

Lítio, dextrana e rodamina na avaliação da hidrodinâmica de sistemas alagados construídos

Lithium, dextran, and rhodamine in the hydrodynamic evaluation of constructed wetlands

Ana Paula Ferreira Colares¹ , Alisson Carraro Borges^{1*} ,
Karina Querne de Carvalho² , André Pereira Rosa¹ 

RESUMO

Sistemas alagados construídos (SACs) são alternativas de engenharia para tratamento de águas residuárias. Entretanto, ainda são limitadas as pesquisas relacionadas à hidrodinâmica desses sistemas, quando comparados a outras unidades de tratamento, como filtros biológicos, reatores anaeróbios, lagoas de estabilização, dentre outros. Dessa forma, neste estudo teve-se como objetivo avaliar o comportamento hidrodinâmico de três SACs de escoamento horizontal subsuperficial (plantados e não plantados) em escala piloto, por meio da injeção dos traçadores cloreto de lítio, dextrana azul e rodamina WT. Utilizaram-se diferentes metodologias de normalização, para vazão constante e para vazão variável, para avaliar o efeito da variação da taxa de escoamento no sistema. Além disso, determinaram-se os índices hidrodinâmicos e o grau de dispersão dos sistemas por meio dos modelos de escoamento tanques em série e escoamento disperso. Os valores recuperados de rodamina WT e de lítio foram satisfatórios, maiores do que 80% da massa injetada nos três SACs. Para a dextrana azul, a taxa recuperação não foi validada. Não foram verificadas diferenças nas curvas de distribuição de tempo de retenção submetidas às duas metodologias de normalização. Os índices hidrodinâmicos determinados revelaram baixo grau de curtos-circuitos, boa eficiência hidráulica e mistura nos sistemas. Os sistemas apresentaram grau de dispersão moderada, o que está de acordo com os resultados obtidos pelos índices hidrodinâmicos.

Palavras-chave: estudo hidrodinâmico; traçadores; *wetlands*.

ABSTRACT

Constructed wetlands (CWs) are engineering alternatives for wastewater treatment. However, the scientific literature related to the hydrodynamics of these systems is still scarce when compared to other treatments, such as trickling filters, anaerobic reactors, stabilizations ponds, among others. Thus, this study aimed to evaluate the hydrodynamic behavior of three subsurface horizontal flow CWs (vegetated and unvegetated) on a pilot scale by injecting the tracers lithium chloride, blue dextran, and rhodamine WT. Different normalization methodologies for constant and variable flows were used to evaluate the effect of flow rate variation on the system. In addition, hydrodynamic indices and the system dispersion degree were determined by tank-in-series and dispersion models. The recovered mass of rhodamine WT and lithium was greater than 80% in the three systems, considered satisfactory. For the blue dextran, the recovery rate was not validated. Residence time distribution curves were submitted to two normalization methodologies. No difference was detected. The hydrodynamic indices found revealed low short circuit level, good hydraulic efficiency and mixing in the systems. The systems presented a moderate degree of dispersion, agreeing with the results obtained by the hydrodynamic indices.

Keywords: hydrodynamic study; tracers; wetlands.

INTRODUÇÃO

Os sistemas alagados construídos (SACs) exercem papel importante na conservação ambiental (AYLWARD *et al.*, 2019), além de oferecerem uma série de benefícios como uso ecológico e recreativo nos ambientes em que são instalados (IOANNIDOU; PEARSON, 2017). Esses sistemas têm sido amplamente utilizados

mundialmente para tratamento de diversos tipos de efluentes industriais (WU *et al.*, 2015), urbanos (MAINE *et al.*, 2019) e rurais (FIOREZE; MANCUSO, 2019), reduzindo matéria orgânica, nutrientes, além de microrganismos patogênicos (WU *et al.*, 2016) e, mais recentemente, de contaminantes emergentes (MATAMOROS; RODRÍGUEZ; BAYONA, 2017).

¹Universidade Federal de Viçosa - Viçosa (MG), Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

*Autor correspondente: borges@ufv.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Processos PPM-00911-15 e APQ-01358-14, e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo 437485/2018-8.

Recebido: 23/10/2019 - **Aceito:** 27/07/2020 - **Reg. ABES:** 20200185

A eficiência de SACs está relacionada não somente aos processos físicos, químicos e biológicos, mas também à sua hidrodinâmica (YANG *et al.*, 2017). Portanto, a realização de ensaios com traçadores tem se mostrado uma alternativa para melhor compreender o desempenho hidráulico dos SACs (BAPTESTINI; MATOS; BORGES, 2016; YANG *et al.*, 2017).

Dentre os traçadores utilizados, a rodamina WT é considerada um traçador adequado para caracterização hidrodinâmica de SACs. Porém, há desvantagens, como adsorção, fotólise e biodegradação dessa substância (HEADLEY; KADLEC, 2007; LIN *et al.*, 2003). O lítio é bastante utilizado em estudos hidrodinâmicos por ser de baixo custo de aquisição e por não ser degradado. Contudo, esse traçador iônico não é recomendado para avaliação de grandes sistemas devido à elevada massa necessária para detecção de pico e porque pode ser absorvido pelas plantas (HEADLEY; KADLEC, 2007). Além disso, a utilização de traçadores salinos, muitas vezes, não é recomendada, visto que estes podem estar presentes em concentrações de fundo dos sistemas e no efluente a ser utilizado (RUNKEL, 2015). A dextrana azul tem elevada massa molecular (2×10^6 g mol⁻¹) e baixa difusividade no meio poroso, o que a torna apropriada para a realização de estudos hidrodinâmicos (JIMENEZ *et al.*, 1988; NARDI *et al.*, 1999; RIVERA *et al.*, 2010).

O comportamento do traçador na saída do sistema é analisado por meio de curvas de concentração *versus* o tempo que fornecem a função de distribuição de tempo de retenção (DTR). A análise da função DTR pode ser realizada pelo método dos momentos e por meio de modelagem de dados. Dentre as técnicas para análise do método dos momentos, citam-se a apresentada em Fogler (1999), que considera a vazão constante, e a metodologia desenvolvida por Werner e Kadlec (1996), em que a vazão é variável. Em grande parte dos estudos hidrodinâmicos realizados em sistemas com vazão variável é empregada a metodologia para vazão constante (HOLLAND *et al.*, 2004). Entretanto, na condução de estudos hidrodinâmicos em alagados construídos é necessário investigar o procedimento que melhor se adequa ao sistema, dadas as elevadas taxas de evapotranspiração que ocorrem em SACs, fazendo com que a vazão no sistema não seja, de fato, constante.

Com base no que foi apresentado, este estudo foi desenvolvido com os objetivos de avaliar, por meio da injeção de traçadores, o comportamento hidrodinâmico de SACs (plantados e não plantados) e, a partir desses resultados, comparar

as metodologias de normalização, determinar os índices hidrodinâmicos e o grau de dispersão dos sistemas, por meio dos modelos uniparamétricos de escoamento de tanques de mistura completa em série e de escoamento disperso.

METODOLOGIA

Sistema de tratamento

A pesquisa foi desenvolvida em três SACs com formato retangular, em escala piloto, fabricados com material resistente em polietileno de alta densidade (PEAD). Os sistemas apresentavam as seguintes dimensões: 0,60 m de altura, 0,5 m de largura e 2,0 m de comprimento (Figura 1). Esses recipientes foram preenchidos com brita “número zero”, sendo o diâmetro $D_{50} = 7,0$ mm, o coeficiente $D_{60}/D_{10} = 1,6$ e o índice de vazios de $0,484$ m³ m⁻³. O preenchimento foi feito até a altura de 0,25 m e o nível da água foi mantido a 0,05 m abaixo da superfície do material suporte. A altura da lâmina líquida nos SACs resultou em 0,20 m.

