



## APLICAÇÃO DE REATOR DE BIOFILME AERADO POR MEMBRANA EM SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO AQUÍCOLA PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

### **João Miguel Merces Bega<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), Mestre em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela FEIS/UNESP, Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

### **Juliana Cristina Ribeiro Almeida<sup>(2)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Brasil, Mestre em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP).

### **Luan de Souza Leite<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento da EESC/USP.

### **Liliane Lazzari Albertin<sup>(4)</sup>**

Engenheira Química pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP), Doutora em Ciências da Engenharia Ambiental pela USP.

### **Jefferson Nascimento de Oliveira<sup>(5)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP.

### **Tsunao Matsumoto<sup>(6)</sup>**

Engenheiro Civil pela Fundação Valeparaibana de Ensino (FVE), Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida do Trabalhador São Carlense, 400, Laboratório de Biotoxicologia em Águas Continentais e Efluentes (BIOTACE) – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590 – Brasil – Tel.: +55 (16) 3373-9560 – e-mail: joaobega@usp.br.

## RESUMO

O cultivo de peixes e outros organismos aquáticos tem aumentado mundialmente nas últimas décadas, assim como a busca por sistemas alternativos de produção e o tratamento de seus efluentes gerados. O sistema de recirculação aquícola (SRA) é uma solução compacta para a intensa demanda da piscicultura. No entanto, poucas configurações de tecnologias de tratamento foram testadas em SRAs, como, por exemplo, sistemas com reator de biofilme aerado por membrana (MABR). Nesse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do tratamento de efluentes de um SRA, composto por um tanque de cultivo (TC), um decantador de coluna e um MABR, para a produção intensiva de tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*), espécie de peixe mais cultivada no mundo. O desempenho do sistema foi avaliado pelos parâmetros pH, temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido (OD), sólidos totais (ST) e demanda química de oxigênio (DQO). Os valores obtidos de temperatura ( $25,22 \pm 1,88$  °C), pH ( $7,61 \pm 0,33$ ) e OD ( $3,80 \pm 1,30$  mg L<sup>-1</sup>) no TC foram ideais para a sobrevivência das tilápias. Foram obtidas remoções médias de 50% para DQO, 40,5% para turbidez e 11,4% para ST. O sistema avaliado mostrou-se uma alternativa eficaz para reúso de água em SRAs, capaz de manter as características de qualidade da água dentro dos valores recomendados para piscicultura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento de águas residuárias, MABR, decantador de coluna

## INTRODUÇÃO

A aquicultura trata-se de uma atividade primordial para o fornecimento de peixes e produtos da pesca aos seres humanos para obtenção de proteínas de alta qualidade, como nutrientes importantes para uma dieta balanceada, podendo ser praticada em diferentes sistemas de piscicultura, que variam em intensidade, dependendo do fluxo de água (ou reúso) e da densidade de organismos (MATSUMOTO; MAIGUAL-ENRIQUEZ, 2016; MAHMOUD et al., 2021a). A tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*) é a espécie de peixe mais cultivada no mundo em razão da sua



rápida taxa de crescimento, capacidade de resistir a estresses ambientais, bom sabor e elevada resiliência a doenças (AMIN et al., 2019; MAHMOUD et al., 2021b). Ademais, essa espécie pode produzir proteína de alta qualidade a partir de várias fontes de alimentos naturais e artificiais, além de usar resíduos domésticos e orgânicos (FATTAH et al., 2021; FARAG et al., 2021). Em 2019, a produção aquícola global de peixes foi estimada em 87 milhões de toneladas, representando mais da metade do total de peixes consumido por humanos (ASIRI; CHU, 2020). No entanto, a intensificação da aquicultura nas últimas décadas tem resultado em maiores concentrações de nutrientes nos corpos hídricos receptores dos efluentes gerados pela prática (MATSUMOTO; MAIGUAL-ENRIQUEZ, 2016). Atualmente, o consumo de energia elétrica e o crescimento da população mundial colaboram para o aumento da demanda por métodos de tratamento baratos e eficientes.

O sistema de recirculação aquícola (SRA) é um método exclusivo da piscicultura, desenvolvido para superar as deficiências da piscicultura tradicional, especialmente em áreas com disponibilidade limitada de água (ASIRI; CHU, 2020). Em muitos SRAs, até 99% das águas residuárias são recicladas por meio de diferentes dispositivos de purificação (BADIOLA; MENDIOLA; BOSTOCK, 2012). Esse sistema pode ser utilizado tanto em pequena quanto em grande escala em razão da recuperação da qualidade dos efluentes pelo processo de tratamento (MASSER; RAKOCY; LOSORDO, 1999) e da necessidade de uma pequena reposição do volume de água em detrimento da baixa taxa de evaporação (SCHREIRER; MIRZOYAN; SAITO, 2010). Além disso, também oferece benefícios ambientais, uma vez que pode ser empregado em pequenas áreas com alta produção de proteína, contribuindo para a redução de impactos antrópicos negativos no meio ambiente em comparação com o plantio de soja e a pastagem (MAIGUAL-ENRIQUEZ et al., 2019). Por outro lado, suas principais limitações são as despesas de capital e operacionais, que levam à necessidade de uma gestão cuidadosa (BADIOLA; MENDIOLA; BOSTOCK, 2012; MATSUMOTO; MAIGUAL-ENRIQUEZ, 2016).

