



## II-137 - AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE UM WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL PLANTADO COM *Heliconia psittacorum*

**Samara Terezinha Decezaro<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Mestre em Engenharia Civil – Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFSM. Doutoranda em Engenharia Civil – Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental na UFSM.

**Delmira Beatriz Wolff**

Engenheira Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Engenharia Ambiental pela UFSC. Doutora em Engenharia Ambiental pela UFSC. Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

**Desirê Armbrorst Alves**

Engenheira Ambiental pela Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC). Mestranda em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

**Mariele Fioreze**

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Mestranda em Engenharia Ambiental na UFSM.

**Ronaldo Kanopf de Araújo**

Engenheiro Ambiental pelo Centro Universitário Franciscano. Mestre em Engenharia Civil – Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Doutorando em Engenharia Civil – Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental na UFSM.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Roraima, 1000 – Prédio 10, CTLAB, 2º andar, sala 548 – Cidade Universitária - Santa Maria - RS - CEP: 97105-900 - Brasil - Tel: (55) 99824108 - e-mail: [samaradecezaro@hotmail.com](mailto:samaradecezaro@hotmail.com)

### RESUMO

Este trabalho objetiva avaliar a hidrodinâmica de um *wetland* construído de fluxo vertical (WCFV) aplicado ao tratamento de esgoto doméstico antes e depois do transplântio da macrófita *Heliconia psittacorum*. O WCFV de estudo (área superficial de 24,5 m<sup>2</sup>) contém brita 1 e brita 2 como material de recheio. A *Heliconia psittacorum* foi transplantada diretamente no material de recheio do WCFV após decorridos 23 dias do início de operação, numa densidade de 7,7 mudas/m<sup>2</sup>. Foram realizados dois testes hidrodinâmicos. O primeiro teste, denominado “teste A” foi realizado 18 dias após o início de operação do WCFV, sendo que neste teste, o WCFV ainda não se encontrava vegetado. O outro teste, denominado “teste B”, foi realizado 116 dias após o início de operação, ou seja, após decorridos 93 dias do transplântio das macrófitas, quando as plantas apresentavam uma altura média de 33 cm. Os resultados obtidos mostraram que depois de decorridos três meses do transplântio, o tempo médio de detenção hidráulica ( $\bar{t}$ ) do WCFV foi de 17 min, 3 min inferior ao  $\bar{t}$  obtido antes do transplântio. Dessa forma, constatou-se que o transplântio das macrófitas acarretou na redução do  $\bar{t}$ , devido à formação de caminhos preferenciais no material de recheio, criados pelas raízes e rizomas das plantas. Além disso, os parâmetros calculados visando à avaliação do comportamento hidrodinâmico do WCFV (IDM, ICC, ITRM, ITMR e  $e_v$ ) indicaram tendência do escoamento do WCFV ao regime de mistura completa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrodinâmica, *Wetlands* construídos, Traçador, Rodamina WT.

### INTRODUÇÃO

O conhecimento das características hidrodinâmicas é fundamental para projeto e para operação satisfatória de reatores empregados no tratamento de águas residuárias. Com relação aos *wetlands* construídos (WC) não é diferente. Nesses reatores, as variáveis hidráulicas, tais como o tempo de detenção hidráulica (TDH) e o grau de mistura, são fatores determinantes na eficiência de remoção de poluentes (GIRALDI et al., 2009).

Ao longo do tempo de operação de WC podem ocorrer variações no TDH devido a mudanças na permeabilidade do material filtrante. Essas mudanças podem ser causadas por diversos fatores, tais como o crescimento do biofilme, o acúmulo de sólidos no material filtrante e o desenvolvimento das raízes das macrófitas (HEADLEY e KADLEC, 2007; LANGERGRABER, 2003).

Devido aos vários graus de mistura, dispersão e ineficiência hidráulica, os WC caracterizam-se por terem uma faixa, ou distribuição, de tempos de detenção hidráulica (WERNER e KADLEC, 2000). A distribuição de tempos em que a corrente de fluido sai do reator é denominada Distribuição dos Tempos de Detenção (DTD) ou E.

A DTD pode ser obtida a partir de dados provenientes de testes com traçadores, os quais possibilitam a avaliação do desempenho hidráulico de reatores em escala real. Dentre os métodos existentes para determinar a DTD, o método da função pulso é bastante simples e de fácil interpretação (LEVENSPIEL, 1999). Segundo o mesmo autor, esse método consiste na introdução de uma determinada quantidade de traçador no fluido que entra no reator e do registro na saída da concentração de traçador efluente, bem como do tempo de saída de cada porção de fluido.

