

# REVISTA AIDIS

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

## AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE DESEMPENHO EM WETLAND CONSTRUÍDO VERTICAL DE FUNDO SATURADO EMPREGADO NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

Victor Ybarzo Fechine<sup>1</sup>  
Leandro Bassani<sup>1</sup>  
Amanda Kempt Schroeder<sup>1</sup>  
Amanda da Cruz<sup>1</sup>  
Catiane Pelissari<sup>1</sup>  
\* Pablo Heleno Sezerino<sup>1</sup>

## HYDRODYNAMIC AND PERFORMANCE EVALUATION IN PARTIALLY SATURATED VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND FOR URBAN WASTEWATER TREATMENT

Recibido el 31 de enero de 2019; Aceptado el 6 de febrero de 2020

### Abstract

Constructed wetlands (CW) are ecotechnologies widely used for secondary and advanced wastewater treatment. Among typical configurations, vertical flow CW (VFCW) has become noticeable and has been intensified purposing to improve carbonaceous organic matter removal and nitrogen transformations. Partially saturated VFCW (VFCW-PS) stands out due to not require external energy source, which prevail inside of it oxidative and reductive conditions. Therefore, in this study hydrodynamic and treatment performance on VFCW-PS was evaluated under design and operational conditions. The VFCW-PS had 7.5 m<sup>2</sup> of surface area, 0.75 m total depth, being the last 0.40 m saturated with the effluent. The bed media was composed of 0.03 m thickness of fine gravel layer on the top (n.1), 0.62 m of coarse sand intermediate layer ( $d_{10} = 0.29$  mm;  $d_{60} = 1.16$  mm; Uniformity = 4.05) and 0.10 m of fine gravel layer on the bottom. The macrophyte employed was *Typha domingensis*, which was initially planted at a ratio of 4 plants / m<sup>2</sup>. VFCW-PS received a medium organic loading rate of  $38.27 \pm 16.31$  gCOD/m<sup>2</sup>.day and a hydraulic loading rate of  $83.4 \pm 4.76$  mm/day, with an intermittent feeding with 3 and 4 pulses per day with 3.5 resting period. The treatment performance of the VFCW-PS was evaluated throughout 42 months, based on the loading rate removal from the treatment unit, analysis along the depth of the bed media and during the drainage time duration of the treated wastewater. Moreover, tracer tests with saline tracers were realized for Hydraulic Retention Time (HRT) determination of the VFCW-PS. Results indicated an areal removal load of 34, 4.5, e 2.25 g/m<sup>2</sup>.day of COD, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, respectively, as also an alkalinity consumption along the thickness of the bed media. HRT observed (0.88 and 1.01 days) in VFCW-PS was close to the theoretical. VFCW-PS presented itself as a potential intensification of classical modality of VFCW, highlighting the efficiency of 93 % on carbonaceous organic matter and 69 % and 82 % for nutrients N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, respectively

**Keywords:** vertical flow constructed wetland, saturation, tracer test, areal removal load, redox potential.

<sup>1</sup> Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado - GESAD, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 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

Wetlands construídos (WC) são uma ecotecnologia amplamente utilizada para o tratamento secundário e avançado de esgoto sanitário. Dentre as categorias existentes, destacam-se os WC de fluxo vertical (WCV), os quais vem sendo otimizados com vistas à melhoria de remoção de matéria orgânica carbonácea e às transformações do nitrogênio presente nos esgotos. Das formas de otimização existentes sem inserção de energia externa, destaca-se o WCV com fundo saturado (WCV-FS), o qual possui ambientes oxidativos e redutores na mesma unidade de tratamento. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a hidrodinâmica e o desempenho de tratamento de um WCV-FS associando condições de projeto e de operação. O WCV-FS avaliado possuía 7.5 m<sup>2</sup> de área superficial e 0.75 m de profundidade total, sendo os últimos 0.40 m saturados com o próprio efluente submetido ao tratamento. O material filtrante foi composto por camadas sobrepostas de 0.03 m de pedra brita nº. 1, seguido de 0.62 m de areia grossa ( $d_{10} = 0.29$  mm;  $d_{60} = 1.16$  mm; Uniformidade de 4.05) na camada intermediária, e 0.10 m de pedra brita nº. 1 na camada inferior. A macrófita empregada foi a *Typha domingensis*, a qual foi inicialmente plantada em uma razão de 4 mudas/m<sup>2</sup>. O módulo de tratamento foi submetido a uma carga orgânica aplicada média de  $38.27 \pm 16.31$  gDQO/m<sup>2</sup>.dia e uma carga hidráulica aplicada de  $83.4 \pm 4.76$  mm/dia, sob um regime de alimentação intermitente de 3 a 4 pulsos por dia, com 3.5 dias de operação e de 3.5 dias repouso. Ao longo de 42 meses de operação foi avaliado o desempenho de tratamento do WCV-FS, baseado na remoção de carga da unidade de tratamento, análises ao longo da profundidade do maciço filtrante e, também, ao longo do tempo de drenagem do efluente tratado. Além disso, testes com traçador salino foram conduzidos para a determinação do tempo de retenção hidráulica no módulo WCV-FS. Os resultados indicaram uma remoção de carga por área de 34, 4.5, e 2.25 g/m<sup>2</sup>.dia de DQO, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, respectivamente, bem como um consumo de alcalinidade ao longo da profundidade do maciço filtrante. O tempo de detenção hidráulico medido (0.88 e 1.01 dias) no WCV-FS foi próximo ao teórico. O WCV-FS apresentou uma potencialidade de otimização da modalidade clássica de WCV, destacando-se eficiência de 93 % na remoção de matéria orgânica carbonácea e 69 % e 82 % para os nutrientes N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, respectivamente.

**Palavras chave:** wetland construído de fluxo vertical, saturação de fundo, teste com traçador, remoção de carga por área, potencial redox.

## Introdução

Wetlands construídos (WC) são uma tecnologia amplamente utilizada no mundo para o tratamento secundário e avançado de esgoto sanitário, apresentando-se como uma ecotecnologia aplicável ao tratamento descentralizado. Normalmente associada a outras tecnologias, os WC possuem diversas categorias e combinações possíveis, sendo cada uma delas mais adequada para diferentes requerimentos de qualidade de tratamento.

