1 foi de 62.3 mm.d<sup>-1</sup>, e em 2017 houve um aumento da TAH média para 88.4 mm.d<sup>-1</sup> (42% da TAH inicial), a fim de manter a carga de DQO prevista em projeto de 41 g DQO m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>.

**Quadro 1.** Dados gerais sobre a aplicação dos 3 testes com traçador realizados no WCH.

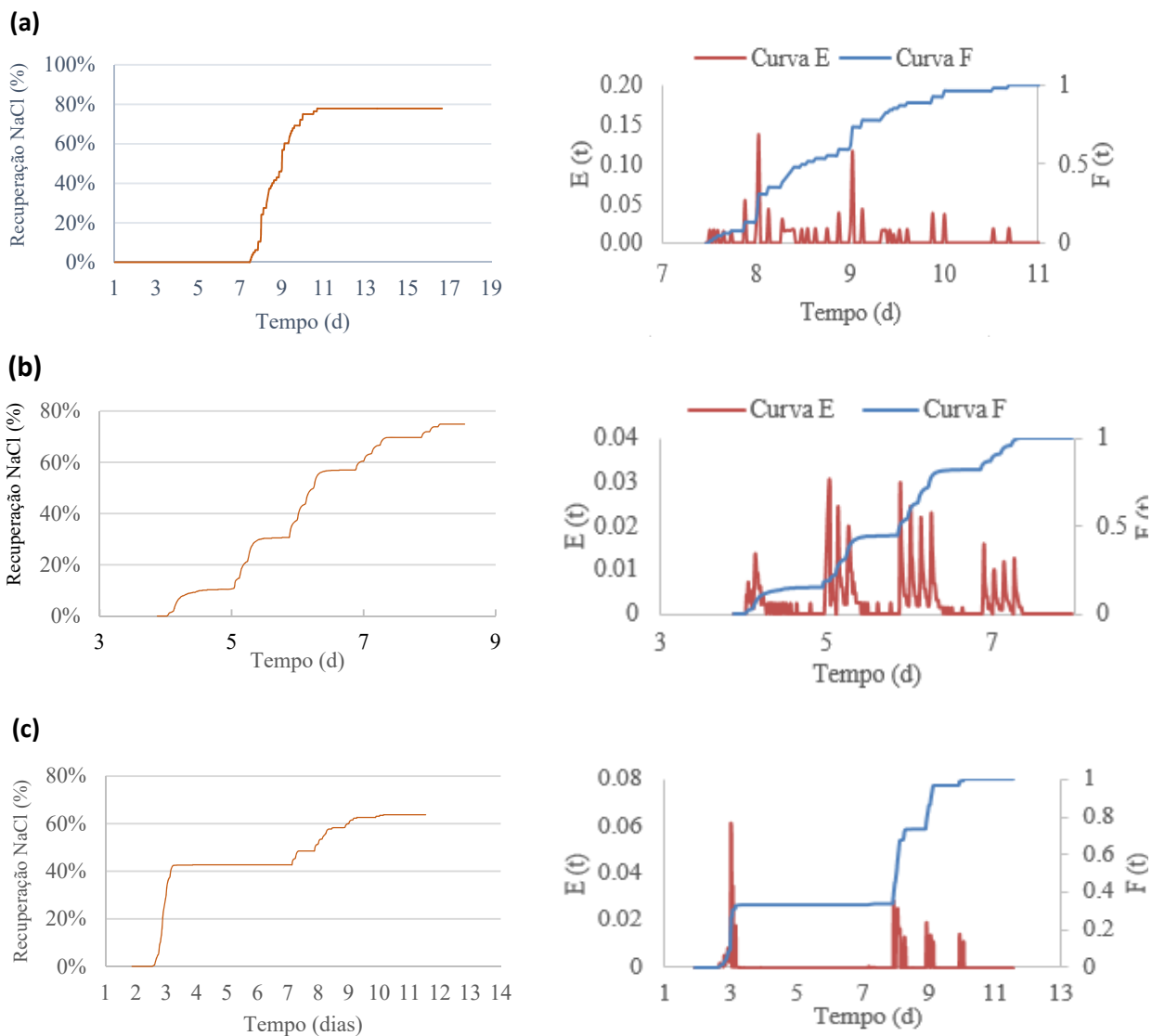
Massa de traçador (NaCl) aplicada no WCH	2 kg
Volume de afluente misturado com traçador	200 L
Concentração de traçador aplicada	10 g.L <sup>-1</sup>
Dia de aplicação do traçador	Teste 1: 01/08/16 Teste 2: 01/05/17 Teste 3: 31/07/17
Horário de aplicação do traçador (hh:mm)	10h 50min
Duração da aplicação do traçador	15 min
Δt para registro de dados no condutivímetro	Teste 1: 30 min; Testes 2 e 3: 15 min
Duração dos ensaios	14 dias