A utilização desse método para obtenção de curvas de DTD na forma normalizada permite a comparação do desempenho hidráulico entre reatores operando sob diferentes condições. Neste trabalho tem-se como objetivo avaliar a hidrodinâmica de um *wetland* construído de fluxo vertical aplicado ao tratamento de esgoto doméstico antes e depois do transplântio da macrófita *Heliconia psittacorum*.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Descrição do sistema experimental

Neste estudo foi avaliado um *wetland* construído de fluxo vertical (WCFV), em operação desde setembro de 2015, aplicado no tratamento de esgoto doméstico pós tanque séptico (Figura 1). O WCFV apresenta área superficial de 24,5 m<sup>2</sup> (comprimento = 7,0 m; largura = 3,5 m), com profundidade da camada filtrante de 0,75 m, sendo o mesmo projetado para tratamento de esgoto doméstico, numa vazão de 1.500 L d<sup>-1</sup>.

O WCFV é preenchido por duas faixas granulométricas de brita lavada, sendo brita 2 junto ao fundo e também na porção superior, e brita 1 (d<sub>10</sub>=9,5; d<sub>30</sub>=12,5; d<sub>60</sub>=15 mm; coeficiente de uniformidade, U = 1,58) na camada intermediária, conforme mostrado na figura 1. Foi utilizada a macrófita *Heliconia psittacorum*, sendo as mudas transplantadas diretamente no material de recheio do WCFV, após decorridos 23 dias do início de operação, na densidade de 7,7 mudas por m<sup>2</sup>.

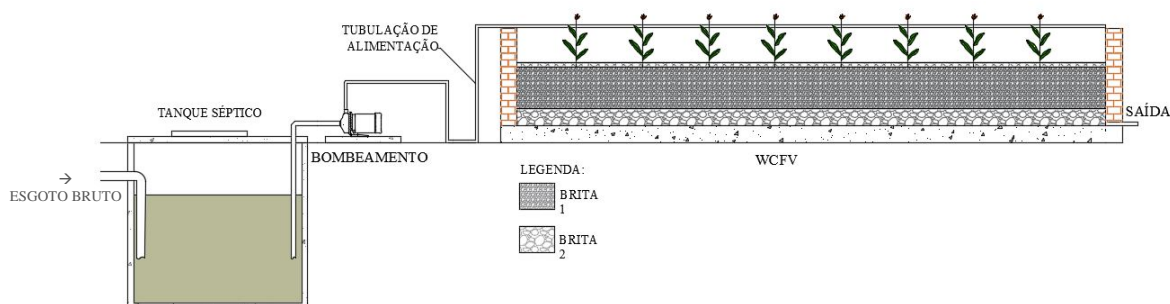


Figura 1: Corte longitudinal representado a estação de tratamento experimental

### Testes hidrodinâmicos

O objetivo destes testes foi avaliar as condições hidrodinâmicas do WCFV antes e após o transplântio das macrófitas. O primeiro teste (Teste A) foi realizado 18 dias após o início de operação do WCFV, anteriormente ao transplântio, conforme mostrado na figura 2. O segundo teste (Teste B) foi realizado após transcorridos 116 dias de operação, após decorridos 93 dias do transplântio, quando as plantas apresentavam uma altura média de 33 cm (mínimo = 8 cm; máximo = 52 cm).



**Figura 2: Condições em que foram realizados os testes hidrodinâmicos no WCFV. À esquerda, fotografia do WCFV antes do transplântio e à direita, fotografia mostrando o WCFV 93 dias após o transplântio de *Heliconia psittacorum***

Os testes hidrodinâmicos foram executados conforme recomendações de um guia elaborado por Headley e Kadlec (2007), o qual traz orientações básicas sobre a realização de testes com traçador em WC. Os resultados dos testes foram avaliados conforme metodologia sugerida por Levenspiel (1999) e Metcalf e Eddy (2003), a fim de obter os parâmetros de caracterização de curvas de resposta de traçadores, entre eles, o tempo médio de detenção hidráulica ( $\bar{t}$ ), o índice de dispersão de Morril (IDM), o índice de curto circuito (ICC), o índice do tempo modal de retenção (ITMR), o índice do tempo de retenção médio (ITRM) e a eficiência volumétrica ( $e_v$ ).

Para obtenção dos parâmetros mencionados, foi utilizado como traçador a rodamina WT (RWT), na forma líquida concentrada (21,33%). Os testes foram feitos após a realização de uma curva de calibração para um fluorímetro portátil (marca Turner Designs), para várias concentrações conhecidas de RWT, estabelecendo a relação entre fluorescências e concentrações de RWT. Na tabela 1 são apresentadas as condições em que foram realizados os testes. Em cada teste hidrodinâmico foi aplicada uma quantidade de RWT necessária para alcançar concentrações de entrada e saída do WCFV possíveis de serem detectadas com o fluorímetro portátil.