Dentre as diferentes categorias de WC, destacam-se os wetlands construídos verticais (WCV), os quais apresentam condições propícias para a oxidação da matéria orgânica carbonácea e a nitrificação da amônia presentes nas águas residuárias submetidas ao tratamento nestas unidades. Contudo, a remoção de nitrogênio total contido no esgoto afluente é limitada, pois, convencionalmente, os módulos WCV não propiciam ambiente favorável à desnitrificação do nitrato formado.

Visando a promoção dos mecanismos de nitrificação e desnitrificação em um mesmo módulo de WCV, modificações foram propostas ao longo dos anos, destacando-se aquelas nos quais há indução de energia externa, tais como o caso da aeração intermitente ou até mesmo a recirculação do efluente tratado (Dotro *et al.*, 2017). Uma modificação no WCV sem indução de energia externa está relacionada à saturação da camada de fundo do leito filtrante com o próprio esgoto submetido ao tratamento, a fim de manter um ambiente aeróbio na camada superficial e um ambiente anóxico/anaeróbio na porção de fundo do mesmo módulo. Esta modificação vem sendo denominada de wetland construído vertical de fundo saturado (WCV-FS) (Dong e Sun, 2007; Pelissari *et al.*, 2017; 2018).

Os WCV-FS, além de apresentarem potencialidade de remoção de matéria orgânica carbonácea e das frações de nitrogênio presentes nas águas residuárias, estes podem apresentar ainda, uma redução da área superficial requerida comparativamente às demais modalidades de WC, tais como os sistemas híbridos (WCV seguido de módulos de escoamento subsuperficial horizontal) (Ilyas & Masih, 2017; Silveira, Belli Filho, Philippi, Kim, & Molle, 2015), trazendo assim redução de custos ao projeto e implantação destas tecnologias. Diferentes critérios de dimensionamento e operação podem ser empregados nos WCV-FS, destacando-se os carregamentos orgânicos, inorgânicos e hidráulicos aplicados, o regime de alimentação e os índices hidrodinâmicos associados (Sezerino *et al.*, 2018; Pelissari *et al.*, 2017). No entanto, essa variedade de critérios e sua não especificidade dificulta a replicação da tecnologia.

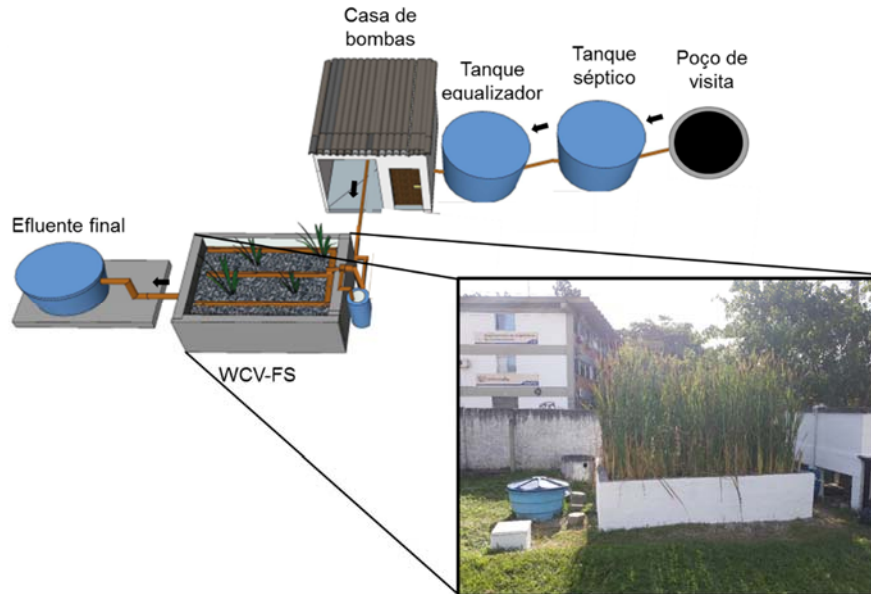
Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar a hidrodinâmica e o desempenho de tratamento associando às condições de projeto e operação de um WCV-FS empregado no tratamento de esgoto sanitário, com vistas a disseminação desta modalidade como uma alternativa descentralizada para a ampliação dos serviços de esgotamento sanitário.

## Metodologia

### Descrição da estação de tratamento de esgoto

O WCV-FS estudado é uma unidade componente de uma estação experimental de tratamento de esgoto, em operação desde junho de 2015, e está localizada nas coordenadas 27°36'12.64"S de latitude e 48°31'14.43"O de longitude, em Florianópolis, sul do Brasil. O esgoto sanitário submetido ao tratamento é coletado em um poço de visita (PV) pertencente a rede de esgoto da concessionária de saneamento do município, seguindo para a unidade de tratamento primário composta por um decanto-digestor tipo tanque séptico (TS), cujo efluente é equalizado e bombeado de forma intermitente ao WCV-FS (Figura 1). O WCV-FS possuía 7.5m<sup>2</sup> de área superficial, sendo composto por camadas sobrepostas de material filtrante com 0.03m de pedra brita (diâmetro variando de 9.5 a 19 mm) na superfície, cuja função é a melhoria na distribuição do esgoto aplicado seguido de uma camada com 0.62m de areia grossa ( $d_{10} = 0.29\text{mm}$ ;  $d_{60} = 1.16\text{mm}$ ; Uniformidade de 4.05), e por fim, 0.10m de pedra brita empregada como proteção da

tubulação de coleta do efluente tratado. Dos 0.75m de perfil vertical do leito filtrante, os últimos 0.40m permaneceram saturados com o esgoto submetido ao tratamento, seguindo recomendações de Santos *et al.* (2016). A macrófita empregada é a *Typha domingensis*, a qual foi inicialmente plantada com uma razão de 4 mudas/m<sup>2</sup>.