A representação gráfica da curva de distribuição do tempo de detenção ou curva E, como resposta do teste, é um reflexo do comportamento do fluxo dentro do WC, e a recuperação do traçador é obtida por meio do método dos momentos (Kadlec; Wallace, 2009). A curva F representa a curva cumulativa dos tempos de detenção hidráulica. As curvas de recuperação de massa, as curvas E e as curvas F de cada teste são apresentadas na Figura 3.

As oscilações na curva E em todos os ensaios registrados não refletem um comportamento esperado para teste de traçador, todavia elas justificam-se pela intermitência de alimentação da unidade a montante do WCH. Visto que o hidrograma resposta do WCVD repercute diretamente na recuperação de massa do traçador na saída da unidade horizontal.

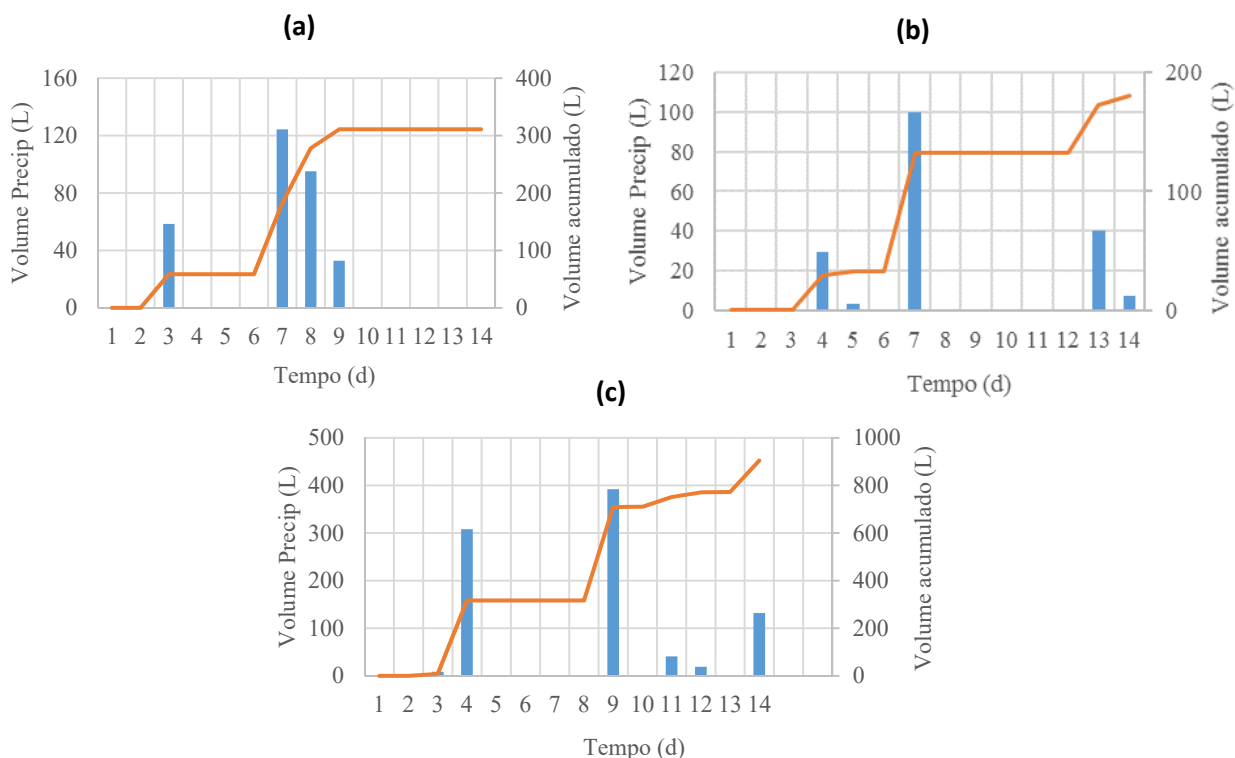
Os gráficos resposta nos três testes apresentaram nitidamente diferenças gráficas na saída do traçador e, provavelmente, tais divergências ocorreram em função de 2 razões principais, quais sejam: precipitação pluviométrica e TAH diferentes. Durante os 14 dias do teste 1, realizado em agosto de 2016, houve uma contribuição pluviométrica no WCH de 19 mm ou 311 L (Figura 4 a), sob uma TAH de 62.3 mm.d<sup>-1</sup>. Infere-se que esta contribuição pode ter interferido na saída do traçador, a partir do sétimo dia de teste, visto que o maior volume precipitado foi no mesmo dia em que o traçador começou a ser identificado no efluente do WCH. Geralmente, resultados de

