



## REDUÇÃO E RECUPERAÇÃO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DENTRO E A JUSANTE DE *WETLANDS* FLUTUANTES DE TRATAMENTO

Taís N. Yamasaki <sup>1</sup> & Johannes G. Janzen <sup>2</sup>

**RESUMO** – *Wetlands* flutuantes de tratamento (FTWs) são uma alternativa de solução baseada na natureza para o tratamento de água, águas pluviais e efluentes através do uso de vegetação aquática. O escoamento passando por um FTW apresenta um padrão de redução, onde tende a ser desacelerado dentro das raízes dos FTWs e atinge um valor de velocidade mínima, e um padrão de recuperação, onde retorna a valores iniciais de velocidade a jusante do FTW. Este estudo utilizou a Fluidodinâmica Computacional para simular um FTW em um canal, a fim de observar a influência do comprimento de raízes do FTW nos padrões de redução e recuperação do escoamento. Os resultados mostram que o aumento do comprimento de raízes aumentou a velocidade mínima na linha de centro do FTW e deslocou a ocorrência da velocidade mínima para posições mais afastadas a jusante do FTW. A recuperação do escoamento a jusante do FTW apresentou comportamento quadrático com o aumento do comprimento de raízes, sendo que o maior comprimento de recuperação ocorreu para o caso do FTW ocupando metade da seção transversal do canal.

**ABSTRACT**– Floating Treatment Wetlands (FTWs) are an alternative nature-based solution for water, stormwater and wastewater treatment with the use of aquatic vegetation. The flow passing through a FTW presents a pattern of reduction, where the flow tends to be decelerated within the roots of the FTWs and reaches a minimum velocity value, and a recovery pattern, where the flow returns to initial velocity values downstream of the FTW. This study used Computational Fluid Dynamics to simulate a FTW in a channel, in order to observe the influence of the FTW root length on the patterns of flow reduction and recovery. The results show that increasing root length increased the minimum velocity at the centerline of the FTW and shifted the occurrence of the minimum velocity to positions further downstream of the FTW. The recovery of the flow downstream of the FTW showed a quadratic behavior with the increase of root length, and the longest recovery length occurred for the case of the FTW occupying half of the channel cross-section.

**Palavras-Chave** – CFD, comprimento de recuperação, *wetlands*

### 1 INTRODUÇÃO

*Wetlands* flutuantes de tratamento (FTWs) são uma solução baseada na natureza (*nature-based solution*) para o tratamento de água de rios, canais e lagoas, e têm se tornado uma alternativa de crescente aplicação em projetos de engenharia (Lucke *et al.*, 2019), como, por exemplo, no tratamento de águas pluviais (Winston *et al.*, 2013), em lagoas próximas a construções residenciais (Schwammberger *et al.*, 2019) e em rios urbanizados (Fang *et al.*, 2016). Os FTWs são similares aos

1) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande, MS. E-mail: taisnatsumi@gmail.com

2) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande, MS. E-mail: johannes.janzen@ufms.br



*wetlands* construídos convencionais no que tange ao uso de plantas para a remoção de nutrientes e contaminantes. Porém, nos FTWs, as plantas aquáticas crescem de forma hidropônica em plataformas flutuantes, abaixo das quais as raízes permanecem em contato com a coluna d'água, crescendo verticalmente para baixo e formando uma densa rede, e acima das quais o caule e as folhas crescem normalmente (Headley e Tanner, 2012). Isso permite que os FTWs sejam dispostos diretamente no corpo d'água de interesse para o tratamento.

Os FTWs purificam o escoamento através de processos físicos e bioquímicos realizados pelas raízes das plantas e pelo biofilme, este último constituído por algas, bactérias e microrganismos que se formam nas raízes (Lucke *et al.*, 2019). Os FTWs são capazes de remover nutrientes, metais e matéria orgânica dissolvida, reter sólidos suspensos e diminuir a turbidez da água (Headley e Tanner, 2012). Estudos laboratoriais indicaram o potencial dos FTWs na remoção de contaminantes persistentes, como pesticidas, herbicidas e produtos farmacêuticos (Bi *et al.*, 2019), o que, a nível ecossistêmico, seria benéfico na redução da biomagnificação em teias alimentares.