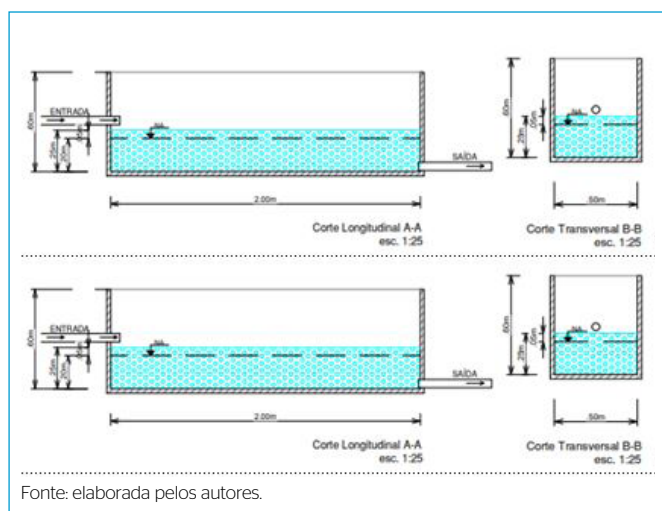
O volume útil de cada leito e o volume ocupado pelo líquido corresponderam, respectivamente, a 0,20 e 0,097 m³ nos três SACs.

Os SACs foram alimentados com água proveniente de uma das represas do ribeirão São Bartolomeu, localizada na Universidade Federal de Viçosa. A água de abastecimento foi armazenada em um reservatório de 1000 L, de onde era recalçada por bombas dosadoras Concept Plus da Prominent para os sistemas com vazão de 96,7 L d⁻¹ (τ de 1 dia). Portanto, a vazão aplicada foi de 97 L d⁻¹ nos três SACs. A saída das bombas era conectada a um sistema de “T” invertido, formado por um tubo de PVC (25 mm) perfurado, disposto na superfície de cada SAC, para promover distribuição uniforme do líquido. Essa tubulação em forma de “T” também foi acoplada internamente no final do sistema, para captação do efluente. Os leitos continham ainda um tubo e um joelho, para o controle da altura do líquido, além de um recipiente, para coletar o volume drenado, para que este pudesse ser determinado.

Para avaliar a interferência da vegetação na hidrodinâmica dos SACs, foram plantadas 20 mudas de aguapé (*Eichhornia crassipes*) a 5 cm de profundidade na brita nos sistemas SAC₁ e SAC₂, enquanto um leito permaneceu sem vegetação — SAC₃. O aguapé, apesar de ser uma macrófita flutuante, foi testado com sucesso por Mello *et al.* (2019) e Lima *et al.* (2018) em SACs de escoamento subsuperficial. A espécie apresenta resistência à condição de alagamento, disponibilidade em diversas regiões e taxa de reprodução expressiva.

Estudo hidrodinâmico

O estudo hidrodinâmico foi realizado com os traçadores cloreto de lítio, dextrana azul e rodamina WT nos sistemas sem prévia utilização, ou seja, sem colmatação do maciço filtrante. A injeção dos traçadores nos sistemas foi realizada em forma de pulsos, de acordo com o método de Headley e Kadlec (2007). Os três traçadores foram diluídos separadamente e depois misturados, com pequeno volume aplicado (0,895 L), se comparado ao volume de líquido residente nas unidades. A quantidade de massa dos traçadores rodamina WT e dextrana azul adicionada aos SACs foi baseada na pesquisa desenvolvida por Nardi *et al.* (1999). O cálculo foi feito por meio da ponderação do volume útil do sistema com a concentração de entrada dos traçadores. A massa de cloreto de lítio de 57,7 g (9,45 g de Li⁺) adicionada aos SACs foi definida de acordo com metodologia reportada por Costa (2016), com base na mesma linha de cálculos. Os valores



Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 1 - Diagrama esquemático dos sistemas alagados construídos.

da massa e da concentração dos traçadores adicionados são apresentados na Tabela 1. As diferentes concentrações de entrada justificam-se devido às técnicas de leitura de cada traçador; por exemplo: a rodamina WT é lida na ordem de ppb (requer menor quantidade) e ao custo de aquisição de cada reagente.

A amostragem iniciou-se antes da aplicação dos traçadores, para obtenção da concentração *background*, que foi considerada zero para o cloreto de lítio, devido a não detecção da substância no sistema e, respectivamente, 0,7 mg L⁻¹ e 3 µg L⁻¹ para a dextrana e rodamina. Os traçadores foram inseridos nos SACs por meio de uma solução preparada com a massa previamente calculada, no período de aproximadamente cinco minutos.

A solução foi inserida manualmente para assegurar que a injeção dos traçadores fosse a mais próxima possível de um sinal de entrada, na forma de pulso ideal. Após a aplicação dos traçadores, foram coletadas manualmente amostras simples no final dos SACs e armazenadas em frascos de vidro opacos. O intervalo entre as amostragens foi inferior a 0,10 do tempo de retenção hidráulica nominal (τ) de 1 d, ou seja, a cada duas horas, como sugerido por Headley e Kadlec (2007), durante 3 dias. Após esse período, a amostragem foi realizada com outros intervalos, conforme apresentado abaixo, e perdurou até o 12º dia para a dextrana azul e até o 18º dia para a rodamina e o cloreto de lítio, para garantir a saída completa de todo o traçador.

As coletas foram realizadas com frequência amostral, sendo:

- 1º ao 3º dia de coleta: amostragem de 2 em 2 horas;
- 4º dia: amostragem de 4 em 4 horas;
- 5º ao 7º dia: amostragem de 8 em 8 horas;
- 7º ao 13º dia: amostragem de 12 em 12 horas;
- 14º ao 18º dia: amostragem a cada 24 horas.

As concentrações dos traçadores foram obtidas por meio das leituras das amostras por técnicas específicas. A rodamina WT foi obtida de forma *online*, por meio de fluorescência em uma sonda multiparâmetros-MS5 (Hidrolab®). A quantificação de dextrana azul foi realizada em um espectrofotômetro DR6000 (Hach®) em cubeta de leitura de 50 mm de caminho ótico. O lítio foi estimado em um fotômetro de chama (Cónego®).

Para a realização do estudo hidrodinâmico, foram utilizadas metodologias consolidadas, como a descrita por Levenspiel (2000), para obtenção dos seguintes parâmetros: tempos de retenção hidráulica nominal e real (τ e τ_r), massa de traçador recuperada, número de dispersão (d) e número de tanques em série (N).

A normalização das curvas respostas foi realizada por meio dos métodos propostos por Fogler (1999) para vazão constante $E(\theta)$, por meio do qual se obteve a variância adimensional (σ_θ^2), e Werner e Kadlec (1996) para vazão variável $E(\Phi)$. Dos dois métodos extraíram-se os momentos experimentais. Os índices hidráulicos como curto-circuito (θ_{10}), índice de momento (IM) e

índice de dispersão de Morril (IDM) foram calculados de acordo com o recomendado por Morrill *et al.* (1932), Wahl *et al.* (2010) e Rengers *et al.* (2016), respectivamente; todas as equações utilizadas estão apresentadas na Tabela 2. Durante a coleta das amostras, a vazão afluente foi monitorada, o que permitiu realizar os cálculos considerando-se a média entre a vazão afluente e efluente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudo hidrodinâmico

A taxa de recuperação do traçador indica a confiabilidade dos índices hidráulicos calculados a partir da curva resposta (SEEGER *et al.*, 2013). A massa recuperada da rodamina WT e do lítio foi maior do que 80% nos sistemas avaliados (Tabela 3), indicando que esses testes foram considerados aceitáveis para a condução do estudo hidrodinâmico (HEADLEY; KADLEC, 2007).