testes com traçadores são considerados aceitáveis se pelo menos 80% da massa do traçador adicionado na entrada é recuperado na saída do reator (Headley e Kadlec, 2007). O teste 1 obteve uma recuperação satisfatória de massa do traçador, em torno de 79.9%, sendo que foram necessários aproximadamente 9 dias para recuperação de 50% da massa de NaCl aplicada.



**Figura 3.** Curvas de recuperação de massa (%), curvas E e curvas F obtidas com a realização dos 3 testes conduzidos. (a) teste 1; (b) teste 2; (c) teste 3.

Durante os 14 dias do teste 2, a contribuição pluviométrica no WCH foi de 11 mm ou 180 L, sob uma TAH de  $88.4 \text{ mm.d}^{-1}$  (Figura 4 b). Dos três testes realizados, o teste 2 foi o que refletiu melhor o comportamento considerando-se uma menor contribuição pluviométrica, ou seja, com menor interferência das chuvas. Devido a isso, no gráfico da curva E (Figura 3 b), é possível notar a resposta do WCH em relação aos pulsos de alimentação do WCVD a montante, visto que a alimentação variou de 3 a 4 pulsos por dia, o que repercutiu diretamente na recuperação do traçador. Nos demais testes, a intensa contribuição pluviométrica interferiu na visualização desse comportamento operacional, justificando a diferença dos picos de recuperação de massa nas curvas E.



**Figura 4.** Precipitações pluviométricas registradas durante os testes. (a) teste 1; (b) teste 2; (c) teste 3.

Observou-se o aparecimento do traçador a partir do quarto dia do teste 2, que, por sua vez, coincidiu com uma contribuição de chuva em torno de 2 mm, referente a 29 L. O referido teste obteve uma recuperação satisfatória de massa de NaCl, em torno de 75%, sendo que foram necessários aproximadamente 6.3 dias para recuperação de 50%.

No teste 3 houve a maior contribuição pluviométrica de todos os três testes, com 57 mm ou 905 L de chuva durante os 14 dias de ensaio (Figura 4 c), destacando que o teste ocorreu sob mesma

TAH do ensaio anterior. A curva E (Figura 3 c) apresentou picos espaçados de recuperação de massa do traçador, que provavelmente foi devido a diluição do mesmo dentro do reator. Além disso, essa precipitação provavelmente contribuiu para a dispersão do traçador dentro do reator, visto que a recuperação de sal foi menor em comparação aos outros testes, em torno de 64%.

#### Indicadores hidrodinâmicos no WCH

Em resposta aos testes com traçador realizados, a Tabela 4 sumariza os indicadores hidrodinâmicos obtidos.