O escoamento dentro de FTWs tende a sofrer uma expressiva desaceleração causada pelas raízes, que obstruem parcialmente e impõem uma resistência à passagem do escoamento (Yamasaki e Janzen, 2021a; Xavier *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019). A jusante do FTW, a seção transversal do canal volta a ser totalmente livre (não-ocupada por FTWs), e o escoamento retorna à velocidade inicial (Yamasaki *et al.*, 2022). A distância que o escoamento leva para retornar a valores iniciais de velocidade a jusante de uma obstrução porosa, como FTWs, é definida como o comprimento de recuperação do escoamento (Follett e Nepf, 2012). Definições de comprimentos característicos auxiliam na compreensão de escoamentos vegetados, e podem ser aplicadas em projetos de design de FTWs. Por exemplo, o comprimento de deposição que se forma atrás de vegetação emergente é um importante mecanismo associado à região onde haverá o crescimento da vegetação (Yamasaki *et al.*, 2021b). O objetivo do presente trabalho foi determinar o padrão de redução e recuperação do escoamento em FTWs, comparando a velocidade mínima, a posição onde ocorre a velocidade mínima, e o comprimento de recuperação do escoamento para diferentes comprimentos de raízes que ainda não foram testados. O sistema utilizado foi composto por um canal e um FTW. Os cenários foram projetados e simulados em Fluidodinâmica Computacional (CFD).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo computacional possuiu geometria composta por um trecho de canal retangular e um FTW. O canal possuiu comprimento  $L_c = 16$  m, largura  $W_c = 1,2$  m e profundidade  $H_c = 0,23$  m. O FTW possuiu comprimento  $L = 0,256$  m, largura  $W = W_c = 1,2$  m e cinco valores de profundidade:  $H/H_c = 0,1, 0,25, 0,5, 0,75$  e  $0,9$ , sendo  $H$  o comprimento das raízes. (Figura 1). Os eixos cartesianos  $(x, y, z)$  se originaram no fundo do canal, cujos respectivos componentes de velocidade foram  $(u, v, w)$ . O modelo computacional foi feito em escala de laboratório (Yamasaki e Janzen, 2020a, Liu *et al.*, 2019), cuja geometria do FTW é representativa de sistemas em escala de campo (De Stefani *et al.*, 2011).

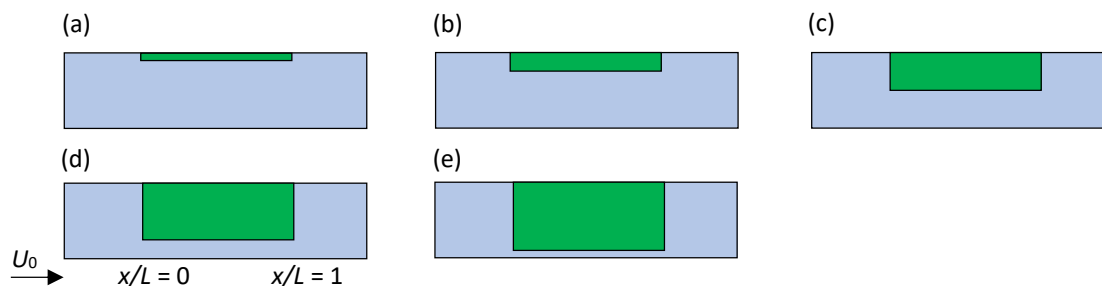


Figura 1 – Geometria do modelo computacional no plano lateral  $(x-y)$ . O FTW aparece em verde, cuja face de entrada se localiza em  $x/L = 0$ , e a face de saída se localiza em  $x/L = 1$ . O canal aparece em azul. (a)  $H/H_c = 0,1$ . (b)  $H/H_c = 0,25$ . (c)  $H/H_c = 0,5$ . (d)  $H/H_c = 0,75$ . (e)  $H/H_c = 0,9$ . O escoamento é indicado pela seta, com velocidade inicial  $U_0$ .