**Tabela 1: Condições em que foram realizados os testes hidrodinâmicos no WCFV**

Teste	Volume planejado (L)	Volume real aplicado (L)	Conc. média de entrada de RWT ( $\mu\text{g/L}$ )	Duração do pulso de alimentação (min)	Período de monitoramento (min)	Massa total de entrada (mg)
A	375	372	53,80	4	122	20,0
B	375	383	198,29	2	122	75,9

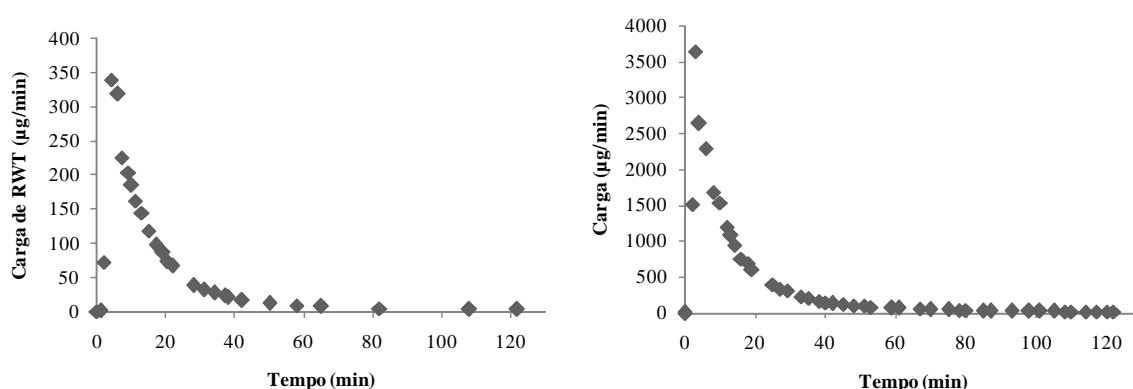
Em cada teste, a RWT foi previamente diluída em 10 L de água e colocada dentro do tanque séptico, instantes antes do pulso, tempo suficiente para sua mistura com o esgoto contido dentro do tanque. Após, o esgoto contendo a RWT foi injetado no WCFV por bombeamento, na forma de pulso, simulando um pulso típico de alimentação do WCFV (alimentação intermitente, por meio de pulsos de curta duração). O volume de esgoto contendo RWT planejado para aplicação no WCFV em cada teste foi de 375 L.

A partir do início do pulso contendo a RWT, foram iniciadas medições de vazão e de fluorescência periódicas na entrada e na saída do WCFV. Na saída, foram feitas aferições de vazão a cada medição de fluorescência, durante um período de 122 min. Essas medições foram mais frequentes em períodos com maior variação de vazão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

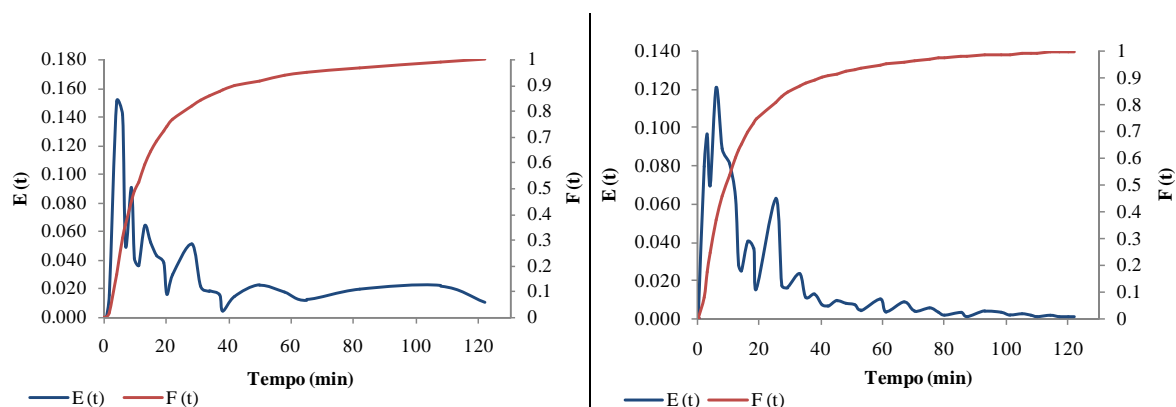
A partir das medições de fluorescência e das vazões efluentes do WCFV, foram obtidas as cargas de RWT efluentes ao longo do tempo de cada teste (carga = concentração de RWT x vazão). Na figura 3 estão apresentadas as curvas de carga *versus* tempo, obtidas para os testes A e B. Observou-se tanto para o teste A quanto para o teste B rápidos tempos de drenagem de efluente no WCFV. As cargas de pico ocorreram, em ambos os testes, após um período inferior a 5 min a contar do início da aplicação de um pulso na superfície do WCFV.