**Tabela 4.** Indicadores hidrodinâmicos do WCH referentes aos testes com traçador.

Indicadores hidrodinâmicos	Teste 1	Teste 2	Teste 3
$t_i$ (d)	7.5	4.0	2.5
$t_p$ (d)	8.0	5.0	7.1
$t_{10}$ (d)	7.8	4.6	2.8
TDH <sub>nominal</sub> (d)	9.0	7.0	7.0
TDH <sub>médio</sub> (d)	8.7	5.9	6.7
$e_v$	0.97	0.84	0.95
ICC	0.83	0.58	0.36
ITMR	0.89	0.72	1.02
Rec. Massa (%)	79.9	75	63.7
d - grande intensidade (Levenspiel, 2000)	0.004	0.016	0.087
d - pequena intensidade (Levenspiel, 2000)	0.004	0.016	0.079
N (Kadlec; Wallace, 2008)	11	7	10

*Legenda:*  $t_i$ : Tempo no qual o traçador começa a aparecer;  $t_p$ : Tempo de aparecimento dos picos de carga do traçador;  $t_{10}$ : Tempo no qual 10% do traçador passou pelo sistema; TDH<sub>nominal</sub>: Tempo de detenção hidráulico nominal; TDH<sub>médio</sub>: Tempo de detenção hidráulico médio;  $e_v$ : Eficiência volumétrica; ICC: Índice de Curto Circuito; ITMR: Índice de Tempo Modal de Retenção; Rec. Massa: Recuperação de massa.

Os testes demonstraram excelente aproveitamento do volume do reator, apresentando valores superiores a 84% de eficiência volumétrica. Como mencionado anteriormente, o primeiro teste diferenciou-se dos demais por ter sido realizado sob condições de operação distinta, ou seja, sob uma TAH menor, o que refletiu em TDH<sub>m</sub> maior que os demais testes. De acordo Kadlec e Wallace (2009), o TDH é inversamente proporcional a TAH, justificando-se o resultado obtido.

Por análise do índice de curtos-circuitos (ICC), o primeiro e segundo testes apresentaram tendência ao escoamento de fluxo pistão, enquanto o terceiro refletiu comportamento próximo a mistura completa. Analisando-se os valores do ITMR, nos 2 primeiros testes o comportamento se aproximou do escoamento pistonado, corroborando com os resultados do número de tanques em série (N), que também refletiram a mesma constatação. O ITMR do teste 3 maior que 1, indicou que a distribuição não estava uniforme. Cabe ressaltar que o tempo de aparecimento dos

picos de carga do traçador ( $t_p$ ) foi inferior ao tempo médio de detenção hidráulica nos testes 1 e 2. Segundo Borges *et al.* (2009), isso indica a formação de pequenos canais preferenciais e a ocorrência de regiões de estagnação (zonas mortas). Neste sentido, o desenvolvimento do sistema radicular pode promover distúrbios no maciço filtrante que conduzem o escoamento por estes canais preferenciais ou, contrariamente, poderia levar à estagnação do fluxo subsuperficial.

Guimarães (2013), em teste com traçador utilizando NaCl, obteve recuperação de massa de 69%, número de dispersão de 0.02 e eficiência volumétrica de 1.14, indicando um reator com tendência ao fluxo pistão e com ocorrência de caminhos preferenciais e/ou zonas mortas. Matos *et al.*, (2015), empregando também traçador salino, obtiveram recuperação de 72%, ICC de 0.19,  $e_v$  de 0.82 e número de dispersão de 0.16, tratando-se de um WCH também com tendência ao fluxo pistão.

USEPA (2000) reporta números de dispersão para WCH na faixa de 0.07 e 0.35, categorizando valores menores que 0.025 como comportamento próximo ao fluxo pistão, e resultados maiores que 0.20 como fluxo com alto grau de dispersão. O WCH em estudo apresentou valores baixos de dispersão nos 2 primeiros ensaios, refletindo tendência ao escoamento de fluxo pistão. Enquanto o terceiro ensaio apresentou grau de dispersão moderada.

A intensa interferência da precipitação no teste 3 corroborou para os resultados divergentes, em relação a interpretação do comportamento hidrodinâmico. Infere-se que a ocorrência de precipitação, adiantou a saída do traçador e, possivelmente, o conduziu às zonas mortas e/ou caminhos preferenciais, repercutindo em uma menor porcentagem de recuperação de massa de traçador e maior TDH<sub>m</sub> (comparando-se ao teste 2). Devido a menor interferência das chuvas no teste 2 e por melhor representar o atual comportamento hidrodinâmico do sistema, optou-se por utilizar os resultados deste ensaio, para determinação do coeficiente de decaimento ( $k_d$ ) através da modelagem hidráulico-cinética.