Para melhor visualização do FTW, a entrada e a saída do canal não aparecem na figura.

A geometria foi discretizada em uma malha composta por elementos de volume finito, nos quais as equações governantes de conservação de massa, quantidade de movimento e turbulência foram solucionadas com um erro de convergência de  $10^{-6}$ . O tamanho dos elementos hexaédricos da malha foi de 0,04 m fora dos FTWs e de 0,01 m no interior dos FTWs. O número de elementos das malhas variou entre 235662 e 288166 para os casos simulados de  $H/H_c$ .

As seguintes condições de contorno foram utilizadas nas simulações. A entrada do canal foi definida como *velocity-inlet*, com velocidade inicial e uniforme de  $U_0 = 0,098$  m/s. As paredes e o fundo do canal foram tratados como paredes não-deslizantes. O topo do canal e do FTW foi definido como simetria. A saída do canal foi representada como *pressure-outlet*, com pressão nula. As simulações foram realizadas em regime permanente no solver FLUENT® v.19.5, utilizando-se as

equações *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) e o modelo de turbulência *Transition Shear Stress Transport* (SST).

Os FTWs foram modelados como meio poroso, no qual um termo sumidouro de quantidade de movimento ( $S_i$ ) foi atribuído às células correspondentes aos FTWs. O  $S_i$  foi computado como a resistência do FTW ao escoamento, conforme a equação de Darcy-Forchheimer:

$$S_i = -\left(\frac{1}{\alpha}\mu u_i + C_2 \frac{1}{2}\rho |u| u_i\right) \quad (1)$$

onde  $1/\alpha$  é o coeficiente de resistência viscosa,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica,  $u_i$  é o componente da velocidade e  $C_2$  é o coeficiente de resistência inercial. A resistência dos FTWs foi de  $1/\alpha = 70507,2 \text{ m}^{-2}$  e  $C_2 = 73,2 \text{ m}^{-1}$  nas direções  $x$  e  $z$ , e de  $1/\alpha = 365,5 \text{ m}^{-2}$  e  $C_2 = 6,1 \text{ m}^{-1}$  na direção  $y$ , baseada no modelo de Liu *et al.* (2019). O meio poroso é uma boa alternativa para rodar a simulação mais rapidamente, uma vez que as raízes do FTW não precisam ser delineadas na etapa de criação da geometria (Yamasaki *et al.*, 2022; Yamasaki e Janzen, 2020b; Xavier *et al.*, 2018). Essa estratégia deriva de estudos desenvolvidos com vegetação aquática emergente (Yamasaki *et al.*, 2021c; Yamasaki *et al.*, 2019), após se verificar que o meio poroso é capaz de capturar os fenômenos hidrodinâmicos formados na interação escoamento-vegetação, e considerando que a representação individual dos caules que compõem a vegetação torna a malha mais complexa (Yamasaki e Janzen, 2021d; Yamasaki *et al.*, 2018; De Lima *et al.*, 2015).

### 3 RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os valores de velocidade  $u$  mínima ( $u_{min}/U_0$ ) e comprimento de recuperação da velocidade  $u$  a jusante do FTW ( $\Delta x_{recov}/L$ ) em função do comprimento de raízes ( $H/H_c$ ), obtidos na linha de centro do FTW ( $z = W/2$ ) e a meia profundidade do FTW ( $y = H_c - H/2$ ). Primeiramente, a análise foi feita para  $u_{min}/U_0$ . Entre  $H/H_c = 0,1$  e  $0,5$ ,  $u_{min}/U_0$  se manteve em valores baixos, de até  $0,2$ . Isso significa que raízes de comprimento igual à metade da profundidade da água reduziram consideravelmente a velocidade do escoamento na região do FTW, e que, portanto, a maior parte do escoamento a montante do FTW foi desviada para baixo do FTW. Para  $H/H_c > 0,5$ ,  $u_{min}/U_0$  aumentou significativamente para  $0,66$  ( $H/H_c = 0,9$ ), o que corresponde ao aumento de  $230\%$  em relação a  $H/H_c = 0,5$ . Este resultado indica que, quando a seção transversal ocupada pelo FTW é maior do que a seção transversal livre abaixo do FTW, isto é,  $H/H_c > 0,5$ , a fração do escoamento desviado abaixo do FTW tende a ser reduzida, aumentando  $u_{min}/U_0$  na linha de centro do FTW.