**Figura 1.** Fluxograma do arranjo tecnológico composto por TS seguido de WCV-FS. Em destaque a foto do módulo WCV-FS.

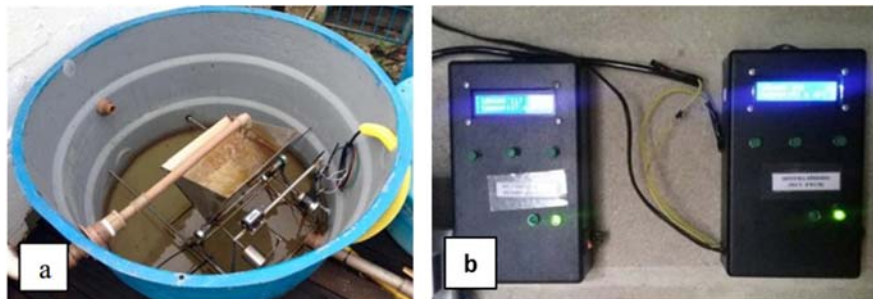
Durante o período desse estudo (junho de 2015 a dezembro de 2018), o WCV-FS operou com uma carga orgânica e hidráulica média aplicadas de 38 gDQO/m<sup>2</sup>.d e 83 mm/dia, respectivamente. A alimentação do WCV-FS foi realizada por bombeamento por meio de pulsos (3 pulsos nas segundas e quintas feiras e 4 pulsos nas terças e quartas feiras), distribuídos em uma tubulação perfurada assentada sob a área superficial do filtro. Posteriormente a percolação do efluente, o mesmo foi coletado por uma tubulação perfurada disposta no fundo do filtro. A alimentação foi realizada baseada em um regime hidráulico operado com ciclos de alimentação e repouso de 3,5 dias na semana.

#### Monitoramento do desempenho de tratamento do WCV-FS

Para monitorar o desempenho de tratamento do WCV-FS, foi coletado amostras do afluente e efluente, bem como, em um ponto intermediário, a aproximadamente 0.20m de profundidade do maciço filtrante a partir da superfície do WCV-FS. Os parâmetros físico-químicos empregados na avaliação do desempenho de tratamento foram: potencial de oxi-redução (ORP), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e fósforo ortofosfato (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). As

análises foram conduzidas seguindo recomendações de APHA, (2005), com exceção para  $N-NH_4^+$  que seguiu recomendações de Vogel (1981). Todos os parâmetros foram analisados duas vezes por mês, sempre no segundo dia de operação, exceto o ORP, o qual foi analisado uma vez por mês ao longo de uma semana inteira, no primeiro e no último pulso de cada dia, durante 20 minutos.

A vazão de entrada ao módulo WCV-FS foi medida de forma direta por meio de aferição de volume pelo tempo através do sistema de bombeamento. Já a inferência da vazão de saída foi realizada por meio de um equipamento basculante (Figura 2 (a)). Este equipamento acumulava esgoto até o volume calibrado (7.61 litros úteis), sendo que ao atingir o volume calibrado, o equipamento basculava e despejava o efluente tratado no módulo wetland. Nesse momento, por meio de dois sensores acoplados ao basculante, o giro era contabilizado em um *datalogger* (Figura 2 (b)). Com o registro dos giros no *datalogger* e o volume calibrado do equipamento, foi possível inferir a vazão de saída nos intervalos dos giros. Tal metodologia foi empregada tanto para o cálculo da carga de saída do WCV-FS, quanto para cálculo de saída da massa de traçador para a análise hidrodinâmica.



**Figura 2.** Instrumentos utilizados para medição de vazão da unidade de tratamento. Foto do equipamento basculante (a) e do *datalogger* (b).

### Análise hidrodinâmica

Para a análise hidrodinâmica foi utilizado o traçador salino cloreto de sódio (NaCl) pela sua fácil aquisição, custo, facilidade e possibilidade de leitura. A sua utilização já teve comprovação no uso para estudo de WC em trabalhos anteriores, como de Cota *et al.* (2011), Matos *et al.* (2015) e de Freitas (2017). Foram realizados no total dois testes com traçador, um em agosto de 2018 (após 38 meses de operação), e outro em dezembro de 2018 (após 42 meses de operação da unidade de tratamento).

O traçador foi misturado ao afluente em um tanque equalizador na proporção relativa ao volume de um pulso aplicado no WCV-FS (200 L somados ao volume morto do tanque e equalização de 110 L e mais 20 L de segurança, totalizando 310 L). Neste tanque foi misturada uma quantidade



de sal que gerou uma concentração de 10 g/L no afluente, inferior a solubilidade do sal em água (365 g/L), tal como realizada por Freitas (2017). A leitura da concentração de traçador foi de forma indireta, sendo medida por meio da condutividade do efluente do WCV-FS. Para isso, o equipamento utilizado foi um condutímetro portátil da marca Akso® modelo AK50.

Previamente a cada teste foi traçada a variação da condutividade elétrica em relação ao aumento da concentração de NaCl, tanto para o afluente quanto para o efluente do WCV-FS. Com isso foi possível inferir a concentração de traçador na saída com o efluente do WCV-FS e confirmar a concentração de entrada com o afluente do WCV-FS. Assim, foi possível traçar a curva de distribuição de tempo de retenção, para se obter o índice de tempo médio de detenção, que é a razão entre o tempo de detenção (TDH) real e teórico, e a massa recuperada de traçador.

#### Análise do perfil de tratamento ao longo do período de drenagem do efluente do WCV-FS

Além da análise quinzenal realizada no módulo, foram conduzidos 3 testes com coletas e análises de amostras ao longo do período de drenagem do efluente do WCV-FS, de forma a avaliar a variação da concentração e carga de saída. Para isso, foram analisados os mesmos parâmetros da série histórica, cujo número de amostragens encontra-se descrito na Tabela 1. A variação do número de amostragens entre o teste 1 e os testes 2 e 3, deu-se em virtude da verificação do comportamento observado no teste 1 e a economia de recursos financeiros.