Por outro lado, a taxa de recuperação da dextrana azul foi superior a 200% nos sistemas, invalidando os dados com esse traçador. É provável que as altas taxas de recuperação da dextrana azul tenham sido verificadas por riscos na cubeta ou pela presença de sólidos na amostra, em que o feixe de luz do espectro é desviado e a leitura da absorbância é alterada, deturpando os resultados (BONNER *et al.*, 2017). Esses ruídos são mais perceptíveis em ensaios com baixas concentrações, o que pode ter distorcido os resultados obtidos nas leituras e, conseqüentemente, impactado a confiabilidade dos índices hidráulicos com uso desse traçador.

O tempo de retenção hidráulica real (τ_r) foi maior do que o tempo de retenção hidráulica nominal (τ) nos SACs avaliados com os três traçadores, como demonstrado na Tabela 3. Para a rodamina WT e a dextrana azul, o valor de τ_r resultou sete vezes maior do que o τ , e para o lítio os resultados de 2 e 3 dias foram mais próximos do tempo de retenção nominal. O sistema sem vegetação (SAC₀) apresentou maiores valores de τ_r , quando comparado com os outros dois sistemas cultivados (SAC₁ e SAC₂), sugerindo maior recirculação do fluido ou menor número de curtos-circuitos hidráulicos.

Bonner *et al.* (2017) observaram pequena diferença entre os valores de τ_r em sistemas não plantados (0,22 d), quando comparados com sistemas plantados (0,18 d), utilizando rodamina WT como traçador. Os autores atribuíram essa diferença a menor porosidade do leito no SAC plantado pela presença das raízes das plantas nos vazios do sistema. Além disso, esses autores observaram aumento de 7% no τ_r no método de aplicação do traçador por pulso, quando comparado ao resultado obtido na aplicação por degrau.

Paoli e von Sperling (2013) obtiveram valores semelhantes entre o τ_r (1,30 e 1,43 d) e o τ de 1,47 d em dois SACs (plantado e não plantado), respectivamente. Os autores justificaram o τ_r ligeiramente menor no sistema plantado devido à presença de caminhos preferenciais no SAC causados pelo preenchimento do meio pelo sistema radicular.

Costa *et al.* (2019) atribuíram os maiores valores de τ_r (de 4,71 a 7,4 d) em comparação ao valor de τ de 2,9 d em três diferentes configurações de SACs não plantados ao fenômeno de recirculação interna e ao efeito de cauda, provocados pelo aprisionamento do traçador em zonas mortas do sistema. Esse mesmo comportamento foi observado por Guo *et al.* (2017b) e Okhravi, Eslamian e Fathianpour (2017).

A evapotranspiração é outro fator que contribui para o aumento do tempo de retenção real em comparação ao tempo de retenção nominal (CHAZARENC;

Tabela 1 - Concentração de entrada dos traçadores nos sistemas alagados construídos.

Traçador	Massa adicionada (mg)	Concentração de entrada (mg L ⁻¹)	Massa adicionada/volume útil (g m ⁻³)
Rodamina WT	10	35	0,05
Dextrana azul	475	1.730	2,38
Cloreto de lítio	9.438	27.300	47,2

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 2 - Equações utilizadas para o estudo hidrodinâmico em sistemas alagados construídos.

$\theta = \frac{t_i}{\tau R}$ (Equação 1)	$C'(\Phi) = \frac{C(\Phi)V(\Phi)}{M}$ (Equação 9)
$C'(\theta) = \frac{c_i Q_m \tau R}{M}$ (Equação 2)	$M_0^* = \sum C'(\phi) \Delta\phi$ (Equação 10)
$M = \sum Q_{eff} c_i \Delta t_i$ (Equação 3)	$M_1^* = \sum \phi C'(\phi) \Delta\phi$ (Equação 11)
$M_0^* = \sum C'(\theta) \Delta\theta$ (Equação 4)	$M_2^* = \sum (\phi - M_1^*)^2 C'(\phi) \Delta\phi$ (Equação 12)
$M_1^* = \sum \theta C'(\theta) \Delta\theta$ (Equação 5)	$\theta_{10} = \frac{t_{10}}{\tau}$ (Equação 13)
$M_2^* = \sum (\theta - M_1^*)^2 C'(\theta) \Delta\theta$ (Equação 6)	$M_{pre} = \int_0^1 (1 - \Phi) C'(\Phi) d\Phi$ (Equação 14)
$\Phi = \frac{V_{eff}}{V_{sis}}$ (Equação 7)	$IM = 1 - M_{pre}$ (Equação 15)
$V_{eff} = \sum (Q_{eff} \Delta t_i)$ (Equação 8)	$IDM = \frac{t_{90}}{t_{10}}$ (Equação 16)

t_i : tempo correspondente a uma concentração monitorada; τ : tempo de retenção hidráulica nominal; τ_r : tempo de retenção hidráulica real; θ : tempo adimensional; $C'(\theta)$: concentração adimensional; c_i : concentração do traçador no tempo t ; Q_m : vazão média; M : massa de traçador recuperada na saída; Q_{eff} : vazão efluente; Δt_i : intervalo de tempo entre a coleta de amostras; $\Delta\theta$: intervalo de tempo adimensional entre a coleta de amostras; V_{eff} : volume efluente cumulativo; V_{sis} : volume de água no sistema; ϕ : tempo ponderado pela vazão (normalizado); $C(\phi)$: concentração de saída; $\Delta\phi$: intervalo de tempo normalizado entre a coleta de amostras; $V(\phi)$: volume do sistema normalizado; $C'(\phi)$: concentração de saída normalizada; M : massa de traçador recuperada na saída; M_0^* : momento zero; M_1^* : primeiro momento experimental; M_2^* : segundo momento experimental; θ_{10} : índice de curtos-circuitos; IM : índice de momento; IDM : Índice de Dispersão de Morril; C : concentração de pico (mg L⁻¹); M : massa de traçador a ser adicionada (mg); V_i : volume útil do reator (L). Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 3 - Porcentagens de recuperação, tempo de retenção nominal (τ) e tempo de retenção real (τ_r).

	Massa recuperada (%)			τ (d)	τ_r (d)		
	Rodamina WT	Lítio	Dextrana azul		Rodamina WT	Lítio	Dextrana azul
SAC ₁	114	97	284	1	6	2	6
SAC ₂	101	96	246	1	5	2	6
SAC ₃	105	83	224	1	7	3	7

τ : tempo de retenção hidráulica nominal; τ_r : tempo de retenção hidráulica real; SAC₁ e SAC₂: sistemas plantados; SAC₃: sem vegetação. Fonte: elaborada pelos autores.

MERLIN; GONTHIER, 2003; CHAZARENC; BRISSON; MERLIN, 2010; HEADLEY *et al.*, 2012), uma vez que as perdas de água aumentam a concentração do traçador na saída do sistema. Além disso, ao considerarem-se as perdas por evapotranspiração, a vazão utilizada no cálculo de τ será menor do que a vazão afluente ao SAC.

Comparação entre as metodologias de normalização

Os momentos experimentais calculados de acordo com as metodologias de normalização para sistemas com vazão constante proposta por Fogler (1999) e para vazão variável desenvolvida por Werner e Kadlec (1996) são apresentados na Tabela 3. Segundo Holland *et al.* (2004), o momento zero (M_0^*) é proporcional à massa do traçador recuperada, o primeiro momento (M_1^*), ao centroide da curva da DTR, quando M_0^* for igual a 1,0, e o segundo momento (M_2^*) representa a variância da curva da DTR. Para o escoamento pistonado, M_2^* será igual a zero e M_1^* , igual a 1,0, caracterizando um sistema sem zonas mortas ou curtos-circuitos hidráulicos.