Consequentemente, o aumento de  $H/H_c$  tende a aumentar a vazão de escoamento passando pelo FTW. Os valores de  $u_{min}/U_0$  se ajustaram à equação quadrática com concavidade para cima, sendo o valor mínimo  $u_{min}/U_0 = 0,05$  para  $H/H_c = 0,25$  (Figura 2).

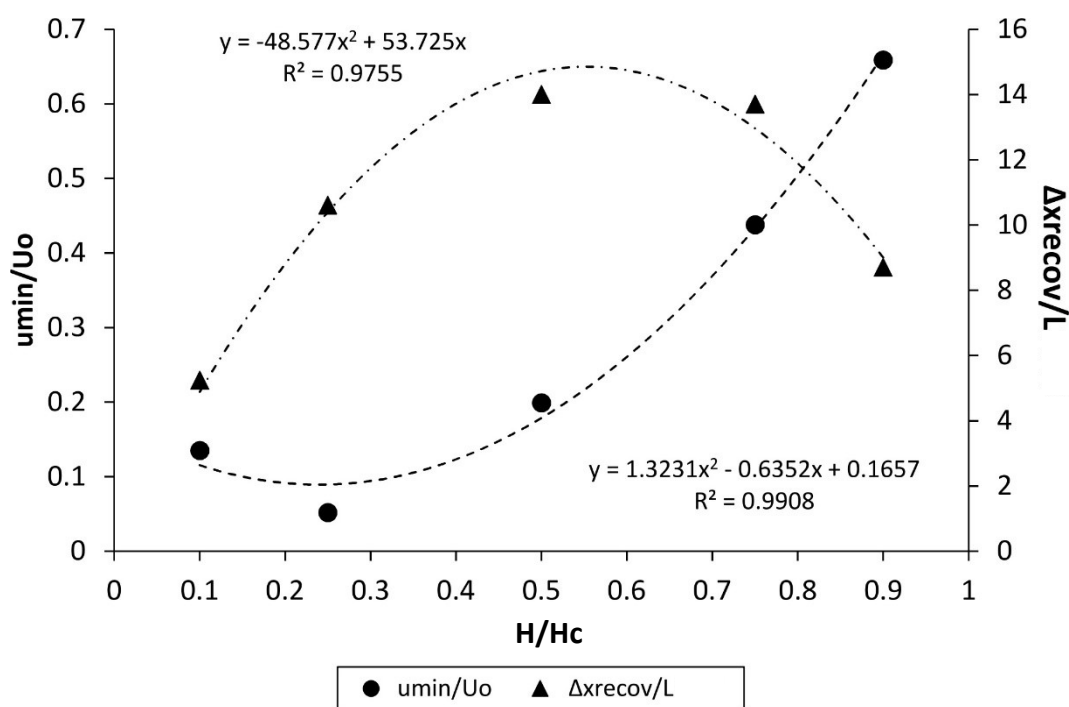


Figura 2 – Gráfico de  $u_{min}/U_0$ , a velocidade mínima obtida na linha de centro ( $z = W/2$ ) e a meia profundidade do FTW ( $y = H_c - H/2$ ), e gráfico de  $\Delta x_{recov}/L$ , a distância de recuperação da velocidade  $u$  do escoamento, em função de  $H/H_c$ , o comprimento de raízes.  $U_0$  é a velocidade inicial do escoamento,  $L$  é o comprimento do FTW, e  $H_c$  é a profundidade do canal.