**Tabela 1.** Frequência amostral das coletas de amostras durante o período de drenagem do efluente tratado no WCV-FS.

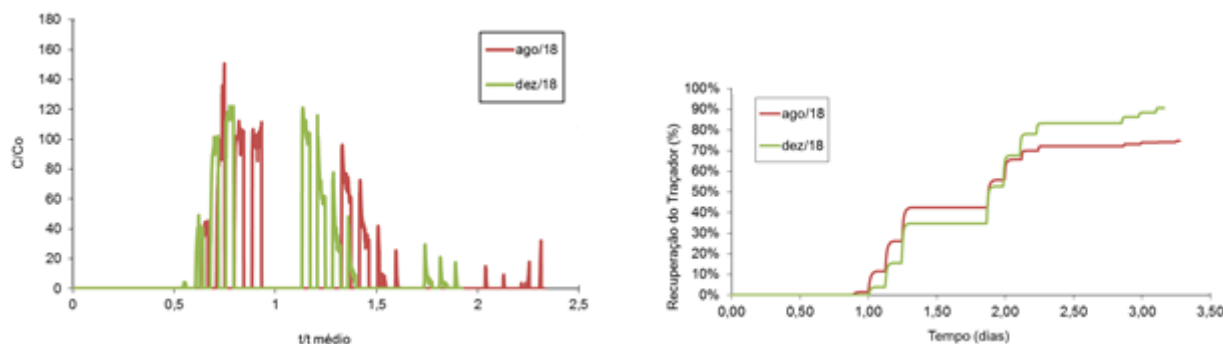
Teste	Horário da coleta	Intervalo de coleta	Quantidade de amostras
1	08:12 - 08:18	1 em 1 min	7
	08:20 - 08:24	2 em 2 min	3
	08:25 - 08:35	5 em 5 min	3
	08:45 - 08:55	10 em 10 min	2
	09:30	Pontual	1
2 e 3	08:12	Pontual	1
	08:15 - 08:35	5 em 5 min	5
	08:45 - 08:55	10 em 10 min	2
	09:10 e 09:30	Pontual	2

## Resultados

### Análise hidrodinâmica

De modo geral houve uma recuperação de traçador próxima aos 80% (Figura 3), conforme recomendada pela literatura (Headley & Kadlec, 2007). Infere-se que a diferença entre um teste e outro está relacionada com a maior temperatura ambiente durante 2º teste. Isso pode ter afetado a evapotranspiração do volume que permanece no WCV-FS, consequentemente concentrando mais o sal no volume remanescente, dessa forma maior quantidade de sal estava

presente no efluente do WCV-FS após cada pulso de alimentação ser dado, como pode ser observado na Figura 2. Tal hipótese é sustentada ainda no fato do volume de saída médio ser em torno de 10 litros menor por pulso no teste 2; e com o fato do índice de tempo médio de detenção (ITMD), (Tabela 2) ter dado um valor superior a 1, havendo momentos em que o volume retido dentro do WCV-FS era menor, e consequentemente o  $TDH_{teórico}$  dentro dele também era menor.



**Figura 3.** Curva normalizada (Cxt) dos testes com traçador realizados (gráfico a esquerda) e curva de recuperação do traçador (gráfico a direita).

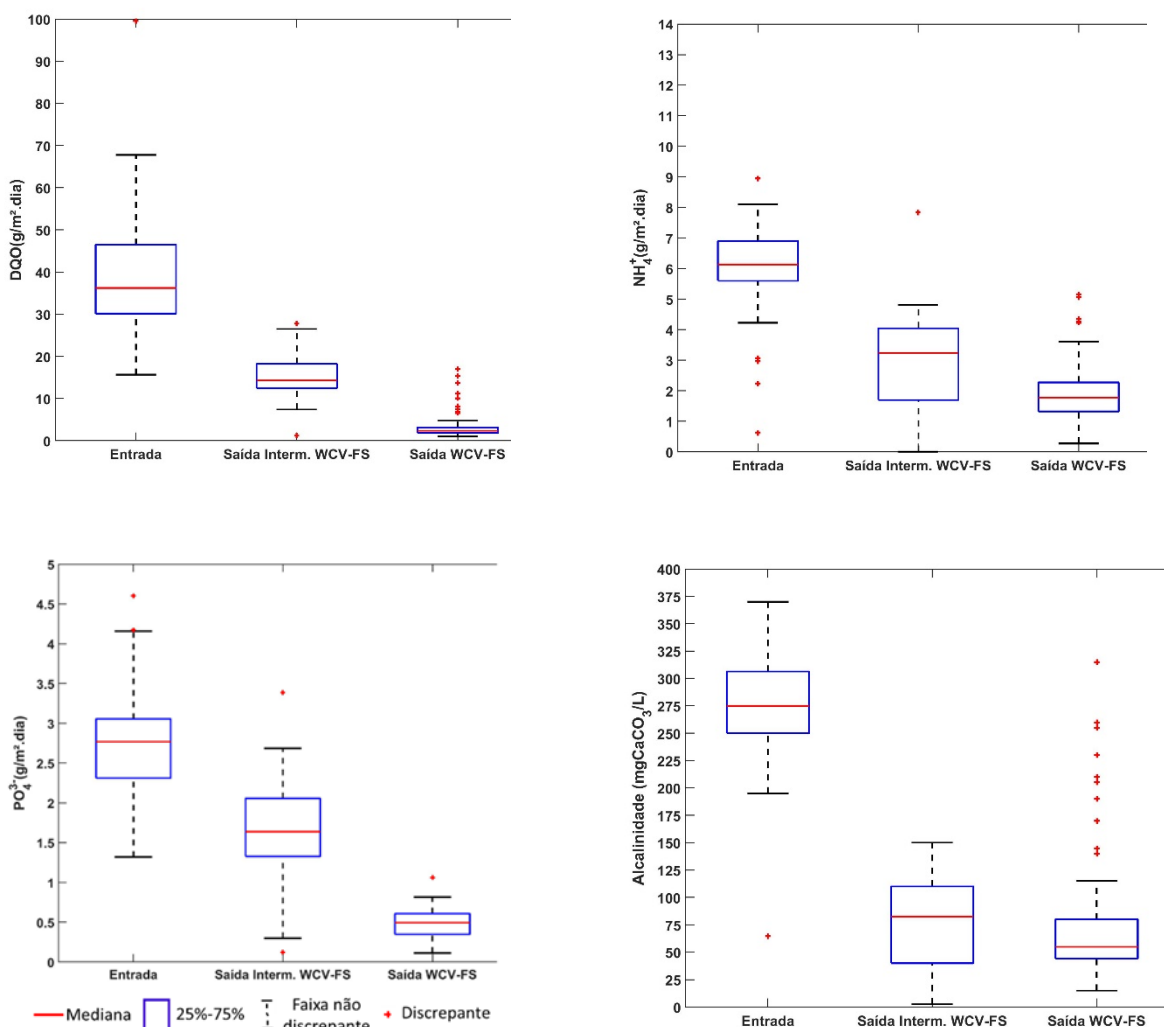
Apesar de que no segundo teste o ITMD foi superior a um, o primeiro teste indica uma satisfatória eficiência volumétrica do WCV-FS, podendo indicar que o sistema ainda não está sendo afetado pela colmatção mesmo após três anos e dois meses em operação, trabalhando sob as mesmas condições operacionais (38 gDQO/m<sup>2</sup>.d e 83 mm/dia).