Como pode ser observado na Tabela 4, os resultados obtidos para vazão constante para os valores dos momentos M_0^* e M_1^* foram diferentes de 1,0. Para a vazão variável, os mesmos momentos experimentais atenderam aos critérios estabelecidos por Holland *et al.* (2004).

Xavier e Janzen (2017) observaram grande variação entre o escoamento pistonado e o de mistura completa com valores de M_2^* superiores a 0 (0,448 a 1,122). Aylward *et al.* (2019) verificaram que as DTRs calculadas pelo método da vazão constante foram expressivamente diferentes, enquanto as mesmas DTRs calculadas pelo método para vazões variáveis eram semelhantes entre si.

As curvas propostas pelas duas metodologias de normalização ($E\theta$ e $E\Phi$) e a curva de concentração *versus* tempo (C -pulso), sem aplicação do método de normalização, são apresentadas nas Figuras 2, 3 e 4 para a rodamina WT, lítio e dextrana azul, respectivamente.

As curvas são plotadas para verificar a existência de alguma diferença entre as metodologias de normalização. Geralmente, as curvas resultantes do método da vazão variável (C^Φ) apresentam desvio para a esquerda em comparação com

as curvas oriundas da vazão constante (C^0). Aylward *et al.* (2019) verificaram esse deslocamento devido à correção pela vazão utilizando uranina como traçador.

Na Figura 2, observa-se leve desvio da curva C^0 em relação à curva C^0 . Contudo, como essa diferença é pequena, supõe-se que as vazões não tiveram grande variação, considerando-se a verificação periódica da vazão afluente dos sistemas e as pequenas perdas por evapotranspiração. Assim, as metodologias de normalização demonstraram que as variações na vazão não influenciaram a hidrodinâmica dos sistemas em estudo.

Holland *et al.* (2004) observaram que o tempo de retenção hidráulica era vulnerável às alterações na profundidade da água, mas não era significativamente sensível à variação da vazão. Os autores constataram ainda que a normalização proposta por Werner e Kadlec (1996) deve se adequar melhor para vazões sem grandes oscilações, como demonstrado na Tabela 4 para este estudo.

Na Figura 2B, nota-se que o pico de máxima concentração da rodamina WT ocorreu aproximadamente no 5º dia para os sistemas pela curva C-pulso, com concentração máxima detectável de 0,04 mg L⁻¹ para o SAC₁ e 0,03 para os SACs 2 e 3. Nessa figura é possível ainda verificar o fenômeno de cauda, resultante da difusão do traçador e do seu aprisionamento em zonas mortas do sistema. Esse fenômeno faz com que o traçador seja liberado de forma lenta na saída do SAC, e já foi reportado por Barca *et al.* (2018), Costa *et al.* (2019) e Guo *et al.* (2017a).

Na Figura 3, é apresentada comparação entre os perfis de saída para as funções C^0 e C^0 versus o tempo normalizado ou o volume ponderado e a concentração versus o tempo para o lítio.

Na Figura 3A, é possível verificar que o comportamento das curvas diferiram entre os sistemas, apresentando diversos picos, principalmente para o controle (SAC₃). Essa diferença foi mais sutil entre os leitos plantados (SAC₁ e SAC₂).

Comportamento semelhante ao deste estudo foi observado por Costa *et al.* (2019) em SACs não plantados, com curvas caracterizadas por grandes oscilações. Os autores atribuíram esse comportamento ao escoamento com recirculação interna, representado pela lenta mobilidade do lítio como traçador (LiCl). A recirculação interna pode ter sido provocada pelo aprisionamento do traçador em zonas mortas do sistema, como foi observado por Costa *et al.* (2019), Guo *et al.* (2017b) e Okhravi, Eslamian e Fathianpour (2017).

Apesar das oscilações nas curvas resposta dos três traçadores empregados, o lítio representou melhor as condições hidrodinâmicas dos sistemas, como pode

ser observado na Figura 3B. O tempo de pico foi próximo ao tempo de retenção nominal, de aproximadamente 1,0 d para os sistemas, indicando ocorrência insignificante de zonas mortas. As concentrações máximas detectáveis de lítio foram de 51, 48 e 29 mg L⁻¹ para os SACs 1, 2 e 3, respectivamente, indicando boa recuperação da massa do traçador de 80 a 100%.

Na Figura 4, é apresentada a comparação entre os perfis de saída para as funções C^0 e C^0 versus o tempo normalizado ou o volume ponderado e a concentração versus o tempo para a dextrana azul.

A dextrana azul apresentou comportamento variável, com presença de vários picos (Figura 4A). Segundo Aylward *et al.* (2019), os picos de concentração de saída amplos e arredondados indicam dispersão no escoamento, e o efeito de cauda, somado à presença de vários picos de concentração de traçador, caracteriza zonas mortas e estagnação.

O tempo de pico foi verificado em, aproximadamente, 7, 4 e 8 dias para os SACs 1, 2 e 3, respectivamente, como mostrado na Figura 4B. A concentração de pico do SAC₁ (7,28 mg L⁻¹) resultou superior ao esperado, conforme a Equação 1 (4,9 mg L⁻¹), e está de acordo com a elevada massa recuperada (> 200%). Nos SACs 2 e 3, as concentrações de pico foram de 3,78 e 3,30 mg L⁻¹, respectivamente.

Como a análise da dextrana azul foi exposta a ruídos, supõe-se que as variações nas curvas resposta são decorrentes dessas interferências, dificultando as comparações com os já escassos estudos reportados na literatura com utilização desse traçador. Nardi *et al.* (1999) obtiveram melhores ajustes dos modelos teóricos aos dados experimentais com a dextrana azul, em comparação com os demais traçadores, incluindo a rodamina WT, em um reator anaeróbio de bancada. Os autores consideraram esse traçador como o mais adequado para ensaios em reatores heterogêneos. Contudo, ressalta-se que a pesquisa desenvolvida por Nardi *et al.* (1999) foi realizada em ambiente controlado e em escala de bancada.

Índices hidrodinâmicos

Guo *et al.* (2017a) avaliaram diferentes índices hidráulicos e a relação existente entre eles, e concluíram que o índice de curto-circuito (θ_{10}), o IM e o IDM foram considerados os mais adequados para descrever o comportamento hidrodinâmico em SACs. Com isso, a partir das curvas da DTR, foi possível obter esses índices para a vazão constante E (θ) e para a vazão variável E (Φ), conforme apresentado na Tabela 5.

A presença de curtos-circuitos hidráulicos nos sistemas é avaliada pelo índice θ_{10} , que corresponde à razão entre o tempo em que 10% do traçador percorre o leito e o tempo de retenção hidráulica nominal. De acordo com Yang *et al.* (2017), o valor de θ_{10} será 1,0 para sistema de escoamento pistonado. Esses autores obtiveram θ_{10} com valor entre 0,036 e 0,054, e constataram efeito de curtos-circuitos hidráulicos, além da presença de zonas mortas em seu sistema. Na Tabela 5, é possível verificar que θ_{10} foi superior a 1,0 para a rodamina WT e a dextrana azul, e inferior a 1,0 para o lítio (0,70 a 0,94), indicando baixo grau de curtos-circuitos nos sistemas, como também verificado por Aylward *et al.* (2019).