Durante a produção de peixes no SRA, há acúmulo de resíduos orgânicos (e.g., restos de ração) e metabólicos (e.g., fezes nos tanques de cultivo [TC]) (FATTAH et al., 2021). A digestibilidade da matéria seca dos alimentos é de aproximadamente 75% (i.e., ~ 25% do alimento fornecido se transforma em matéria fecal) (HISANO et al., 2020). A presença e o acúmulo de cargas orgânicas e nitrogenadas dos alimentos não consumidos e os processos metabólicos dos animais em cultivo colaboram para o consumo de oxigênio dissolvido (OD), exercendo um aumento no conteúdo da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e promovendo a produção e o estabelecimento de várias formas nitrogenadas, como, por exemplo, amônia e nitrito, ambas tóxicas para os peixes (MIRZOYAN; TAL; GROSS, 2010; DOLAN; MURPHY; O'HEHIR, 2013). Dessa forma, é necessário implementar um sistema de tratamento de efluentes para manter a água em condições ideais para as espécies de cultivo desejadas. De acordo com Gutierrez-Wing e Malone (2006), a remoção da maioria dos poluentes no SRA ocorre em dispositivos de tratamento biológico (e.g., biorreatores e filtros biológicos). O reator de biofilme aerado por membrana (MABR) apresenta grande potencial de uso em SRAs. Nesse reator, o biofilme é naturalmente imobilizado em uma membrana permeável ao oxigênio para que o oxigênio se difunda através da membrana até o biofilme, promovendo a oxidação de poluentes (SYRON; CASEY, 2008). Um dos desafios do MABR é o controle da espessura do biofilme, pois espessuras elevadas podem dificultar a transferência de oxigênio e substratos para as camadas que compõem o biofilme aderido, o que pode resultar em queda no seu desempenho.

Diferentemente, por exemplo, dos reatores aeróbios de leito fluidizado (BAS) [para maiores detalhes, ver Nicolella, van Loosdrecht e Heijnen (2000)], frequentemente utilizados em SRAs, faltam estudos com a aplicação de MABR em tais sistemas (e.g., FREDDI; MATSUMOTO, 2019). Nesse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do tratamento de efluentes de um SRA composto por um TC e um decantador de coluna (DC) associado a um MABR na produção intensiva de tilápia-do-nilo. Os parâmetros avaliados foram pH, temperatura, OD, DQO, sólidos totais (ST) e turbidez.

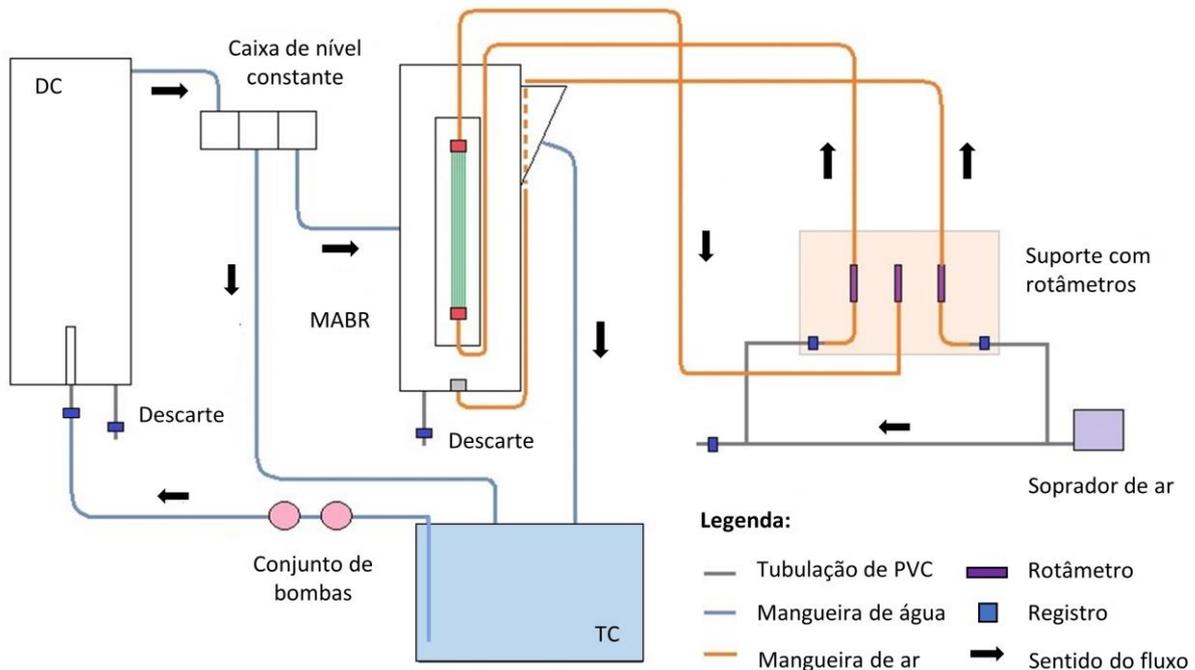
## **METODOLOGIA**

### **SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO AQUÍCOLA**

O aparato experimental consistiu em um TC, um soprador de ar, bombas de recirculação, tubulações, rotâmetros, mangueiras de ar e água, uma caixa de nível constante, um DC e um MABR (Figura 1). O sistema de tratamento foi alimentado com o efluente do SRA e operado de forma contínua por 97 dias.