A posição de  $u_{min}/U_0$  foi determinada por  $\Delta x_{min}/L$ , que representou a distância longitudinal entre a entrada do FTW ( $x/L = 0$ ) até a ocorrência de  $u_{min}/U_0$  na linha de centro ( $z = W/2$ ) e a meia profundidade do FTW ( $y = H_c - H/2$ ) (Figura 3). Para  $H/H_c = 0,1$ ,  $\Delta x_{min}/L < 1$ , isto é,  $u_{min}/U_0$  ocorreu dentro do FTW. Para  $H/H_c > 0,1$ ,  $\Delta x_{min}/L$  aumentou linearmente, sendo  $\Delta x_{min}/L = 3,36$  para  $H/H_c = 0,9$ . Ou seja, o aumento no comprimento de raízes deslocou  $u_{min}/U_0$  a posições mais distantes do FTW, chegando à distância de aproximadamente 3,5 vezes o comprimento do FTW para  $H/H_c = 0,9$ . O afastamento de  $u_{min}/U_0$  em relação ao FTW (Figura 3) somado ao aumento de  $u_{min}/U_0$  com o aumento de  $H/H_c$  (Figura 2) reforça que a velocidade no FTW tende a aumentar com o aumento de  $H/H_c$ , o que implica em mais vazão passando pelo FTW do que sendo desviado abaixo do FTW.

A segunda análise foi feita para  $\Delta x_{recov}/L$ , que representa o comprimento de recuperação da velocidade  $u$  na linha de centro ( $z = W/2$ ) e a meia profundidade do FTW ( $y = H_c - H/2$ ), a partir da entrada do FTW ( $x/L = 0$ ) (Figura 2). A recuperação refere-se à distância para que  $u$  retorne a 90% de  $U_0$ , isto é,  $u = 0,9U_0$ . Entre  $H/H_c = 0,1$  e  $0,5$ ,  $\Delta x_{recov}/L$  aumentou de 5,15 para 13,93 (aumento de 170%). Para  $H/H_c > 0,5$ ,  $\Delta x_{recov}/L$  diminuiu para 8,7 (redução de 38% em relação a  $H/H_c = 0,5$ ). Isso indica que, para FTWs com seção transversal igual ou menor do que a seção transversal livre abaixo deles ( $H/H_c \leq 0,5$ ), o aumento de  $H/H_c$  fez com que o FTW precisasse de maior comprimento a sua jusante para que  $u$  pudesse se recuperar a 90% de  $U_0$ . Por outro lado, para FTWs com seção transversal maior do que a seção transversal livre abaixo deles ( $H/H_c > 0,5$ ), a tendência foi oposta: o aumento de  $H/H_c$  fez com o FTW precisasse de menor comprimento a jusante do FTW para que  $u$  pudesse se recuperar a 90% de  $U_0$ . Os valores de  $\Delta x_{recov}/L$  se ajustaram à equação quadrática com concavidade para baixo, sendo o valor máximo  $\Delta x_{recov}/L = 13,93$  para  $H/H_c = 0,5$ .