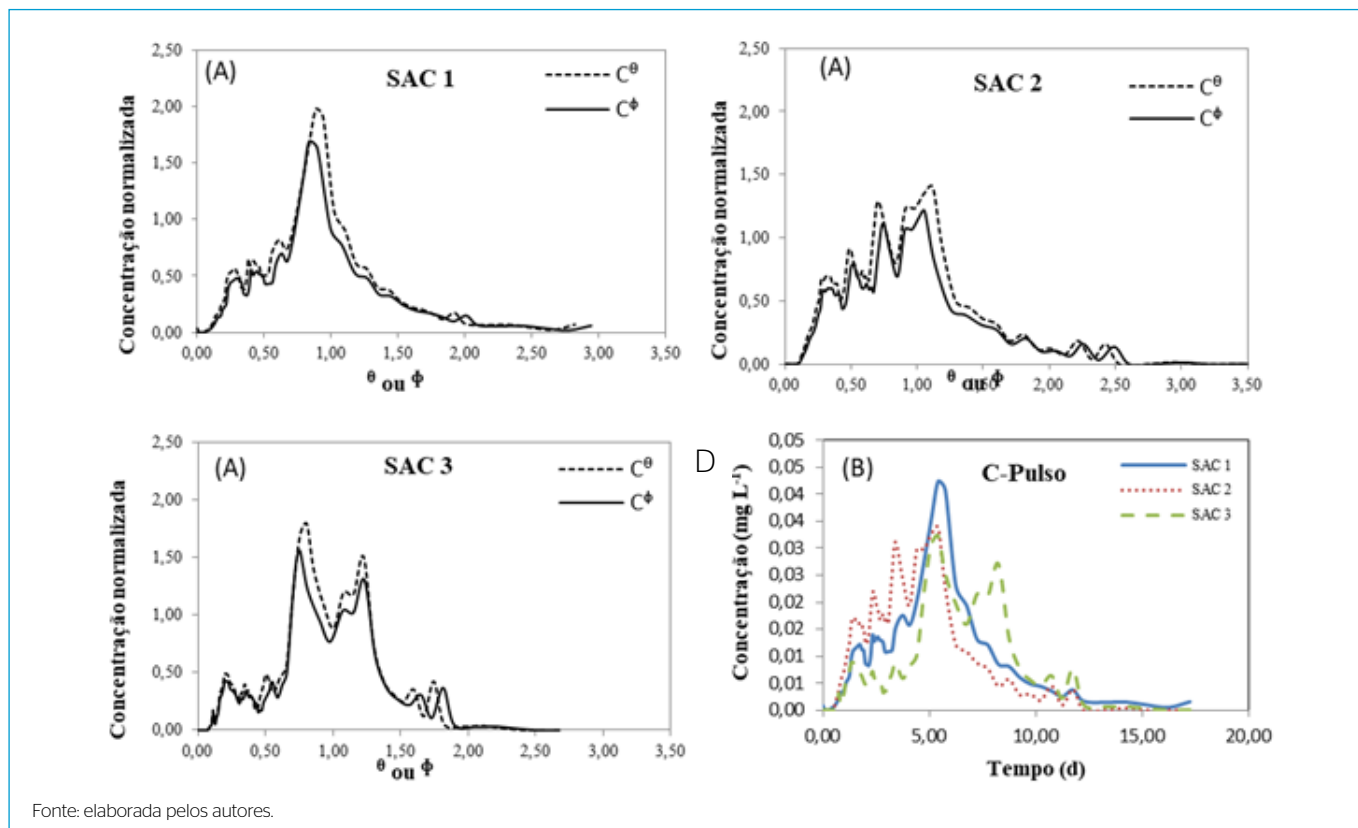
Os resultados obtidos com IM sugerem boa eficiência hidráulica nos sistemas, assim como os obtidos por Aylward *et al.* (2019), de 0,88 a 0,89. Guo *et al.* (2017a) obtiveram o IM variando entre 0,63 e 0,74, ou seja, valores inferiores aos obtidos neste estudo.

De acordo com Ghane, Feyereisen e Rosen (2019), o IDM deve estar na faixa de 1,0 < IDM ≤ 2,0 para escoamento pistonado. Neste estudo, o IDM variou de 3,68 a 7,91, indicando mistura nos sistemas. Guo *et al.* (2017a) e Aylward

Tabela 4 – Momentos experimentais para as metodologias de normalização para sistemas operados com vazão variável e vazão constante.

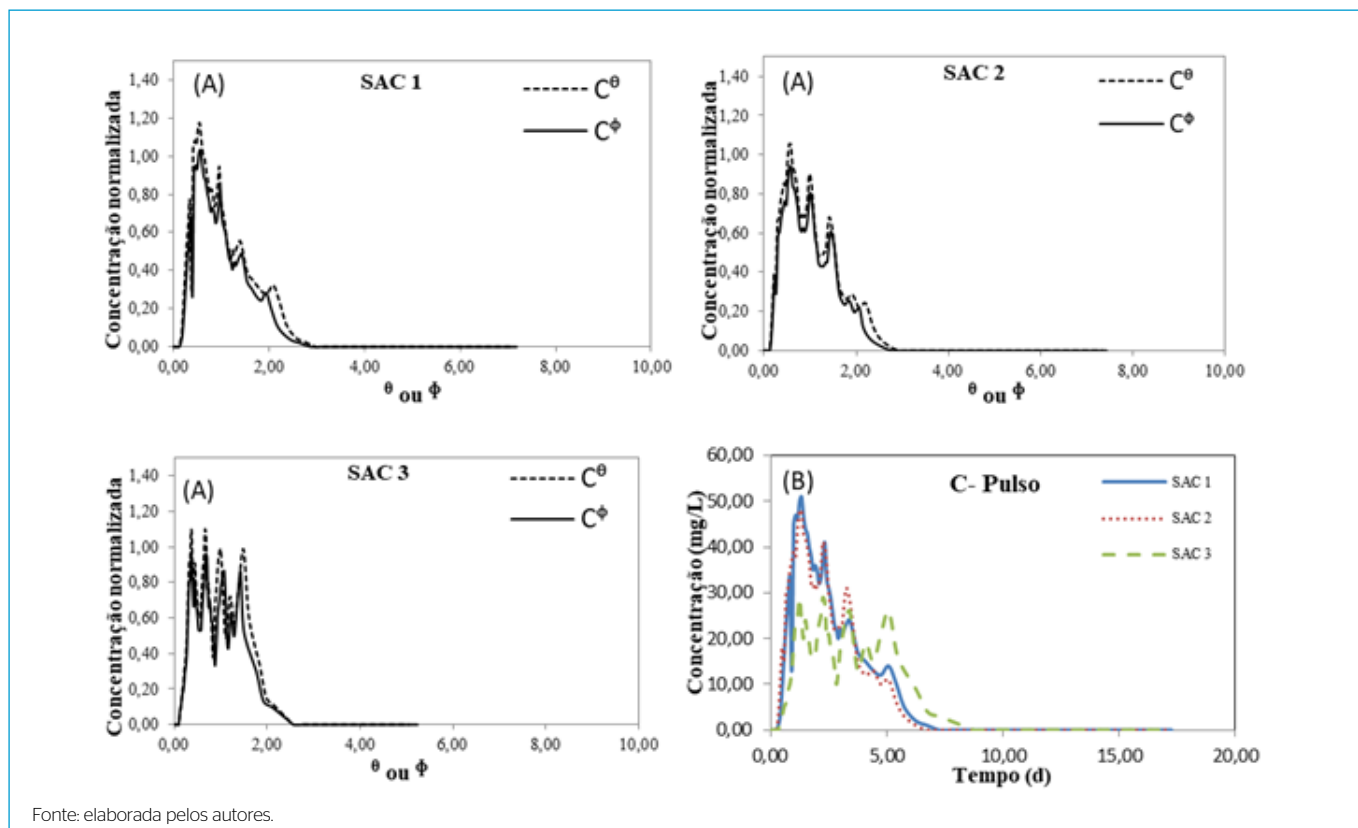
SAC	Traçador	Vazão constante E (θ)			Vazão variável E (Φ)		
		M_0^*	M_1^*	M_2^*	M_0^*	M_1^*	M_2^*
1	Rodamina WT	1,19	1,16	0,32	1,00	1,00	0,27
	Lítio	1,19	1,25	0,45	1,00	1,00	0,27
	Dextrana azul	1,16	1,12	0,16	1,00	1,00	0,12
2	Rodamina WT	1,22	1,21	0,35	1,00	1,00	0,27
	Lítio	1,16	1,21	0,42	1,00	1,00	0,27
	Dextrana azul	1,14	1,12	0,21	1,00	1,00	0,17
3	Rodamina WT	1,15	1,12	0,19	1,00	1,00	0,16
	Lítio	1,19	1,24	0,37	1,00	1,00	0,25
	Dextrana azul	1,16	1,07	0,14	1,00	1,00	0,13

Fonte: elaborada pelos autores.