**Tabela 2.** Resumo com resultados obtidos com os testes com traçador.

Definição	Teste 1	Teste 2
Temp Med (°C)	22	25
Temp Máx (°C)	19	30
Temp Mín (°C)	16	20
Concentração de sal na entrada (g/L)	9.8	9.95
Volume de entrada (L)	185.81	178.95
Massa de sal adicionada (g)	1821	1780
TDH teórico (dia)	1.59	1.64
TDH real (dia)	1.45	1.65
Entrada de SST (g/m <sup>2</sup> .dia)	5.22	6.36
% de traçador recuperado em relação ao de entrada	74	86
Índice de tempo médio de detenção (ITMD) (TDHreal / TDHteórico)	0.88	1.01

Desempenho de remoção de compostos carbonáceos, nitrogenados e fosforados

Por se tratar de esgoto proveniente da rede pública, houve variação na concentração do afluente ao WCV-FS, como pode ser evidenciado na Figura 4.



**Figura 4.** Boxplot com os valores das cargas em g/m<sup>2</sup>.dia de DQO, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> nos pontos analisados. Entrada – relativo ao afluente ao módulo WCV-FS; Saída Intermediária – relativo a amostragem em 0.20 m de profundidade no módulo WCV-FS; Saída – referente ao efluente tratado no módulo WCV-FS.

O desempenho de remoção de matéria orgânica carbonácea expressa pela DQO, foi de 95% considerando as medianas dos valores afluente e efluente. Comparando o desempenho do módulo estudado com unidades wetlands verticais modificados com indução de aeração, estudados por Nivala *et al.* (2018), os quais obtiveram uma eficiência de remoção de 98% de



matéria orgânica carbonácea expressa pela DBO, pode-se inferir a efetividade da saturação de parte do maciço filtrante com o próprio esgoto como estratégia para aumento de eficiência e redução de gastos energéticos com aeradores associados. Dentre as razões para que haja esta eficiência no WCV-FS, destacam-se as condições propícias para que a desnitrificação ocorra na camada saturada, ajudando também no consumo de DQO (Morvannou *et al.*, 2017).

Em relação às transformações da fração nitrogenada no WCV-FS, destaca-se que a maior parcela de remoção de  $\text{N-NH}_4^+$  deu-se devido ao processo de nitrificação, evidenciado pelo acentuado consumo de alcalinidade, ocorrido entre a entrada do afluente e o ponto intermediário, localizado a 0.20 m de profundidade dentro do módulo, indicando a efetividade da zona aeróbia dentro do maciço filtrante.

Já a camada saturada do material filtrante apresentou condições mais favoráveis à retenção de  $\text{P-PO}_4^{3-}$  comparativamente à zona aeróbia, devido principalmente ao maior tempo de contato do efluente com o biofilme formado no maciço filtrante do WCV-FS, e provavelmente aos processos de adsorção e precipitação químicas junto ao material filtrante, conforme preconizado por Saeed e Sun (2017).

#### Perfil de saída do efluente tratado no WCV-FS

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam o comportamento relativo a variação de qualidade do efluente tratado no WCV-FS, considerando a carga aplicada, carga removida, concentração de saída e eficiência de remoção, para compostos carbonáceos, nitrogenados e fosforados. Apesar da carga hidráulica aplicada no WCV-FS ter se mantido constante durante os três testes que avaliaram o comportamento de qualidade do efluente tratado ao longo do período de drenagem, a pequena variação de vazão efluente na saída observada entre eles deve, deve-se principalmente devido a variação do volume retido dentro do WCV-FS, ocasionado pela maior ou menor evapotranspiração durante o período de descanso do sistema.

Apesar da presença dos picos de carga efluentes, e em decorrência disso uma diminuição na eficiência de remoção, o efluente tratado no WCV-FS atendeu para os parâmetros DQO e  $\text{N-NH}_4^+$  aos padrões de lançamento preconizados em âmbito nacional e regional (Brasil, 2011; Santa Catarina, 2009), tanto em termos de concentração quanto de remoção carga. Contudo, em relação ao parâmetro  $\text{P-PO}_4^{3-}$ , o atendimento às legislações citadas anteriormente deu-se somente em remoção de carga.

Ao observar o comportamento do parâmetro ORP é possível a identificação de reações que podem estar ocorrendo no meio. Nas medições feitas ao longo de 30 minutos referente ao primeiro pulso do 3º dia de operação semanal (Figura ), percebe-se que houve uma variação de 100 mV para 30 mV nos primeiros 14 minutos observados, e nos 6 minutos seguintes os valores se estabilizaram.