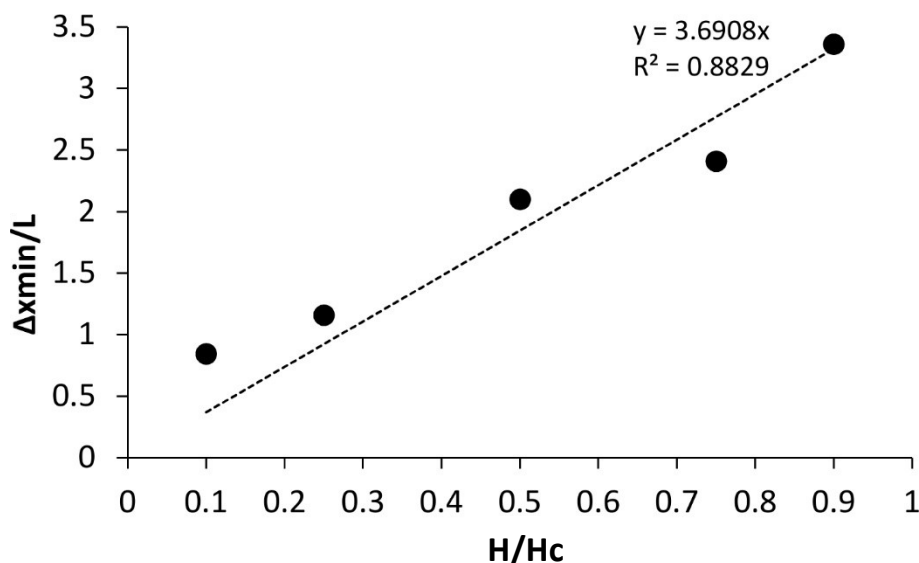


Figura 3 – Gráfico de  $\Delta x_{min}/L$ , a distância de ocorrência da velocidade mínima na linha de centro do FTW ( $z = W/2$ ) e a meia profundidade do FTW ( $y = H_c - H/2$ ), em função de  $H/H_c$ , o comprimento de raízes.  $U_0$  é a velocidade inicial do escoamento,  $L$  é o comprimento do FTW, e  $H_c$  é a profundidade do canal.

#### 4 CONCLUSÕES

Este estudo analisou o comportamento de redução ( $u_{min}/U_0$  e  $\Delta x_{min}/L$ ) e recuperação ( $\Delta x_{recov}/L$ ) da velocidade do escoamento passando por um FTW de diferentes comprimentos de raízes ( $H/H_c = 0,1, 0,25, 0,5, 0,75$  e  $0,9$ ). O aumento de  $H/H_c$  fez com que  $u_{min}/U_0$  aumentasse e ocorresse em posições cada vez mais afastadas do FTW (maior  $\Delta x_{min}/L$ ). Além disso, a fração da seção transversal



do canal ocupada pelo FTW definiu dois resultados distintos. Primeiro, para  $H/H_c \leq 0,5$ ,  $u_{min}/U_0 \leq 0,2$  e o aumento de  $H/H_c$  aumentou  $\Delta x_{recov}/L$  a jusante do FTW. Segundo, para  $H/H_c > 0,5$ ,  $u_{min}/U_0$  aumentou consideravelmente a 0,66, e o aumento de  $H/H_c$  reduziu  $\Delta x_{recov}/L$  a jusante do FTW.

## AGRADECIMENTOS

Taís N. Yamasaki recebeu a bolsa nº 88882.458516/2019-01 da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) no decurso deste estudo. A autora também agradece a Chris Walker e Heidi Nepf pela discussão dos resultados.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BI, R.; ZHOU, C.; JIA, Y.; WANG, S.; LI, P.; REICHWALDT, E.; LIU, W. (2019). “Giving waterbodies the treatment they need: A critical review of the application of constructed floating wetlands”. *Journal of Environmental Management* 238, pp. 484-498.
- DE LIMA, PHS.; JANZEN, J.G.; NEPF, H. (2015). “Flow patterns around two neighboring patches of emergent vegetation and possible implications for deposition and vegetation growth”. *Environmental Fluid Mechanics* 15(4), pp. 881-898.
- DE STEFANI, G.; TOCCHETTO, D.; SALVATO, M.; BORIN, M. (2011). “Performance of a floating treatment wetland for in-stream water amelioration in NE Italy”. *Hydrobiologia* 674, pp. 157-167.
- FANG, T.; BAO, S.; SIMA, X.; JIANG, H.; ZHU, W.; TANG, W. (2016). “Study on the application of integrated eco-engineering in purifying eutrophic river waters”. *Ecological Engineering* 94, pp. 320-328.
- FOLLETT, E.M.; NEPF, H.M. (2012). “Sediment patterns near a model patch of reedy emergent vegetation”. *Geomorphology* 179, pp. 141-151.
- HEADLEY, T.; TANNER, C. (2012). “Constructed wetlands with floating emergent macrophytes: An innovative stormwater treatment technology”. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 42, pp. 2261-2310.
- LIU, C.; SHAN, Y.; LEI, J.; NEPF, H. (2019). “Floating treatment islands in series along a channel: The impact of island spacing on the velocity field and estimated mass removal”. *Advances in Water Resources* 129, pp. 222-231.
- LUCKE, T.; WALKER, C.; BEECHAM, S. (2019). “Experimental designs of field-based constructed floating wetland studies: A review”. *Science of the Total Environment* 660, pp. 199-208.
- SCHWAMMBERGER, P.; LUCKE, T.; WALKER, C.; TRUEMAN, S. (2019). “Nutrient uptake by constructed floating wetland plants during the construction phase of an urban residential development”. *Science of the Total Environment* 677, pp. 390-403.