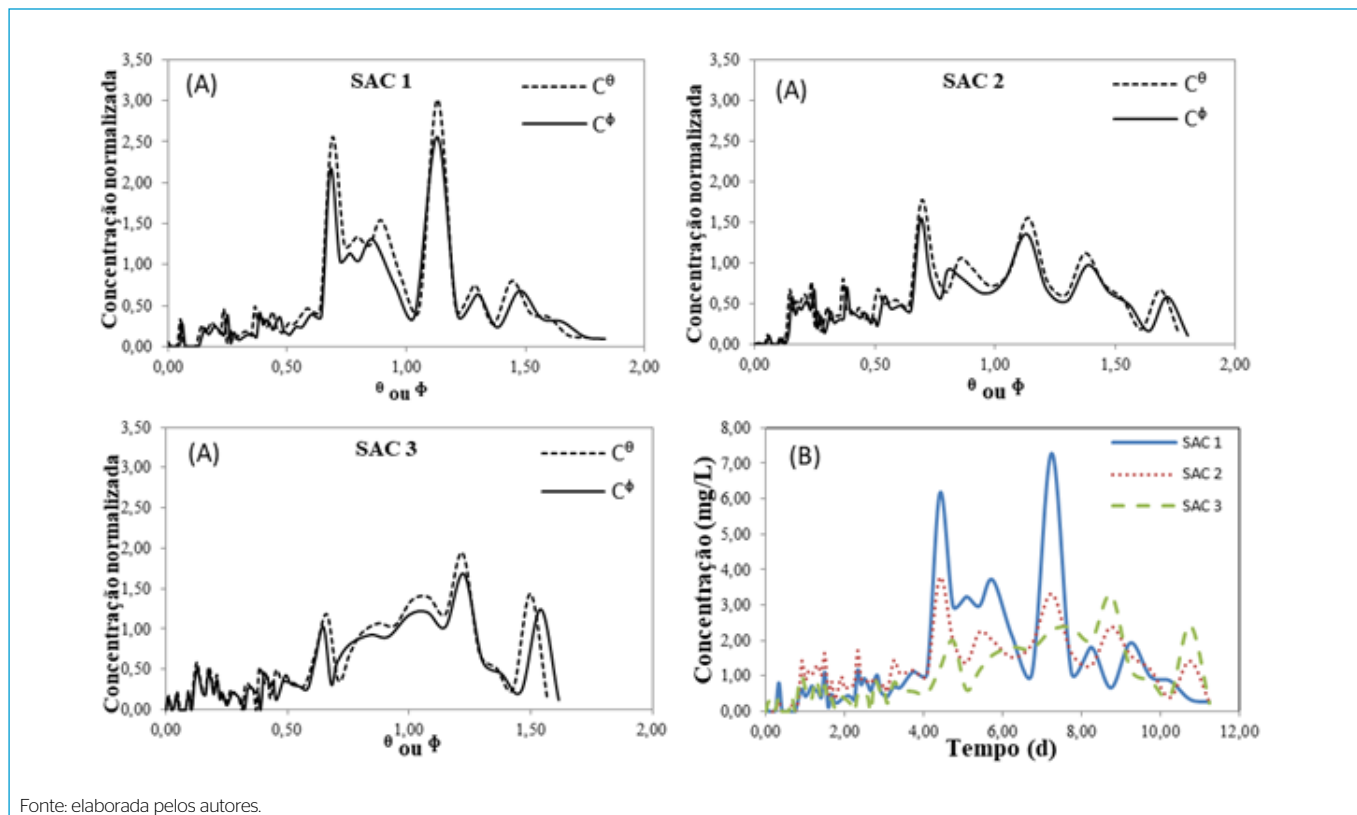
Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 2 - Comparação entre os perfis de saída para (A) as funções C^θ e C^ϕ versus o tempo normalizado ou o volume ponderado e (B) concentração versus tempo para a rodamina WT.



Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 3 - Comparação entre os perfis de saída para (A) as funções C^θ e C^ϕ versus o tempo normalizado ou o volume ponderado e (B) concentração versus tempo para o lítio.



Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 4 – Comparação entre os perfis de saída para (A) as funções C^θ e C^ϕ versus o tempo normalizado ou o volume ponderado e (B) concentração versus tempo para dextrana azul.

et al. (2019) também verificaram mistura em seus SACs, com valores do IDM variando de 2,60 a 3,85 e 2,4, respectivamente.

Não foram verificadas diferenças entre os índices hidráulicos calculados para a vazão constante e para a vazão variável, o que está de acordo com as curvas apresentadas nas Figuras 2, 3 e 4. Porém, ainda é necessário desenvolver equações para avaliar os sistemas com vazão variável, para que essa comparação seja mais adequada, já que em grande parte dos índices existentes é considerada a vazão constante.

Efeito do grau de dispersão no sistema alagado construído

O modelo de dispersão e o modelo de tanques de mistura completa em série foram utilizados para avaliar o desvio de idealidade dos sistemas. Os valores de d e N (Tabela 6) foram calculados de acordo com a metodologia reportada por Levenspiel (2000). A condição de contorno de vaso fechado-fechado foi escolhida por ser a mais representativa para SACs de escoamento horizontal subsuperficial (GARCÍA *et al.*, 2004; KADLEC; WALLACE, 2008). Segundo Levenspiel (2000), o modelo de dispersão de pequena intensidade só deve ser aplicado respeitando-se a premissa de $d < 0,010$ e, por essa razão, não foi empregado neste estudo.

Os sistemas apresentaram dispersão moderada de acordo com a classificação de Metcalf e Eddy (2003) para valores na faixa de $0,050 \leq d \leq 0,250$. A relação entre d e N é inversamente proporcional, sendo que para escoamento ideal d tende a zero e N tende ao infinito (LEVENSPIEL, 2000; PERSSON, 2000). Os resultados obtidos neste estudo corroboram os encontrados por Paoli e von Sperling (2013), em SACs de EHSS, com relação L/W de 8,3. Os autores obtiveram d 0,084 e 0,079 e N 6,50 e 6,87 para unidade plantada (UP) e não plantada (UNP), respectivamente, indicando dispersão moderada.

Tabela 5 – Índices hidrodinâmicos calculados para os traçadores considerando vazão constante e vazão variável.