Nos cálculos necessários para a obtenção da curva DTD utilizou-se os valores de carga de traçador efluente em substituição aos valores das concentrações efluentes. Essa adaptação foi necessária porque a vazão de saída do WCFV apresentou grande variação ao longo do tempo de drenagem.



**Figura 3:** Cargas de RWT efluentes do WCFV nos testes realizados antes do transplante de *Heliconia psittacorum* – teste A (esquerda) e 93 dias após o transplante – teste B (direita).

As curvas DTD adimensionais “E (t)” e as curvas cumulativas de distribuição dos tempos de detenção “F (t)” para os testes hidrodinâmicos realizados no WCFV, antes e depois do transplante, são apresentadas na figura 4. Já os parâmetros calculados objetivando a caracterização hidráulica do WCFV constam na tabela 2.



**Figura 4:** Curvas E (t) e F (t) referentes aos testes realizados antes do transplante de *Heliconia psittacorum* – teste A (esquerda) e 93 dias após o transplante – teste B (direita).

**Tabela 2: Parâmetros utilizados para caracterização hidráulica do WCFV - Influência do tempo de operação, do desenvolvimento das macrófitas e do regime hidráulico aplicado**

Teste	$t_i$	$t_p$	$\bar{t}$	$t_{50}$	$t_{10}$	$t_{90}$	IDM	ICC	ITMR	ITRM	$e_v$ (%)
A	1	4	20	10	3	42	14,00	0,06	0,25	1,25	7,14
B	1	3	17	9	2	39	19,50	0,13	0,38	2,13	5,13

Notas:  $t_i$  = tempo de aparecimento do traçador;  $t_p$  = tempo de pico do traçador;  $\bar{t}$  = tempo médio de detenção hidráulica;  $t_{10}$ ,  $t_{50}$  e  $t_{90}$  = tempo em que 10, 50 e 90% do traçador passa pelo sistema; IDM = índice de dispersão de Morrill ( $t_{90}/t_{10}$ ); ICC = índice de curto-circuito ( $t_i/\text{TDH}$ ); ITMR = índice de tempo modal de retenção ( $t_p/\text{TDH}$ ); ITRM = índice de tempo de retenção médio ( $\bar{t}/\text{TDH}$ );  $e_v$  = eficiência volumétrica conforme Morrill (1932) ( $1/\text{IDM}$ ).

$\text{TDH} = (V \times \text{porosidade})/Q \rightarrow (24,5 \text{ m}^3 \times 0,75 \text{ m} \times 0,08) / Q \text{ (m}^3/\text{min})$

Teste A: antes do transplântio  $\rightarrow$  vol. aplicado = 372 L;  $Q = 0,093 \text{ L/min}$ ; TDH = 16 min

Teste B: 93 dias após o transplântio  $\rightarrow$  vol. aplicado = 383 L;  $Q = 0,191 \text{ L/min}$ ; TDH = 8 min

Observa-se com base na tabela 2 e nas curvas  $E(t)$  que o tempo de aparecimento dos picos de carga do traçador ( $t_p$ ) foi inferior ao tempo médio de detenção hidráulica ( $\bar{t}$ ). Segundo Borges et al. (2009), isso indica a formação de pequenos canais preferenciais e a ocorrência de regiões de estagnação (zonas mortas). Além disso, as curvas  $E(t)$  apresentaram longas caldas, fato também observado em testes realizados por Borges et al. (2009) em um WCFH e por Cota (2011) em um WCFV.

Observou-se que após o transplântio o tempo médio de detenção hidráulica ( $\bar{t}$ ) reduziu 3 min, sendo 20 min no teste A e 17 min no teste B. Pode-se atribuir o menor  $\bar{t}$  encontrado no teste B à presença de plantas no WCFV. Cota (2011), Penido (2009) e Torrens et al. (2009), avaliando unidades plantadas e não plantadas (Sistema Francês), observaram em seus experimentos, tempos de detenção menores em unidades plantadas, em comparação à unidades não vegetadas. Os autores justificam este fato à existência nas unidades plantadas de caminhos preferenciais criados pelas raízes das plantas.