O TC (800 L) foi utilizado para a produção da tilápia-do-nilo (densidade de estocagem inicial [14,13 kg m<sup>-3</sup>], peso médio [251,13 g], comprimento médio [19,2 cm] e ração [130 g dia<sup>-1</sup> - duas vezes ao dia]). Na parte inferior do TC, um conjunto de bombas de recirculação (Dancor PRATIKA, CP-4R, protetor térmico, 0,5

cv/220V) foi instalado para captar o efluente e recalçá-lo para o DC (vazão média: 400 L h<sup>-1</sup>) a 0,30 m de seu fundo, para não prejudicar a formação da camada de lodo. O DC foi projetado com tubo de PVC (diâmetro [400 mm], altura [2,5 m] e volume [400 L]) para remover sólidos em suspensão (diâmetro ≥ 0,25 mm; velocidade de sedimentação: 3,8 cm s<sup>-1</sup> [fezes da tilápia]). O lodo do DC foi retirado duas vezes ao dia (~ 18 L por vez) e substituído por água deionizada. O excesso do DC foi direcionado para a caixa de nível constante, responsável por distribuir o efluente para o MABR (120 L) (vazão média: 100 L h<sup>-1</sup>) e para o TC.

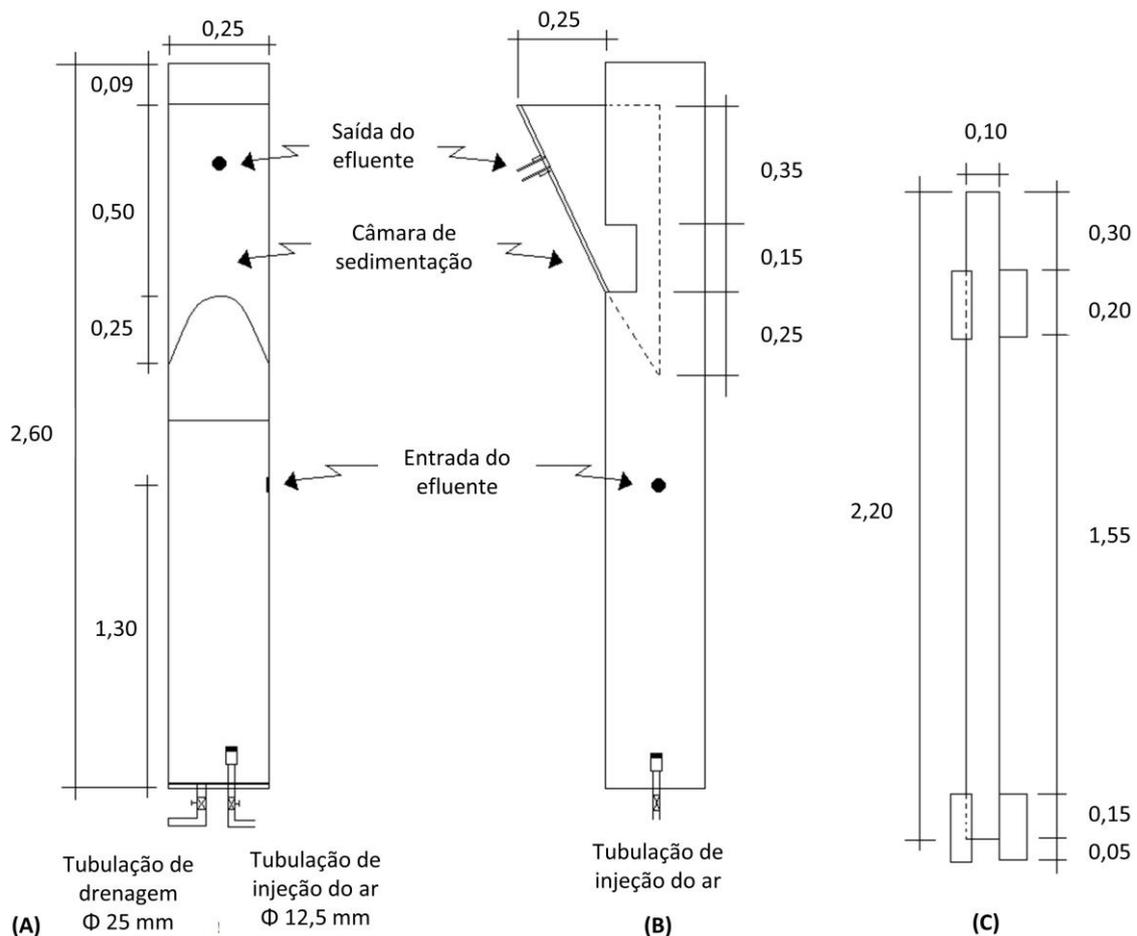


**Figura 1: Esquema do sistema de recirculação aquícola (SRA) usado na presente pesquisa para produção de tilápia-do-nylo. Abreviações: TC, tanque de cultivo; DC, decantador de coluna; MABR, reator de biofilme aerado por membrana.**

O volume total do SRA correspondeu a 1.320 L (TC [800 L], DC [400 L] e MABR [120 L]). Considerando-se a vazão média de operação, o MABR levou aproximadamente 13 h para tratar o volume total de efluente (~ duas renovações diárias).

O MABR foi composto por dois tubos concêntricos de PVC (Figura 2). Os tubos externo e interno tinham 2,6 m e 2,2 m de altura e 250 mm e 100 mm de diâmetro, respectivamente. O reator contou com uma unidade de sedimentação embutida em chapa acrílica (espessura: 10 mm), com saída para o efluente no topo, regulada por um vertedouro de acrílico (3 mm). A aeração no MABR foi realizada por um soprador de ar (THOMAS, AP-80H) em duas linhas de alimentação. Uma linha forneceu ar para o difusor instalado na base do reator (*airlifting*) (vazão de ar [450 L h<sup>-1</sup>] e velocidade de circulação [6,33 cm s<sup>-1</sup>], baseado em testes de recirculação de Silva (2017)) para recirculação interna e controle de espessura do biofilme criado nas membranas. A outra linha forneceu ar para as membranas (vazão de ar: 100 L h<sup>-1</sup>) para difundir oxigênio para os microrganismos aderidos. Em ambas as linhas, foram utilizados rotômetros para controlar os fluxos de ar. O difusor foi confeccionado com uma capa de PVC (diâmetro: 40 mm), perfurada em seis carreiras de 36 furos (diâmetro: ~ 1 mm) cada.