WINSTON, R.; HUNT, W.; KENNEDY, S.; MERRIMAN, L.; CHANDLER, J.; BROWN, D. (2013). “*Evaluation of floating treatment wetlands as retrofits to existing stormwater retention ponds*”. Ecological Engineering 54, pp. 254-265.

XAVIER, M.; JANZEN, J.; NEPF, H. (2018). “*Numerical modeling study to compare the nutrient removal potential of different floating treatment island configurations in a stormwater pond*”. Ecological Engineering 111, pp. 78-84.

YAMASAKI, T.N.; CANNATA, G.; GALLERANO, F.; BARSI, L.; JANZEN, J.G. (2018). “*Effects of a 3-D, aquatic vegetation patch on the flow: A numerical approach*”. WSEAS Transactions on Environment and Development 14, pp. 590-598.

YAMASAKI, T.; DE LIMA, P.; SILVA, D.; PREZA, C.; JANZEN, J.; NEPF, H. (2019). “*From patch to channel scale: The evolution of emergent vegetation in a channel*”. Advances in Water Resources 129, pp. 131-145.

YAMASAKI, T.N.; JANZEN, J.G. (2020a). “*Estimativa do tempo de residência em wetlands flutuantes de tratamento*” in Anais do XIII ENAU - Encontro Nacional de Águas Urbanas e III SRRU - Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, Out. 2020.

YAMASAKI, T.N.; JANZEN, J.G. (2020b). “*Estimating the resistance of a porous media that numerically represents a floating treatment wetland*” in Anais do 1<sup>st</sup> IAHR Young Professionals Congress, Nov. 2020, pp. 199-200.

YAMASAKI, T.N.; JANZEN, J.G. (2021a). “*Effects of three floating treatment wetland arrangements on the flow field of a channel*” in Anais do EGU General Assembly 2021, Abr. 2021.

YAMASAKI, T.N.; JIANG, B.; JANZEN, J.G.; NEPF, H.M. (2021b) “*Feedback between vegetation, flow, and deposition: A study of artificial vegetation patch development*”. Journal of Hydrology 598, 126232.

YAMASAKI, T.N.; LIMA, P.H.S.; XAVIER, M.L.M.; JANZEN, J.G. (2021c). “*Modelagem da vegetação aquática em estudos de dinâmica dos fluidos computacional*”. Engenharia Sanitária e Ambiental 26, pp. 97-104.

YAMASAKI, T.N.; JANZEN, J.G. (2021d). “*Validação de um modelo computacional representando uma mancha de vegetação aquática*”. Revista Hidrolatinoamericana 5, pp. 20-22.

YAMASAKI, T.N.; WALKER, C.; JANZEN, J.G.; NEPF, H. (2022). “*Flow distribution and mass removal in floating treatment wetlands arranged in series and spanning the channel width*”. Journal of Hydro-environment Research 44, pp. 1-11.