Os parâmetros calculados visando à avaliação do comportamento hidrodinâmico do sistema (índice de dispersão de Morrill - IDM, índice de curto-circuito - ICC, índice de tempo modal de retenção - ITMR e índice de tempo de retenção médio - ITRM e eficiência volumétrica -  $e_v$ ), indicaram tendência do escoamento ao regime de mistura completa. Os valores de IDM obtidos, de 14,0 e 19,5 para os testes A e B, respectivamente, indicam a tendência ao regime de mistura completa, pois, conforme Metcalf e Eddy (2003), para escoamento do tipo fluxo pistão ideal esse índice é igual a 1,0 enquanto que para um reator de mistura completa é de aproximadamente 22. Os valores de ICC calculados para os testes foram próximos a zero, confirmando a tendência ao regime de escoamento de mistura completa. Um menor valor de ICC foi obtido no início de operação, antes do transplântio.

Além disso, os valores de ITMR foram menores que 1 em ambos os testes, indicando que a distribuição da vazão ao longo do filtro não foi uniforme. Este fato foi observado durante o período de operação do WCFV, sendo que a distribuição de esgoto não ocorre sobre toda a superfície do filtro. Em relação aos valores de ITRM, os mesmos foram maiores que 1, confirmando a presença de zonas mortas e curtos circuitos no WCFV. Um valor mais próximo a 1 foi obtido no teste realizado antes do transplântio (teste A), sendo que o valor de ITRM = 1 indica uso integral do volume do reator (METCALF e EDDY, 2003). O valor encontrado para  $e_v$  também confirma esta afirmação, pois o teste A foi o que apresentou o maior valor de  $e_v$ .

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que: a construção de curvas DTD na forma normalizada permitiu a comparação do tempo médio de detenção hidráulica ( $\bar{t}$ ) do WCFV em duas situações: antes e depois do transplântio da macrófita *Heliconia psittacorum*. Depois de decorridos três meses do transplântio, foi identificado que o  $\bar{t}$  do WCFV foi de 17 min, 3 min inferior ao  $\bar{t}$  obtido antes do transplântio (no início de operação), o qual foi de 20 min. Dessa forma, constatou-se que o transplântio das macrófitas acarretou na



redução do  $t$ , devido à formação de caminhos preferenciais no material de recheio, criados pelas raízes e rizomas das plantas. Além disso, os resultados obtidos com base nos parâmetros calculados visando a avaliação do comportamento hidrodinâmico do WCFV (IDM, ICC, ITRM, ITMR e  $e_v$ ), indicaram tendência do escoamento do WCFV ao regime de mistura completa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP pelo financiamento dessa pesquisa, à Capes pelas bolsas de mestrado e doutorado e à Pró-Reitoria de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Maria pelo apoio na instalação e manutenção do experimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BORGES, A. C.; MATOS, A. T. de; CALIJURI, M. do C.; OLIVEIRA, G. H. H. de; ROLDÃO, J. S. F. Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas alagados construídos operando sob condições climáticas tropicais. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v. 29, n. 2, p. 301-310, 2009.
2. COTA, R. da S. **Hidrodinâmica e desempenho de filtros verticais plantados e não plantado com alimentação em pulso, empregados no tratamento de esgoto sanitário bruto**. 215f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
3. GIRALDI, D.; VITTURI, M. de M.; ZARAMELLA, M.; MARION, A.; IANNELLI, R. Hydrodynamics of vertical subsurface flow constructed wetlands: Tracer tests with rhodamine WT and numerical modeling. **Ecological Engineering**, v. 35, p. 265-273, 2009.
4. HEADLEY, T. R.; KADLEC, R. H. Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 7, n. 3-4, p. 269-282, 2007.
5. LANGERGRABER, G. Simulation of subsurface flow constructed wetlands - results and further research needs. **Water Science and Technology**, v. 48, p. 157-166, 2003.
6. LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. 3 ed., Department of Chemical Engineering, Oregon State University, New York, 1999.
7. METCALF & EDDY. Inc. **Wastewater Engineering treatment. Disposal Reuse**. 4 ed. New York, McGraw - Hill Book, 1815 p., 2003.
8. PENIDO, R. C. S. **Avaliação hidráulica de leitos de fluxo vertical plantados e não-plantado em escala de demonstração**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
9. TORRENS, A.; MOLLE, P.; BOUTIN, C.; SALGOT, M. Impact of design and operation variables on the performance of vertical-flow constructed wetlands and intermittent sand filters treating pond effluent. **Water Research**, v. 43, p. 1851-1858, 2009.
10. WERNER, T. M.; KADLEC, R. H. Wetland residence time distribution modeling. **Ecol. Eng.**, v. 15, p. 77-90, 2000.