SAC	Traçador	Vazão constante E (θ)			Vazão variável E (Φ)		
		θ_{10}	IM	IDM	θ_{10}	IM	IDM
1	Rodamina WT	1,33	0,80	4,88	1,33	0,81	4,85
	Lítio	0,78	1,14	3,68	0,78	1,11	3,68
	Dextrana azul	1,32	0,74	5,48	1,32	0,76	5,48
2	Rodamina WT	1,19	0,95	4,25	1,19	0,94	4,25
	Lítio	0,70	1,11	4,04	0,70	1,09	4,04
	Dextrana azul	1,07	0,84	7,09	1,07	0,85	7,09
3	Rodamina WT	1,27	0,78	5,96	1,27	0,79	5,96
	Lítio	0,94	1,15	4,55	0,94	1,11	4,55
	Dextrana azul	1,04	0,83	7,91	1,04	0,85	7,91

Fonte: elaborada pelos autores.

Bonner *et al.* (2017) verificaram resultados semelhantes em UP (d 0,15 e N 4), quando comparada com UNP (d 0,058 e N 9) em SACs de EHS. Matos *et al.* (2015) também observaram menor dispersão na UNP, constatando que sistemas plantados apresentam escoamento mais turbulento, em seus sistemas de EHSS, com L/W de 8,3. Esses autores obtiveram valores de d 0,32 e 0,14 e de N 2 e 4, para UP e UNP, respectivamente, sendo o regime de escoamento classificado como de alta dispersão, condizente com o observado por Laurent *et al.* (2015).

Por outro lado, Seeger *et al.* (2013) apresentaram resultados contrários aos observados nas pesquisas citadas anteriormente, com menor dispersão na UP

Tabela 6 – Número de dispersão (d) e número de tanques em série (N) para os sistemas alagados construídos.

SAC	Traçador	d	N
1	Rodamina WT	0,144	4,04
	Lítio	0,194	3,19
	Dextrana azul	0,065	8,37
2	Rodamina WT	0,143	3,95
	Lítio	0,195	3,28
	Dextrana	0,096	5,9
3	Rodamina WT	0,083	6,69
	Lítio	0,151	3,82
	Dextrana azul	0,066	8,04

Fonte: elaborada pelos autores.

(d 0,04 a 0,11 e N 4,6 a 11,3) e tendência ao escoamento pistonado, em seus sistemas de EHSS, com L/W de 4,5.

Costa *et al.* (2019) verificaram valores de d variando de 0,09 a 0,18 em três SACs de EHSS não plantados com diferentes configurações (L/W de 1; 4 e 7,3). Esses autores utilizaram a condição aberto-fechada para o cálculo de d, pois a forma de aplicação do traçador se adequava melhor a essa condição, e classificaram seus sistemas na faixa de dispersão moderada. Os autores obtiveram resultados de N de 2,13 a 4,71, sendo os valores maiores para os SACs com maior relação comprimento/largura (L/W). De acordo com Matos *et al.* (2018), quanto maior a relação L/W, menor será o grau de dispersão nos sistemas, uma vez que as condições hidrodinâmicas estarão próximas ao escoamento pistonado.

Guimarães (2013) obteve valores de d e N iguais a 0,02 e 25,5, em um SAC de EHSS, indicando que o sistema operava em regime pistonado (*plug flow*), e relação L/W de 1,5, considerada baixa em comparação à deste estudo (L/W de 4,0). Contudo, o autor salientou que, além da relação L/W, a dispersão também

está associada à granulometria do meio filtrante e à carga hidráulica do sistema, similarmente ao reportado por García *et al.* (2004).

CONCLUSÕES

Os estudos com os traçadores rodamina WT e cloreto de lítio foram considerados válidos de acordo com o valor da taxa de recuperação da massa. O sistema sem vegetação apresentou maiores valores de tempo de retenção hidráulica real, quando comparado aos sistemas alagados cultivados.

As metodologias de normalização revelaram pequena diferença entre as curvas de vazão constante e variável, e, portanto, o uso de um ou outro método não influenciou o estudo hidrodinâmico para o caso investigado. Os resultados demonstraram ainda boa eficiência hidráulica e mistura nos sistemas. Quanto ao grau de dispersão, observou-se dispersão moderada nos sistemas avaliados em conformidade com os resultados obtidos pelos índices hidráulicos.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Colares, A. P. F.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita – Primeira Redação. Borges, A. C.: Obtenção de Financiamento, Administração do Projeto, Recursos, Supervisão, Validação, Escrita – Revisão e Edição. Carvalho, K. Q.: Supervisão, Revisão e Edição. Rosa, A. P.: Supervisão, Escrita – Revisão e Edição.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG PPM-00911-15 e APQ-01358-14) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001).

REFERÊNCIAS

- AYLWARD, L.; BONNER, R.; SHERIDAN, C.; KAPPELMEYER, U. Hydraulic study of a non-steady horizontal sub-surface flow constructed wetland during start-up. *Science of the Total Environment*, v. 646, p. 880-892, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.324>
- BAPTESTINI, G.C.F.; MATOS, A.T.; BORGES, A.C. Effect of reversal of the flow direction on hydrodynamic characteristics and plants cultivated in constructed wetland systems. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 38, n. 1, p. 49-56, 2016. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v38i1.27864>
- BARCA, C.; ROCHE, N.; TROESCH, S.; ANDRÉS, Y.; CHAZARENC, F. Modelling hydrodynamics of horizontal flow steel slag filters designed to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, v. 206, p. 349-356, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.040>
- BONNER, R.; AYLWARD, L.; KAPPELMEYER, U.; SHERIDAN, C. A comparison of three different residence time distribution modelling methodologies for horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v. 99, p. 99-113, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.024>
- CHAZARENC, F.; BRISSON, J.; MERLIN, G. Seasonal and spatial changes of microorganism communities in constructed wetlands: a community level physiological profiling analysis. *International Journal of Chemical Engineering*, v. 2010, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/490240>
- CHAZARENC, F.; MERLIN, G.; GONTHIER, Y. Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v. 21, n. 2-3, p. 165-173, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2003.12.001>
- COSTA, R. A. *Fatores associados aos parâmetros ajustados na equação de cinética de primeira ordem modificada utilizada em sistemas alagados construídos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