No MABR, foram utilizadas membranas de silicone (tipo fibra oca) e permeáveis ao gás para adesão do biofilme, entregando oxigênio diretamente aos microrganismos do biofilme. Além de densas, não há poros que permitam a formação de bolhas, o que requer menos energia do que sistemas baseados na difusão de oxigênio por meio de bolhas de ar. O feixe de membranas, disposto dentro do tubo interno, continha 550 fios (altura [110 cm], diâmetro externo [0,5 mm] e área total [0,95 m<sup>2</sup>]). A extremidade inferior do feixe foi conectada a uma mangueira de ar, enquanto a superior, a um tubo de PVC para direcionar o excesso de ar para fora do MABR.



**Figura 2:** Vista frontal (A) e lateral (B) do tubo externo e da câmara de decantação com vertedouro e vista frontal (C) do tubo interno. Nota: medidas em m [sem escala].

## CULTIVO DE MICRORGANISMOS NITRIFICANTES

Antes da operação do sistema de tratamento, foi necessário cultivar microrganismos nitrificantes nas membranas em laboratório. O cultivo foi realizado em um recipiente de 20 L com água deionizada e nutrientes nas seguintes concentrações: fosfato dissódico ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) ( $1.390 \text{ mg L}^{-1}$ ), fosfato monopotássico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ( $670 \text{ mg L}^{-1}$ ), sulfato de magnésio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ( $250 \text{ mg L}^{-1}$ ), cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) ( $15 \text{ mg L}^{-1}$ ), sulfato de manganês ( $\text{MnSO}_4$ ) ( $25 \text{ mg L}^{-1}$ ), cloreto de ferro ( $\text{FeCl}_3$ ) ( $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ ) e cloreto de amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) ( $80 \text{ mg L}^{-1}$ ) (Jácome et al., 2006). Tais nutrientes foram adicionados ao reator de cultura a cada três dias, período necessário para a nitrificação completa (von Sperling; Verbyla; Oliveira, 2020). Nesse caso, é possível garantir que o biofilme aderido às membranas seja composto apenas por essas bactérias, facilitando a oxidação conjunta de matéria orgânica carbonácea e amônia (TERADA et al., 2006). Silva (2017) estimou 30 dias para o crescimento de agentes nitrificantes na superfície das membranas, período em que as membranas em nosso estudo foram expostas a nutrientes ricos em amônia e receberam ar internamente a uma vazão de  $100 \text{ L h}^{-1}$ .

## PARÂMETROS E FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

Para avaliar o desempenho do tratamento proposto, foram analisados os seguintes parâmetros em suas respectivas frequências de amostragem: pH, temperatura, OD, DQO, ST e turbidez (Tabela 1). As análises foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). O pH e a temperatura foram medidos no TC, enquanto os outros parâmetros, em três pontos amostrais: saída do TC (STC), saída do DC (SDC) e saída do MABR (SMABR).

**Tabela 1: Parâmetros monitorados, frequência de amostragem e métodos e/ou equipamentos utilizados nas análises.**

PARÂMETROS	MÉTODO E/OU EQUIPAMENTO	FREQUÊNCIA
pH	pHmetro portátil digital (Hanna Instruments)	Diária
Temperatura	Oxímetro digital portátil (Modelo: MO-900) (Hanna Instruments)	
OD		
Turbidez	Turbidímetro	
DQO	Refluxo Fechado (Método: 5220 D)	Duas vezes por semana
ST	Gravimétrico	Semanal

## ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram analisados descritivamente por meio do cálculo das medianas, mínimos, máximos e desvio padrão. Gráficos *boxplot* foram utilizados para análise visual da dispersão do conjunto de dados para cada parâmetro e também foram calculadas suas eficiências de remoção no DC, no MABR e no SRA. Como os dados não apresentaram distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk) ( $p > 0,05$ ), o teste de Kruskal-Wallis, com post-hoc de Dunn, foi utilizado para identificar diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre os pontos amostrais (*i.e.*, SCT, SDC e SMABR). As análises estatísticas foram realizadas no *software* MicroCal OriginLab (OriginLab Corporation, Northampton, EUA).