#### Modelagem hidráulico-cinética no WCH

A partir dos dados observados de decaimento de DQO ao longo do comprimento do WCH e do teste 2 de traçador, estimou-se dados de DQO para os modelos fluxo pistão (FP) e fluxo pistão modificado com concentração residual (FP  $k-C^*$ ), a fim de se determinar os respectivos coeficientes de decaimento ( $k_d$ ).

Os indicadores que foram utilizados para determinar o modelo que melhor representa o decaimento da DQO observada, foram o maior valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a soma dos erros quadrados total (SQT) e a soma dos quadrados dos resíduos ( $SQ_{res}$ ) para os valores observados e estimados. Os valores observados e estimados de acordo com o modelo fluxo pistão e pistão modificado com residual são apresentados nas Figura 5a e Figura 5b, respectivamente. Os coeficientes de decaimento e os indicadores de calibração obtidos na modelagem estão sumarizados na Tabela 5.

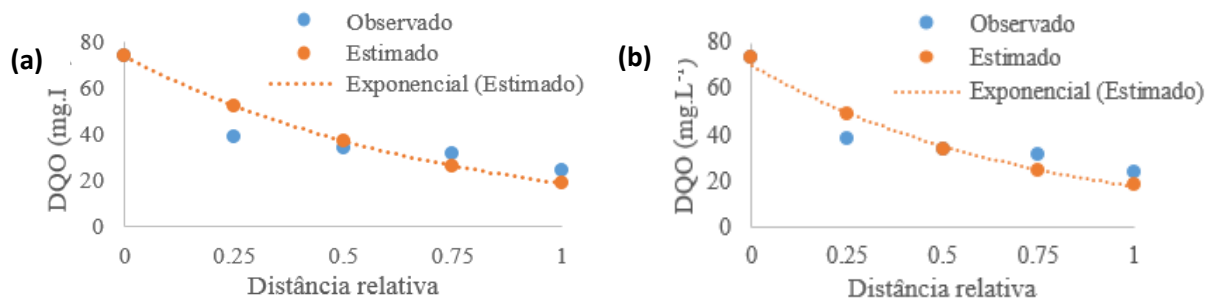


Figura 5. Valores observados e estimados de DQO segundo o modelo de FP(a) e FP k-C\* (b).

Tabela 5. Resumos dos resultados da modelagem hidráulica-cinética.

Dados do modelo	FP	FP k-C*
TDH <sub>m</sub> (d)	5.9	5.9
C* (mg.L <sup>-1</sup> )	-	10
R <sup>2</sup>	0.83	0.86
SQT	1498.3	1498.3
SQ <sub>res</sub>	257.5	184.5
k <sub>d</sub>	0.23	0.33

Constatou-se que as concentrações finais estimadas em termos de DQO nos dois modelos foram menores que as observadas, com uma diferença de estimativa em torno de 24% para o modelo FP e cerca de 23% para o FP modificado. A concentração residual considerada para a modelagem foi a menor concentração observada no efluente do WCH, ao longo do tempo de monitoramento, referente a 10 mg.L<sup>-1</sup>. Para o modelo FP obteve-se k<sub>d</sub> de 0.23 d<sup>-1</sup>, enquanto que para o modelo FP modificado obteve-se k<sub>d</sub> de 0.33 d<sup>-1</sup> com valor de R<sup>2</sup> maior que o modelo FP.

Os valores obtidos de k<sub>d</sub> estão dentro da gama de resultados reportados na literatura. Em estudo conduzido em Santa Catarina, em um WCH tratando esgoto doméstico sob carga de 22.7 g DQO.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, Guimarães (2013) obteve resultados similares, com k<sub>d</sub> de 0.35 d<sup>-1</sup> para modelo FP e k<sub>d</sub> de 0.38 d<sup>-1</sup> para modelo FP k-C\*, considerando C\* de 15 mg.L<sup>-1</sup>. Von Sperling e Paoli (2013) obtiveram k<sub>d</sub> de 0.81 d<sup>-1</sup> em modelo de FP, e k<sub>d</sub> de 1.15 d<sup>-1</sup> em modelo de FP k-C\*, considerando C\* de 17 mg.L<sup>-1</sup>, em WCH empregado no tratamento de esgoto doméstico. Já Fia (2009) obteve de 0.55 a 1.63 d<sup>-1</sup> para modelo FP e de 1.76 a 4.57 d<sup>-1</sup> para FP k-C\*, sob diferentes taxas de aplicação de carga, tratando efluente de suinocultura.