- COSTA, R. A.; MATOS, M. P.; MATOS, A. T.; VON SPERLING, M. Hydrodynamic behavior of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and operation time. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 1, p. 83-91, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019175103>
- FIOREZE, M.; MANCUSO, M. A. MODFLOW and MODPATH for hydrodynamic simulation of porous media in horizontal subsurface flow constructed wetlands: A tool for design criteria. *Ecological Engineering*, v. 130, p. 45-52, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.01.012>
- FOGLER, H. S. *Elements of chemical reaction engineering*. Nova Jérsei: Prentice Hall, 1999.
- GARCÍA, J.; CHIVA, J.; AGUIRRE, P.; ÁLVAREZ, E.; SIERRA, J.P.; MUJERIEGO, R. Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size. *Ecological Engineering*, v. 23, n. 3, p. 177-187, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.09.002>
- GHANE, E.; FEYEREISEN, G. W.; ROSEN, C. J. Efficacy of bromide tracers for evaluating the hydraulics of denitrification beds treating agricultural drainage water. *Journal of Hydrology*, v. 574, p. 129-137, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.031>
- GUIMARÃES, T.M.V.D.A. *Comportamento de filtro plantado horizontal (wetlands construídos) no tratamento de esgoto unifamiliar*. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- GUO, C.; CUI, Y.; DONG, B.; LIU, F. Tracer study of the hydraulic performance of constructed wetlands planted with three different aquatic plant species. *Ecological Engineering*, v. 102, p. 433-442, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.040>
- GUO, C.; CUI, Y.; DONG, B.; LUO, Y.; LIU, F.; ZHAO, S.; WU, H. Test study of the optimal design for hydraulic performance and treatment performance of free water surface flow constructed wetland. *Bioresource Technology*, v. 238, p. 461-471, 2017b. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.163>
- HEADLEY, T.R.; DAVISON, L.; HUETT, D.O.; MÜLLER, R. Evapotranspiration from subsurface horizontal flow wetlands planted with *Phragmites australis* in sub-tropical Australia. *Water Research*, v. 46, n. 2, p. 345-354, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.042>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70110-6](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70110-6)
- HOLLAND, J.F.; MARTIN, J.F.; GRANATA, T.; BOUCHARD, V.; QUIGLEY, M.; BROWN, L. Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics. *Ecological Engineering*, v. 23, n. 3, p. 189-203, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.09.003>
- IOANNIDOU, V.G.; PEARSON, J. M. Case studies investigating hydraulic parameters in full-scale constructed wetlands. *European Water*, v. 58, p. 151-158, 2017.
- JIMENEZ, B.; NOYOLA, A.; CAPDEVILLE, B.; ROUSTAN, M.; FAUP, G. Dextran blue colorant as a reliable tracer in submerged filters. *Water Research*, v. 22, n. 10, p. 1253-1257, 1988. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(88\)90112-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(88)90112-1)
- KADLEC, R.H.; WALLACE, S. *Treatment wetlands*. Boca Raton: CRC Press, 2008. 1046 p.
- LAURENT, J.; BOIS, P.; NUEL, M.; WANKO, A. Systemic models of full-scale Surface Flow Treatment Wetlands: Determination by application of fluorescent tracers. *Chemical Engineering Journal*, v. 264, p. 389-398, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.073>
- LEVENSPIEL, O. *Engenharia das Reações Químicas-Cálculo de Reatores*. São Paulo: Edgard Blucher, 2000.
- LIMA, M.X.; CARVALHO, K.Q.; PASSIG, F.H.; BORGES, A.C.; FILIPPE, T.C.; AZEVEDO, J.C.R. Performance of different substrates in constructed wetlands planted with *E. crassipes* treating low-strength sewage under subtropical conditions. *Science of the Total Environment*, v. 630, p. 1365-1373, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.342>
- LIU, A.Y.-C.; DEBROUX, J.-F.; CUNNINGHAM, J.A.; REINHARD, M. Comparison of rhodamine WT and bromide in the determination of hydraulic characteristics of constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v. 20, n. 1, p. 75-88, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(03\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(03)00005-3)
- MAINE, M.A.; SANCHEZ, G.C.; HADAD, H.R.; CAFFARATTI, S.E.; PEDRO, M.C.; MUFARREGE, M.M.; DI LUCA, G.A. Hybrid constructed wetlands for the treatment of wastewater from a fertilizer manufacturing plant: Microcosms and field scale experiments. *Science of the Total Environment*, v. 650, parte 1, p. 297-302, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.044>
- MATAMOROS, V.; RODRÍGUEZ, Y.; BAYONA, J.M. Mitigation of emerging contaminants by full-scale horizontal flow constructed wetlands fed with secondary treated wastewater. *Ecological Engineering*, v. 99, p. 222-227, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.054>
- MATOS, A.T.; MATOS, M.P.; COSTA, R.A.; VON SPERLING, M. Influence of the geometric configuration of unplanted horizontal subsurface flow constructed wetlands in the adjustment of parameters of organic matter decay models. *Journal of Water Process Engineering*, v. 22, p. 123-130, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.009>
- MATOS, M.P.; VON SPERLING, M.; MATOS, A.T.; PASSOS, R.G. Saline tracer use for clogging and hydrodynamic evaluations in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Engenharia Agrícola*, v. 35, n. 6, p. 1137-1148, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1137-1148/2015>
- MELLO, D.; CARVALHO, K.Q.; PASSIG, F.H.; FREIRE, F.B.; BORGES, A.C.; LIMA, M.X.; MARCELLINO, G.R. Nutrient and organic matter removal from low strength sewage treated with constructed wetlands. *Environmental Technology*, v. 40, n. 1, p. 11-18, 2019. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1377291>
- METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.
- MORRILL, A.B.; DEAN, J.B.; ORTON, J.W.; ELLMS, J.W. Sedimentation basin research and design. *American Water Works Association*, v. 24, n. 9, p. 1442-1463, 1932.
- NARDI, I.R.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors. *Bioprocess Engineering*, v. 21, n. 5, p. 469-476, 1999. <https://doi.org/10.1007/s004490050704>
- OKHRAVI, S.; ESLAMIAN, S.; FATHIANPOUR, N. Assessing the effects of flow distribution on the internal hydraulic behavior of a constructed horizontal subsurface flow wetland using a numerical model and a tracer study. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 17, n. 4, p. 264-273, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.07.002>
- PAOLI, A.C.; VON SPERLING, M. Avaliação das condições hidrodinâmicas de wetlands de escoamento horizontal subsuperficial (unidades plantada

- e não plantada). *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. 1, n. 2, p. 213-222, 2013. <http://dx.doi.org/10.17565/gesta.v1i2.8299>
- PERSSON, J. The hydraulic performance of ponds of various layouts. *Urban Water*, v. 2, n. 3, p. 243-250, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00059-5)
- RENGERS, E.E.; SILVA, J.B.; PAULO, P.L.; JANZEN, J.G. Hydraulic performance of a modified constructed wetland system through a CFD-based approach. *Journal of Hydro-Environment Research*, v. 12, p. 91-104, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2016.04.002>
- RIVERA, F.F.; CRUZ-DÍAZ, M.R.; RIVERO, E.P.; GONZÁLEZ, I. Analysis and interpretation of residence time distribution experimental curves in FMO1-LC reactor using axial dispersion and plug dispersion exchange models with closed-closed boundary conditions. *Electrochimica Acta*, v. 56, n. 1, p. 361-371, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.08.069>
- RUNKEL, R.L. On the use of rhodamine WT for the characterization of stream hydrodynamics and transient storage. *Water Resources Research*, v. 51, n. 8, p. 6125-6142, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015WR017201>
- SEEGER, E.M.; MAIER, U.; GRATHWOHL, P.; KUSCHK, P.; KAESTNER, M. Performance evaluation of different horizontal subsurface flow wetland types by characterization of flow behavior, mass removal and depth-dependent contaminant load. *Water Research*, v. 47, n. 2, p. 769-780, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.10.051>
- WAHL, M.D.; BROWN, L.C.; SOBOYEJO, A.O.; MARTIN, J.; DONG, B. Quantifying the hydraulic performance of treatment wetlands using the moment index. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 12, p. 1691-1699, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.07.014>
- WERNER, T.M.; KADLEC, R.H. Application of residence time distributions to stormwater treatment systems. *Ecological Engineering*, v. 7, n. 3, p. 213-234, 1996. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(96\)00013-4](https://doi.org/10.1016/0925-8574(96)00013-4)
- WU, H.; ZHANG, J.; NGO, H.H.; GUO, W.; HU, Z.; LIANG, S.; FAN, J.; LIU, H. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. *Bioresour Technol*, v. 175, p. 594-601, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>
- WU, S.; CARVALHO, P.N.; MÜLLER, J.A.; MANOJ, V.R.; DONG, R. Sanitation in constructed wetlands: a review on the removal of human pathogens and fecal indicators. *Science of the Total Environment*, v. 541, p. 8-22, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.047>
- XAVIER, M.L.M.; JANZEN, J.G. Effects of inlet momentum and orientation on the hydraulic performance of water storage tanks. *Applied Water Science*, v. 7, n. 5, p. 2545-2557, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0449-5>
- YANG, M.; LIU, M.; BIAN, H.; SHENG, L.; HE, C. Effects of clogging on hydraulic behavior in a vertical-flow constructed wetland system: A modelling approach. *Ecological Engineering*, v. 109, parte A, p. 41-47, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.09.010>