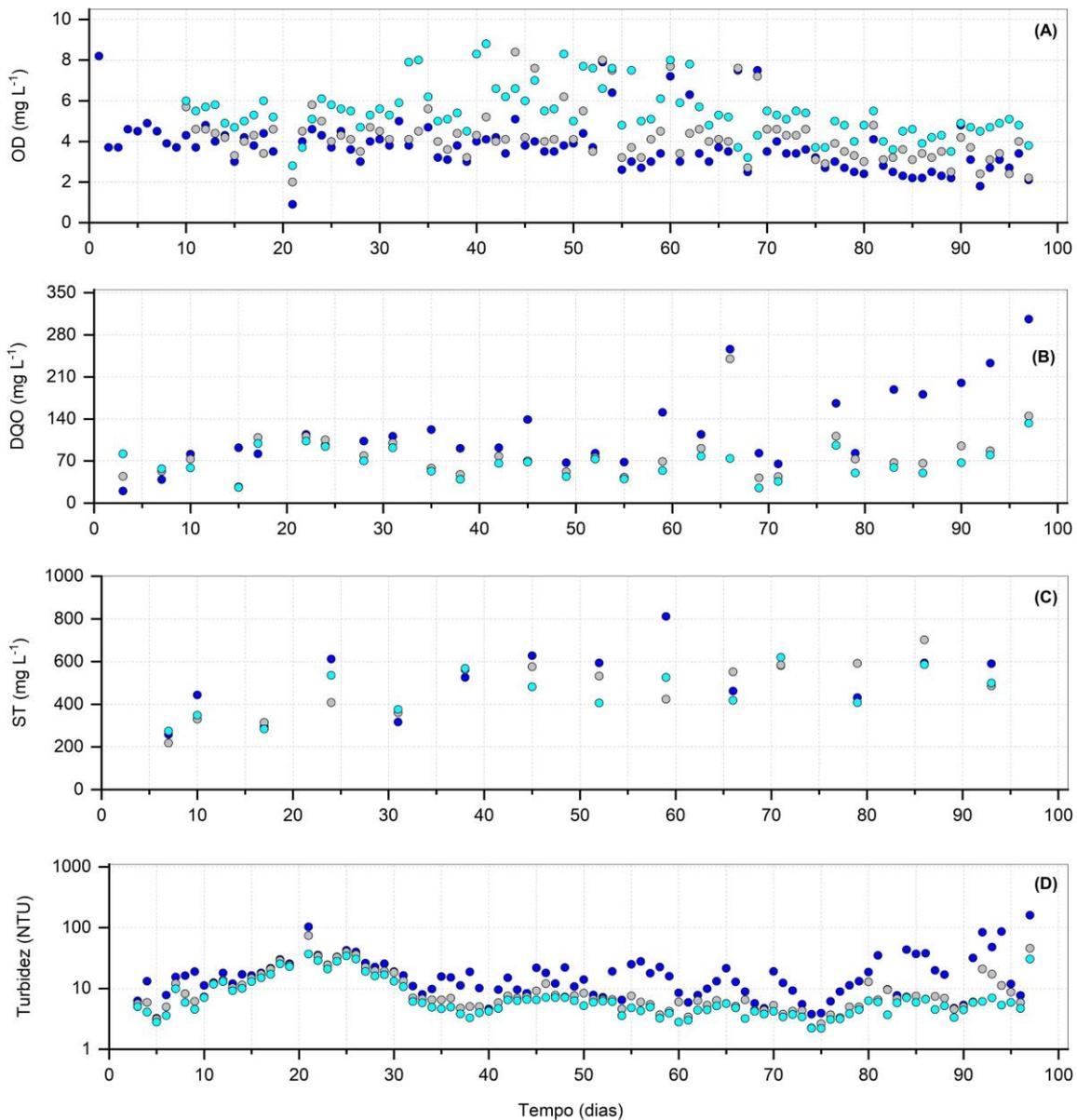
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O formato “mínimo - máximo (mediana  $\pm$  desvio padrão)” foi utilizado para apresentar os resultados. No TC, os valores de pH variaram de 6,8 - 8,3 ( $7,61 \pm 0,33$ ) ao longo dos 97 dias de operação do SRA, estando de acordo com a faixa recomendada para o cultivo da tilápia-do-nylo (6,8 - 8,5) (Kubitza, 2000) e ideal para o crescimento de microrganismos essenciais para o sistema de tratamento empregado (processo de nitrificação: 6,8 - 8,0) (Masser; Rakocy; Losordo, 1999). Fatah et al. (2021) relataram valores de pH semelhantes em um TC com tilápia-do-nylo utilizado para inferir a influência da frequência alimentar dos peixes. Por sua vez, a temperatura da água esteve entre 19,4 - 30,0 °C ( $25,22 \pm 1,88$  °C). Em alguns dias, um aquecedor foi utilizado para manter a temperatura da água acima de 20,0 °C dentro do TC para preservar o metabolismo dos peixes (Kubitza, 2000) e prevenir o estresse térmico nos animais (Maigual-Enriquez et al., 2019).

Os valores de OD, DQO, ST e turbidez obtidos nos pontos amostrais (STC, SDC e SMABR) ao longo dos 97 dias de experimento estão apresentados nas Figuras 3 e 4. As concentrações de OD estiveram entre 0,9 - 8,2 ( $3,8 \pm 1,3$ ) (STC), entre 2,0 - 8,4 ( $4,3 \pm 1,3$ ) (SDC) e entre 2,8 - 8,8 mg L<sup>-1</sup> ( $5,4 \pm 1,3$  mg L<sup>-1</sup>) (SMABR) (Figuras 3A e 4A). O OD foi monitorado apenas na STC durante os nove primeiros dias devido a problemas técnicos. No geral, as concentrações de OD forneceram condições ideais para a respiração e sobrevivência das tilápias, acima dos níveis mínimos recomendados por Krause et al. (2006) e Popma e Masser (1999) (3,5 - 6,0 mg L<sup>-1</sup>). No entanto, no 21º dia, houve diminuição das concentrações de OD por falha na bomba de recirculação, resultando na perda de oito tilápias por déficit de oxigênio (FATTAH et al., 2021). Posteriormente, uma linha extra de aeração foi instalada dentro do TC, mantida pelo restante do período experimental. As concentrações de OD no MABR foram significativamente maiores ( $p < 0,05$ ) do que as obtidas no TC, inferindo que o sistema de dupla aeração foi eficiente na difusão de oxigênio tanto pelas membranas quanto pelo difusor de recirculação do MABR para o SRA.