Os modelos auxiliam na projeção de sistemas de engenharia, porém precisam ser devidamente calibrados de acordo com a respectiva situação de contorno. A presença do residual na modelagem de matéria orgânica faz com que o decaimento seja intenso no início do leito até que

se atinja o valor mínimo estipulado, como de fato se observa no comportamento de WCH. Notadamente, o modelo FP modificado representou melhor o decaimento da matéria orgânica em termos de DQO, representando 92% do  $k_d$  de projeto, referente a  $0.36 \text{ d}^{-1}$ .

## Conclusões

Com base no monitoramento físico-químico e hidrodinâmico do WCH pertencente a um sistema híbrido, ao longo de 1 ano e 9 meses de pesquisa, constatou-se que:

- A evapotranspiração do WCVD foi de 9.6% da TAH ou  $6.7 \text{ mm.d}^{-1}$ , similar ao parâmetro de projeto de  $6 \text{ mm.d}^{-1}$ ;
- A evapotranspiração média do WCH foi inferior ao esperado e resultou em 8% da TAH ou  $2.2 \text{ mm.d}^{-1}$ ;
- O WCVD alcançou remoções das cargas aplicadas de  $35 \text{ g DQO m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 89% de eficiência,  $3.9 \text{ g SST m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 89% de eficiência,  $1.7 \text{ g P-PO}_4^{3-} \text{ m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 74% de eficiência,  $4 \text{ g N-NH}_4^+ \text{ m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 69% de eficiência e  $3 \text{ g NT m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 33% de eficiência;
- O WCH alcançou remoções das cargas aplicadas de  $1.5 \text{ g DQO.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 71% de eficiência,  $0.3 \text{ g SST.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 73% de eficiência,  $0.3 \text{ g P-PO}_4^{3-} \text{ m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 91% de eficiência,  $1 \text{ g N-NH}_4^+ \text{ m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 81% de eficiência e  $1.6 \text{ g NT m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 70% de eficiência;
- A remoção global das cargas aplicadas promovidas pelo sistema híbrido foi de  $38 \text{ g DQO m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 98% de eficiência,  $5 \text{ g SST m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 98% de eficiência,  $2 \text{ g P-PO}_4^{3-} \text{ m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 99% de eficiência,  $6 \text{ g N-NH}_4^+ \text{ m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 98% de eficiência e  $5 \text{ g NT m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  ou 90% de eficiência;
- Os testes com traçador revelaram que a precipitação pluviométrica causou alterações no comportamento hidrodinâmico do escoamento no WCH. Visto que o teste 2, com menor volume de contribuição de chuva, apresentou uma curva E que melhor representou a recuperação do sal, como resposta ao regime de alimentação do sistema, com picos bem definidos de recuperação de sal. Em contrapartida, o teste 3, com maior contribuição pluviométrica, obteve maior número de dispersão e os indicadores hidrodinâmicos apontaram uma distribuição não uniforme, com caminhos preferenciais e/ou zonas mortas, além da menor recuperação de massa do traçador;
- O TDH médio do WCH obtido através dos testes com traçador foi de 6 dias, equivalente a 86% do TDH nominal (7 dias);
- Dos modelos hidráulico-cinéticos testados para o WCH, o modelo fluxo pistão com concentração residual representou melhor o decaimento da matéria orgânica em termos de DQO, representando 92% do  $k_d$  previsto em projeto;
- As condições de projeto foram seguidas, mantendo-se uma carga aplicada de  $40 \pm 11 \text{ g DQO m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  na unidade WCVD, cargas inferiores a  $15 \text{ g SST m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  em ambas as unidades e coeficiente de decaimento em termos de DQO igual a  $0.33 \text{ d}^{-1}$  para o WCH, muito próximo ao previsto em projeto referente a  $0.36 \text{ d}^{-1}$ ;
- A ecotecnologia avaliada se apresentou como uma excelente alternativa para tratamento de esgotos de forma descentralizada.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os pesquisadores do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD); à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) pelo suporte financeiro.