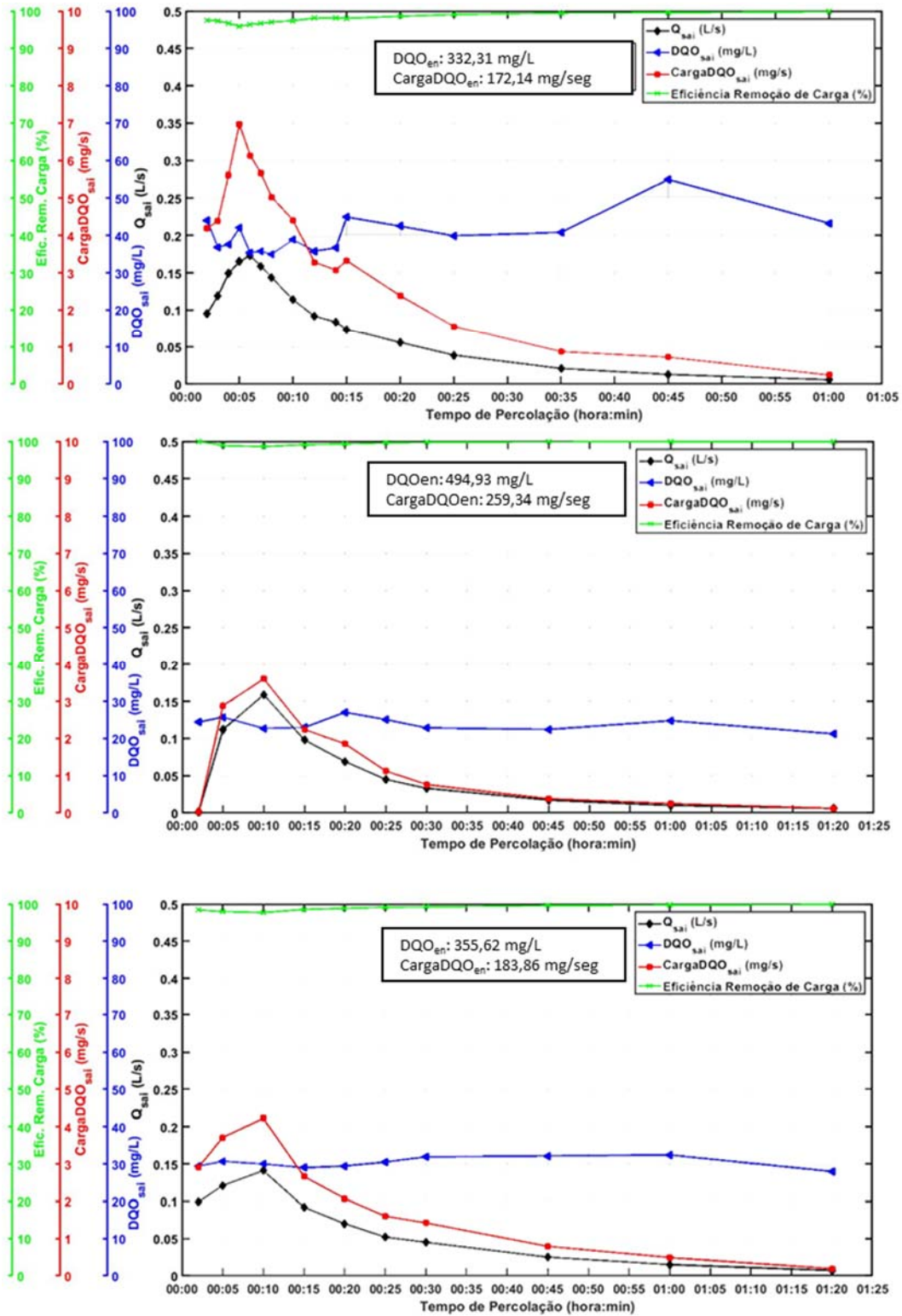


Figura 5. Comportamento da DQO de saída ao longo do pulso no 1º teste (A), 2º teste (B), 3º teste (C).

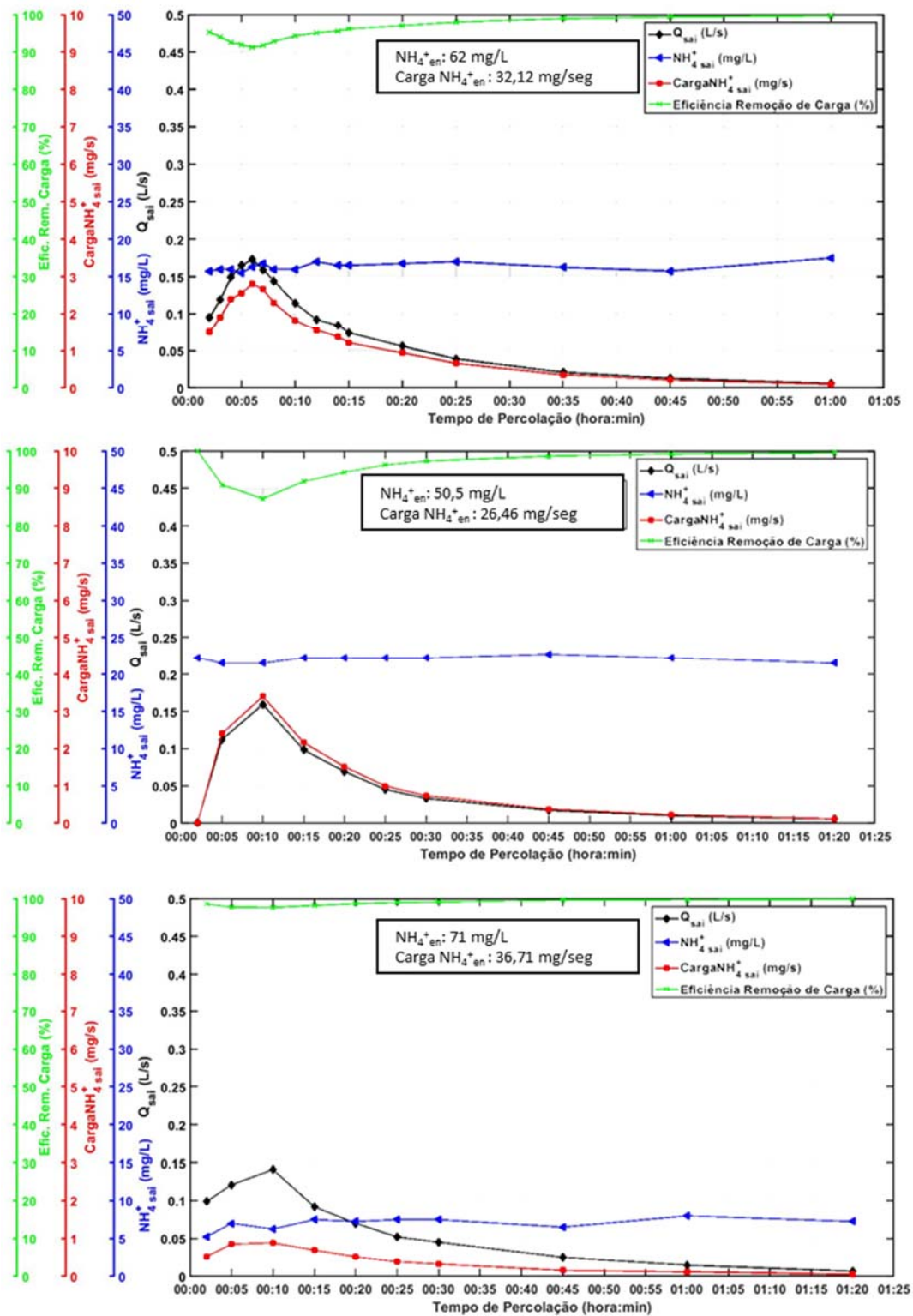


Figura 6. Comportamento da  $NH_4^+$  de saída ao longo do pulso no 1º teste (A), 2º teste (B), 3º teste (C).