Nos últimos anos, trabalhos publicados sobre tratamento de águas residuárias na aquicultura têm focado, sobretudo, em compostos nitrogenados. No entanto, alguns estudos têm apresentado o desempenho do tratamento de efluentes em SRAs em termos da remoção de DQO. Nos pontos amostrais STC, SDC e SMABR, as concentrações de DQO variaram de 20,0 - 306,0 ( $122,41 \pm 66,55$ ), de 27,0 - 240,0 ( $80,57 \pm 41,25$ ) e de 25,0 - 133,0 mg L<sup>-1</sup> ( $66,68 \pm 25,15$  mg L<sup>-1</sup>), respectivamente (Figuras 3B e 4B). Tais valores indicaram regularidade no comportamento, *i.e.*, maiores concentrações de DQO no TC ( $p < 0,05$ ) e menores no DC e no MABR. A Tabela 2 apresenta os percentuais de remoção (mínimo, máximo e médio) obtidos em nosso experimento para os parâmetros avaliados. Em relação à DQO, a remoção média no SRA foi de 40,5%, inferior às remoções relatadas por Sánchez-Ortiz e Matsumoto (2012) (77%) e Matsumoto e Maigual-Enriquez (2016) (64,9%) para SRAs compostas por um DC associado a um BAS-CT. Visvanathan, Hung e Jegatheesan (2008) quantificaram remoções de DQO entre 80% e 90% para um reator de membrana (MBR) com tempo de

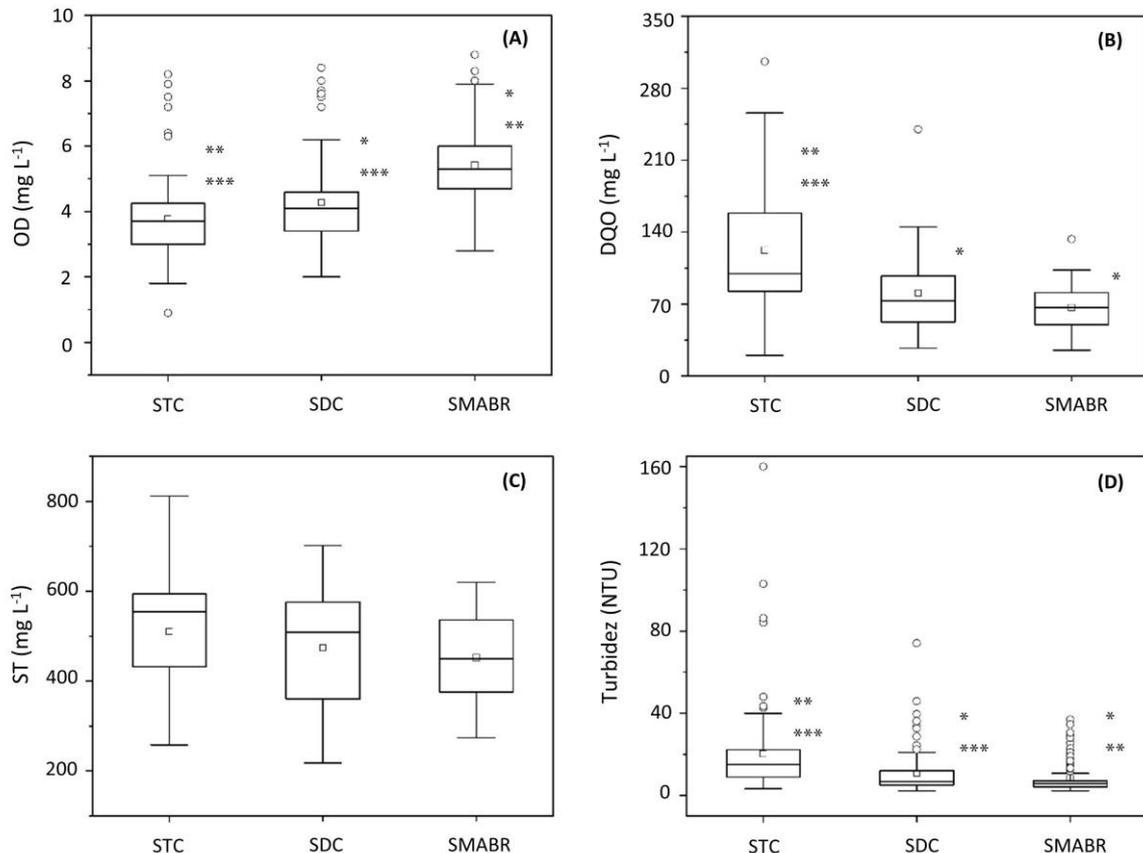
retenção hidráulica de 2 a 9 h. Em nosso estudo, a remoção média de DQO no MABR foi de 15,4%, considerada baixa, além de ser mais cara em comparação com o BAS-CT.



**Figura 3: Valores de (A) oxigênio dissolvido (OD), (B) demanda química de oxigênio (DQO), (C) sólidos totais (ST) e (D) turbidez obtidos ao longo dos 97 dias do experimento no sistema de recirculação aquícola (RAS) nas saídas do tanque de cultivo (STC) (azul), do decantador de coluna (DC) (cinza) e do reator de biofilme aerado por membrana (MABR) (ciano). Abreviações: NTU, unidade de turbidez nefelométrica.**