## Referências

- APHA, American Public Health Association; AWWA, American Water Works Association, WEF, Water Environmental Federation (2005) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21st ed. APHA, Washington, DC: APHA.
- Borges, A. C., Matos, A. T., Calijuri, M. C., Oliveira, G. H. H., Roldão, J. S. F. (2009) Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas tropicais, *Engenharia Agrícola*, **29**(2), 301-310.
- Cataldo, D. A., Maroon, M., Schrader, L., Youngs, L. (1975) Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid, *Comum Soil Sci. Plant Anal.* **6**, 71-80.
- Fia, F. R. (2009) *Modelo de remoção de matéria orgânica e nutrientes de águas residuárias da suinocultura em sistemas alagados construídos*. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 160 pp.
- García, J., Chiva, J., Aguirre, P., Alvarez, E., Sierra, J. P., Ujeriego, R. (2004) Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size, *Ecological Engineering*, **23**, 177-187.
- Guimarães, T. M. V. A. (2013) *Comportamento de filtro plantado horizontal (wetland construído) no tratamento de esgoto unifamiliar*, Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 89 pp.
- Headley, T. R., Kadlec, R. H. (2007) Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide, *Ecohydrology & Hydrobiology*, **7**(3-4), 269-282.
- Headley, T. R., Davison, L., Huett, D. O., Muller, R. (2012) Evapotranspiration from subsurface horizontal flow wetlands planted with *Phragmites australis* in sub-tropical Australia, *Water Research*, **46** (2), 345-354.
- IWA, International Water Association. (2000) *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*, Scientific and Technical Report, 8, Londres, Inglaterra: IWA Publishing, 156 pp.
- Kadlec, R. H., Knight, R.L. (1996) *Treatment Wetlands*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 893 pp.
- Kadlec, R. H., Wallace, S. C. (2009) *Treatment Wetlands*, 2 ed. Florida, USA. Taylor & Francis Group Publishers, INC. 1000 pp.
- Knowles, P., Dotro, G., Nivala, J., García, J. (2011) Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors, *Ecological Engineering*, **37**(2), 99-112.
- Levenspiel, O. (2000) *Engenharia das reações químicas cálculo de reatores*, 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000, 563 pp.
- Matos, M. P., Von Sperling, M., Matos, T. A., Passos, R. G. (2015) Uso de traçador salino para avaliação da colmatagem e das condições hidrodinâmicas em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial, *Engenharia Agrícola*, **35**(6), 1137-1148.
- Metcalf, L., Eddy, H. (2003) *Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse*, 4. ed. New York: McGraw-Hill, 920 pp.
- Nivala, J., Knowles P., Dotro, G., García, J., Wallace, S. (2012) Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Measurement, modeling and management, *Water Research*, **46**(6), 1625-1640.
- Pelissari, C. (2013) *Filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) empregados no tratamento de efluente de instalações de bovinocultura de leite*. Tese de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Florianópolis, 147 pp.
- Platzer, C. (1999) Design recommendation for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification, *Water Science and Technology*, **40**(3), 257-263.



- Ramírez, C. A. S. (2011) *Evaluación hidrodinámica de humedales*, Tese de maestrado, Maestría en Ecotecnología, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira - Colômbia, 189 pp.
- Rousseau, D. P. L., Vanrolleghem, P. A., Pauw, N. D. (2004) Model based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: A review, *Water Research*, **38**(6), 1484-1493.
- Rouso, B. Z. (2017) *Avaliação de um sistema híbrido de wetlands construídos empregado no tratamento de esgoto sanitário*. Dissertação de maestrado, Programa de pós graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 188 pp.
- Sezerino, P. H. (2006) *Potencialidade dos Filtros Plantados com Macrófitas (Constructed Wetlands) no Pós-Tratamento de Lagoas de Estabilização sob Condições de Clima Subtropical*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 166 pp.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency (2000) *Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment*, EPA 625-R-99-010, 166 pp.
- Vogel, A. L. (1981) *Análise inorgânica qualitativa*, 4 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 690 pp.
- Von sperling, M, Paoli, A. C. (2013) First-order COD decay coefficients associated with different hydraulic models applied to planted and unplanted horizontal subsurface-flow constructed wetlands, *Ecological Engineering*, **77**, 205-209.