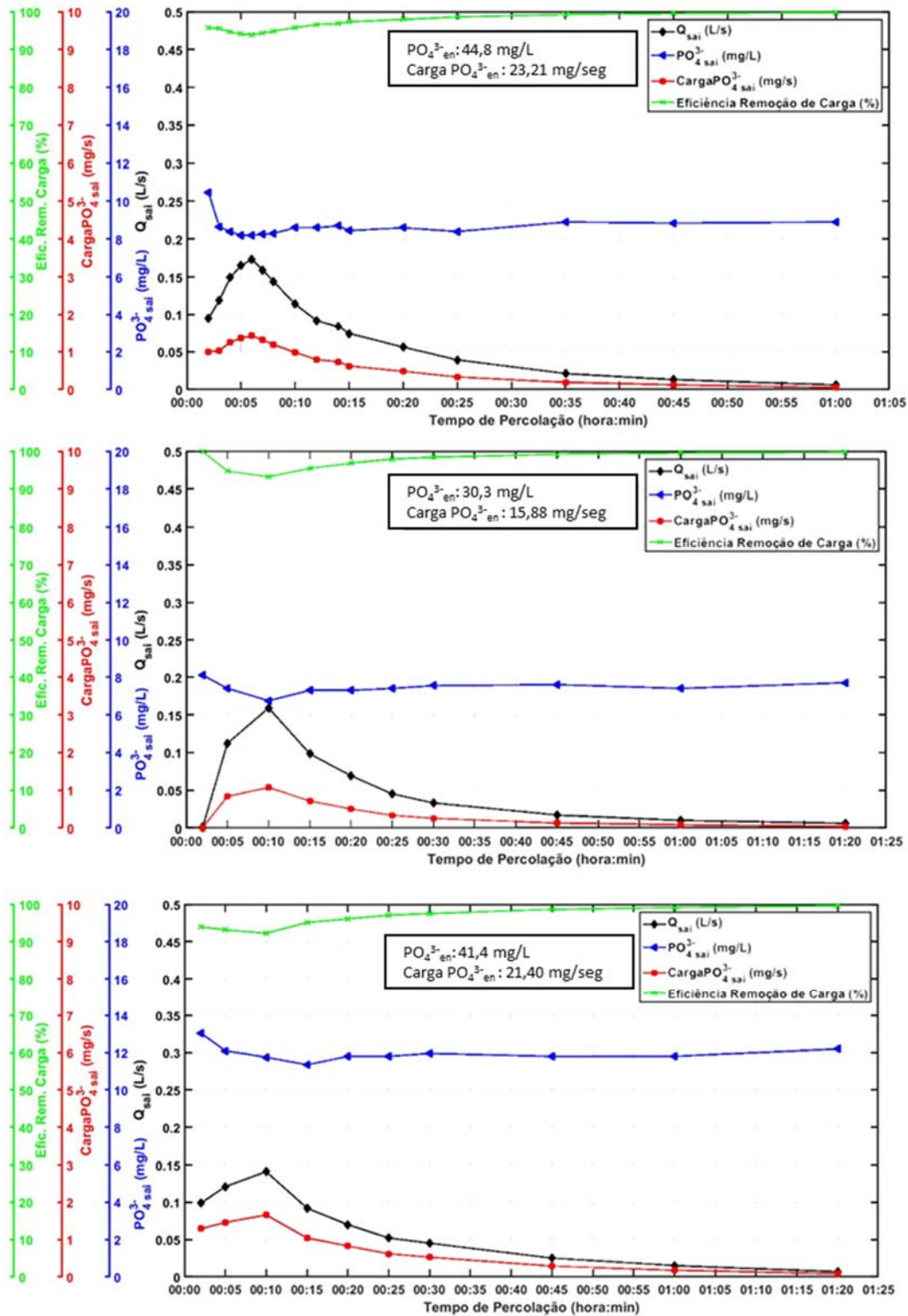
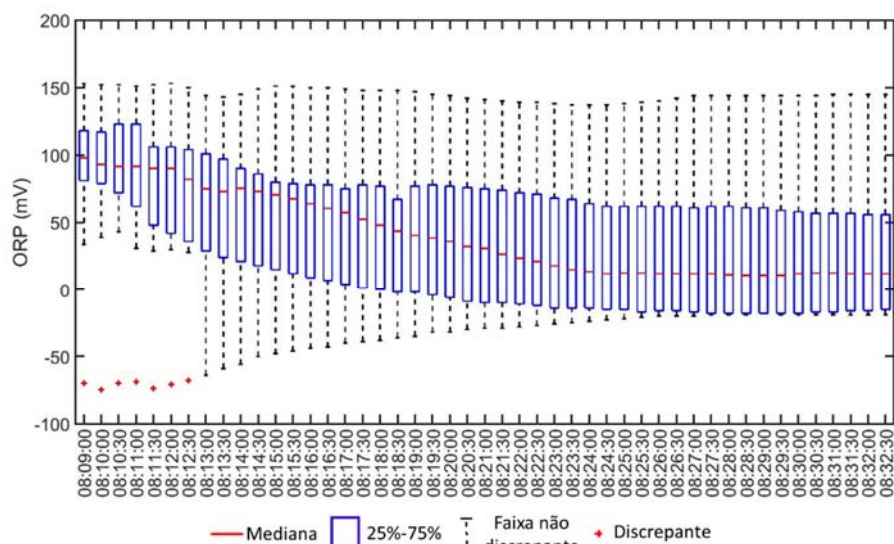


Figura 7. Comportamento da  $PO_4^{3-}$  de saída ao longo do pulso no 1º teste (A), 2º teste (B), 3º teste (C).





**Figura 8.** Boxplot com valores de ORP medidos no efluente do WCV-FS ao longo de 30 minutos referente ao primeiro pulso do 3º dia de operação semanal, referente a 12 campanhas amostrais, entre dezembro de 2017 e dezembro de 2018.

As variações dos valores medianos de ORP até o 14º minuto de monitoramento no efluente drenado referem-se a imprecisões no ponto amostral e na instabilidade do sensor, assumindo-se, portanto, como valor mediano de referência no efluente do WCV-FS um valor de 20 mV. Este valor encontra-se, segundo von Sperling (1995), dentro da faixa de desnitrificação, reforçando a vantagem da saturação de fundo na remoção de nitrogênio.