As concentrações de ST estiveram entre 258,0 - 812,0 ( $510,29 \pm 152,42$ ) (STC), entre 218,0 - 702,0 ( $474,29 \pm 135,16$ ) (SDC) e entre 274,0 a 620,0  $\text{mg L}^{-1}$  ( $452,29 \pm 109,22 \text{ mg L}^{-1}$ ) (SMABR) (Figuras 3C e 4C). Não houve diferença significativa entre as concentrações médias de remoção de ST no TC em comparação com o DC e o MABR ( $p > 0,05$ ) (Figura 4C). Além disso, as eficiências médias de remoção de ST foram de 11,3% (DC), 8,7% (MABR) e 8,4% (SRA) (Tabela 2). A baixa remoção de ST no SRA pode ser devido à quebra de partículas na passagem do efluente pela bomba do TC para o DC. Provavelmente, as partículas sólidas mais finas tiveram dificuldade de sedimentação e foram carregadas para o MABR, o que pode justificar a baixa eficiência de remoção de DQO dentro do biorreator. Em relação à turbidez, os valores durante o período experimental ficaram entre 3,2 -

160,0 ( $20,4 \pm 21,8$ ) (STC), entre 2,2 - 74,1 ( $11,0 \pm 10,8$ ) (SDC) e entre 2,2 - 36,9 NTU ( $8,6 \pm 7,7$  NTU) (SMABR) (Figuras 3D e 4D), inofensivos às tilápias. A média de remoção de turbidez no SRA foi de 50% [DC (38,4%) e MABR (19,6%)] (Tabela 2).



**Figura 4: Boxplots dos parâmetros (A) oxigênio dissolvido (OD), (B) demanda química de oxigênio (DQO), (C) sólidos totais (ST) e (D) turbidez nas saídas do tanque de cultivo (STC), do decantador de coluna (SDC) e do reator de biofilme aerado por membrana (SMABR). Valores de mínimo, máximo, mediana e outliers são apresentados para cada caso, assim como os quartis inferior (25%) e superior (75%); \*, \*\* e \*\*\* indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) dos dados observados comparados com os pontos amostrais STC, SDC e SMABR, respectivamente. Abreviações: NTU, unidade de turbidez nefelométrica.**

Unidades de tratamento adicionais para remoção de sólidos suspensos podem melhorar o desempenho de SRAs em escala real. A remoção rápida e eficiente de partículas pode, entre outros benefícios, reduzir significativamente a demanda biológica e aumentar a nitrificação no biorreator. Métodos e processos que aumentam a remoção de sólidos (*e.g.*, gravitacional e filtração) também podem auxiliar na melhora da qualidade da água, o que pode, potencialmente, aumentar a produção da espécie em cultivo. Stechey e Trudeel (1990) obtiveram redução nas concentrações de sólidos suspensos após o tratamento de efluentes aquícolas em bacias de decantação. Os autores destacaram que, embora a eficiência total de remoção de sólidos suspensos observada tenha sido significativamente baixa (15,5 – 31,7%), sistemas de decantação projetados e operados adequadamente poderiam alcançar eficiências de remoção próximas a 90%.

Por mais que o presente trabalho tenha apresentado informações importantes para os pesquisadores da aquicultura sobre o uso do MABR em SRAs, estudos futuros são recomendados. Com base nos nossos resultados, sugerimos: (a) avaliar um outro tipo de DC para que a remoção de ST apresente valores mais promissores; (b) analisar o tratamento de efluentes no DC com uma menor vazão de entrada; e (c) realizar estudos microbiológicos em diferentes etapas do processo de tratamento para avaliar as características e o crescimento dos microrganismos presentes no biofilme.



**Tabela 2: Eficiências de remoção máxima (máx.), mínima (mín.) e média ( $\pm$  desvio padrão) obtidas no decantador de coluna (DC), no reator de biofilme aerado por membrana (MABR) e no sistema de recirculação aquícola (SRA) para os parâmetros monitorados.**

PARÂMETROS	DC (%)			MABR (%)			SRA (%)		
	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média	mín.	máx.	média
DQO	0,0	70,7	30,5 $\pm$ 23,7	0,0	69,2	15,4 $\pm$ 14,2	0,0	72,4	40,5 $\pm$ 24,8
ST	0,0	47,8	11,3 $\pm$ 15,2	0,0	31,1	8,7 $\pm$ 11,4	0,0	35,2	11,4 $\pm$ 12,3
Turbidez	1,2	87,0	38,4 $\pm$ 26,1	0,6	70,8	19,6 $\pm$ 14,8	5,6	93,8	50,0 $\pm$ 24,1

## CONCLUSÕES

Os valores de temperatura, pH e OD, dentro do TC, foram compatíveis com os recomendados para a sobrevivência da tilápia-do-nylo. Ademais, o sistema de aeração dupla foi eficiente na difusão de oxigênio tanto pelas membranas quanto pelo difusor de recirculação do MABR para o SRA, essencial para a manutenção de elevadas concentrações de OD. Todos os parâmetros monitorados apresentaram eficiência de remoção positiva, indicando que o SRA com MABR é uma alternativa eficaz para o reúso de água, capaz de manter as características de qualidade da água dentro dos valores recomendados para piscicultura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMIN, A., EL ASELY, A., ABD EL-NABY, A.S. et al. *Growth performance, intestinal histomorphology and growth-related gene expression in response to dietary Ziziphus mauritiana in Nile tilapia (Oreochromis niloticus)*. *Aquaculture*, v. 512, 734301, 2019.
2. APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington: American Water Works Association, 2017.
3. ASIRI, F., CHU, K.H. *A Novel Recirculating Aquaculture System for Sustainable Aquaculture: Enabling Wastewater Reuse and Conversion of Waste-to-Immune-Stimulating Fish Feed*. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 8, p. 18094–18105, 2020.
4. BADIOLA, M., MENDIOLA, D., BOSTOCK, J. *Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges*. *Aquacultural Engineering*, v. 51, p. 26–35, 2012.
5. DOLAN, E., MURPHY, N., O'HEHIR, M. *Factors influencing optimal micro-screen drum filter selection for recirculating aquaculture systems*. *Aquacultural Engineering*, v. 56, p. 42–50, 2013.
6. FARAG, M.R., MAHMOUD, H.K., EL-SAYED, S.A.A. et al. *Neurobehavioral, physiological and inflammatory impairments in response to bifenthrin intoxication in Oreochromis niloticus fish: Role of dietary supplementation with Petroselinum crispum essential oil*. *Aquat Toxicol*, v. 231, 2021.
7. FATTAH, A.F.A., AHMED, F.A., SAID, E.N. et al. *Impact of feeding system on the behaviour and performance of Nile tilapia (Oreochromis niloticus)*. *Aquaculture*, v. 538, 736514, 2021.
8. FREDDI, L.A., MATSUMOTO, T. *Análise da remoção de nitrogênio de um reator de biofilme aerado em membrana*. Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental. Natal: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2019.
9. GUTIERREZ-WING, M.T., MALONE, R.F. *Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications*. *Aquacultural Engineering*, v. 34, p. 163–171, 2006.
10. HISANO, H., PINHEIRO, V.R., LOSEKANN, M.E. et al. *Effect of feeding frequency on water quality, growth, and hematological parameters of Nile tilapia Oreochromis niloticus reared using biofloc technology*. *Journal of Applied Aquaculture*, v. 33, p. 96–110, 2020.