### Conclusões

A partir do monitoramento ao longo de um período compreendido entre junho de 2015 a dezembro de 2018 de um WCV-FS com 7,5 m<sup>2</sup> de área superficial, composto por brita e areia grossa como material filtrante, com 75 cm de profundidade sendo os últimos 40 cm saturados com o próprio efluente submetido ao tratamento, plantado com *Typha domingensis*, o qual operou com uma carga orgânica aplicada de 38 gDQO/m<sup>2</sup>.dia e carga hidráulica aplicada de 83 mm/dia, com 3.5 dias de operação e 3.5 dias repouso, conclui-se que:

A estabilidade dos valores observados para o efluente tratado durante o tempo de drenagem mesmo com a variação dos valores de carga de entrada, demonstram que a saturação de fundo do WCV-FS contribuiu para estabilização das cargas de entrada em termos de DQO, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.



A saturação de fundo também proporcionou um  $TDH_{real}$  superior ao encontrado nos clássicos WCV com drenagem livre, favorecendo a maior remoção dos poluentes avaliados.

Os valores de ORP medidos no efluente do WCV-FS encontram-se em uma faixa favorável para que o processo de desnitrificação possa ocorrer na porção saturada do módulo de tratamento.

Tendo em vista os resultados obtidos, o WCV-FS apresentou ser uma tecnologia viável para ser empregada como unidade descentralizada de tratamento de esgoto sanitário, pois apresentou valores de remoção de carga dentro da legislação nacional e regional, exceto para  $P-PO_4^{3-}$ , e valores de ITMD que indicam que o WCV-FS ainda não foi afetado pelo fenômeno de colmatação.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Nacional da Saúde (FUNASA) pelo financiamento do projeto, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de pesquisa.

### Referências bibliográficas

- APHA, AWWA, WEF (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater. 21st ed. APHA, Washington.
- Brasil. (2011) *Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, Resolução CONAMA N° 430*. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília.
- Cota, R. S., Von Sperling, M., Penido, R. C. S. (2011) Tracer studies and hydraulic behaviour of planted and un-planted vertical-flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, **64**(5), 1056–1063. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2011.544>
- Dong, Z., Sun, T. (2007) A potential new process for improving nitrogen removal in constructed wetlands-Promoting coexistence of partial-nitrification and ANAMMOX. *Ecological Engineering*, **31**(2), 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.04.009>
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., von Sperling, M. (2017) *Treatment Wetlands*. (Nova Techset, Ed.) (1st ed., Vol. 7). Londres: IWA Publishing. doi: <https://doi.org/10.2166/9781780408774>
- Freitas, M. N. de. (2017) *Avaliação da hidrodinâmica e desempenho de um wetland construído horizontal componente de um sistema híbrido empregado no tratamento de esgoto sanitário*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Headley, T. R., Kadlec, R. H. (2007) Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: A practical guide. *Ecology and Hydrobiology*, **7**(3–4), 269–282. doi: [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70110-6](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70110-6)
- Ilyas, H., Masih, I. (2017) Intensification of constructed wetlands for land area reduction: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**(13), 12081–12091. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8740-z>
- Matos, M. P., Sperling, M. V., Matos, A. T., Passos, R. G. (2015) Uso De Traçador Salino Para Avaliação Da Colmatação E Das Condições Hidrodinâmicas Em Sistemas Alagados Construídos De Escoamento Horizontal Subsuperficial. *Engenharia Agrícola*, **35**(6), 1137–1148. doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1137-1148/2015>

- Morvannou, A., Troesch, S., Esser, D., Forquet, N., Petitjean, A., Molle, P. (2017) Using one filter stage of unsaturated/saturated vertical flow filters for nitrogen removal and footprint reduction of constructed wetlands. *Water Science and Technology*, **76**(1), 124–133. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.115>
- Nivala, J., Boog, J., Headley, T., Aubron, T., Wallace, S., Brix, H., Müller, R. A. (2018) Side-by-side comparison of 15 pilot-scale conventional and intensified subsurface flow wetlands for treatment of domestic wastewater. *Science of The Total Environment*, 1500–1513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.165>
- Pelissari, C., Guivernau, M., Viñas, M., García, J., Velasco, M., Souza, S.S., Sezerino, P.H., Ávila, C. (2018) Effects of partially saturated conditions on the metabolically active microbiome and on nitrogen removal in vertical subsurface flow constructed wetlands. *Water Research*. **141**, 185–195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.002>
- Pelissari, C., Ávila, C., Trein, C.M., García, J., de Armas, R.D., Sezerino, P.H., (2017) Nitrogen transforming bacteria within a full-scale partially saturated vertical subsurface flow constructed wetland treating urban wastewater. *Science of the Total Environmental*. **574**, 390–399. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.207>
- Santa Catarina. (2009) *Lei 14.675, Código Estadual do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina*. Retrieved from: [http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/20\\_12\\_2013\\_14.30.40.b479cb7a256a963c9e0bbf87bd860d38.pdf](http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/20_12_2013_14.30.40.b479cb7a256a963c9e0bbf87bd860d38.pdf)
- Santos, M. O. dos, Pelissari, C., Rousso, B. Z., & Sezerino, P. H. (2016) Influência da saturação de fundo de maciços filtrantes componentes de wetlands construídos verticais aplicados no tratamento de esgoto sanitário. *Revista AIDIS*, **9**(3), 303–316. Disponível em: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/51487>
- Sezerino, P.H., Rousso, Z.B., Pelissari, C., Santos, M.O dos, Freitas, M.N., Fachine, V.Y., Lopes, A.M.B. (2018) *Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário. Recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção*. Fundação Nacional da Saúde. Tubarão: Copiart. 56 pp.
- Silveira, D. D., Belli Filho, P., Philippi, L. S., Kim, B., & Molle, P. (2015) Influence of partial saturation on total nitrogen removal in a single-stage French constructed wetland treating raw domestic wastewater. *Ecological Engineering*, **77**, 257–264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.040>
- Vogel, A. I. (1981) *Química Analítica Qualitativa. Endeavour* (5th ed.). São Paulo: Mestre Jou. doi: [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(90\)90087-8](https://doi.org/10.1016/0160-9327(90)90087-8)
- von Sperling, M. (1995) *Princípios de Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. v. 1, 240 pp.