11. JÁCOME, A., MOLINA., J, SUÁREZ., J. et al. *Simultaneous Removal of Organic Matter and Nitrogen Compounds in Autoaerated Biofilms. Journal of Environmental Engineering*, v. 132, p. 1255–1263, 2006.
12. KRAUSE, J., KUZAN, D., DEFRANK, M. et al. Design guide for recirculating aquaculture system. Rowan University, 2006.
13. KUBITZA, F. Tilápias: Parte I. Panorama da aquicultura. 59ª ed. Rio de Janeiro, p. 44-53, 2000.
14. MAHMOUD, H.K., REDA, F.M., ALAGAWANY, M. et al. *Ameliorating deleterious effects of high stocking density on Oreochromis niloticus using natural and biological feed additives. Aquaculture*, v. 531, 735900, 2021a.
15. MAHMOUD, H.K., REDA, F.M., ALAGAWANY, M. et al. *The stress of abamectin toxicity reduced water quality, growth performance, immunity and antioxidant capacity of Oreochromis niloticus fish: Modulatory role of Simmondsia chinensis extract as a dietary supplement. Aquaculture*, v. 534, 736247, 2021b.
16. MAIGUAL-ENRIQUEZ, Y.A., MAIA, A.A.D., GUERRERO-ROMERO, C.L. et al. *Comparison of sludges produced from two different recirculating aquaculture systems (RAS) for recycle and disposal. Aquaculture*, v. 502, p. 87–96, 2019.
17. MASSER, M.P., RAKOCY, J., LOSORDO, T.M. Recirculating aquaculture tank production systems: Management of Recirculating Systems. 1999.
18. MATSUMOTO, T., ENRIQUEZ, Y.A.M. *Eficiência na remoção de NAT, DBO e DQO utilizando reator aeróbio de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos associado ao decantador de coluna em uma produção intensiva de tilápia. Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, p. 609–614, 2016.
19. MIRZOYAN, N., TAL, Y., GROSS, A. *Anaerobic digestion of sludge from intensive recirculating aquaculture systems: Review. Aquaculture*, v. 306, p. 1–6, 2010.
20. NICOLELLA, C., VAN LOOSDRECHT, M.C.M., HEIJNEN, J.J. *Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. Journal of Biotechnology*, v. 80, p. 1–33, 2000.
21. POPMA, T., MASSER, M. Tilapia life history and biology. 1999.
22. SÁNCHEZ-ORTIZ. I.A., MATSUMOTO, T. *Hydrodynamic characterization and performance evaluation of an aerobic three phase airlift fluidized bed reactor in a recirculation aquaculture system for Nile Tilapia production. Aquacultural Engineering*, v. 47, p. 16–26, 2012.
23. SCHREIER, H.J., MIRZOYAN, N., SAITO, K. *Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systems. Current Opinion in Biotechnology*, v. 21, p. 318–325, 2010.
24. SILVA, T.S. Efeitos da velocidade de recirculação em reator de biofilme aerado em membranas em batelada sequencial na remoção de nutrientes e carbono orgânico de esgoto doméstico. Faculdade de Engenharia Civil-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2017.
25. STECHEY, D., TRUDELL, Y. Aquaculture wastewater treatment: Wastewater characterization and development of appropriate treatment technologies for the Ontario trout production industry. Ontario, 1990.
26. SYRON, E., CASEY, E. *Membrane-aerated biofilms for high rate biotreatment: Performance appraisal, engineering principles, scale-up, and development requirements. Environmental Science and Technology*, v. 42, p. 1833–1844, 2008.
27. TERADA, A., YAMAMOTO, T., TSUNEDA, S. et al. *Sequencing batch membrane biofilm reactor for simultaneous nitrogen and phosphorus removal: novel application of membrane-aerated biofilm. Biotechnol Bioeng*, v. 94, p. 730–739, 2006.

28. VISVANATHAN, C., HUNG, N.Q., JEGATHEESAN, V. *Hydrogenotrophic denitrification of synthetic aquaculture wastewater using membrane bioreactor. Process Biochemistry*, v. 43, p. 673–682, 2008.
29. VON SPERLING, M., VERBYLA, M.E., OLIVEIRA, S.M.A. *Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners*. London: IWA Publishing, 2020.