

Arthur Carvalho Martins

Ata de apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso
Título: Avaliação da Eficiência de Remoção de Fósforo em Sistema de Recirculação Aquícola

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao 2º semestre letivo 2025 de Ciências Biológicas, da Universidade Federal de Juiz de Fora, no Instituto de Ciências Biológicas, dentro do currículo de Bacharel em Ciências Biológicas, orientado pelo professor Dr. Nathan Oliveira Barros e comitê formado por:

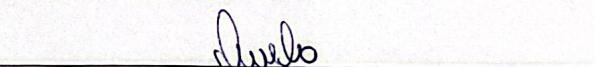
Dr. Nathan Oliveira Barros - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Aprovada em 19 de outubro de 2025

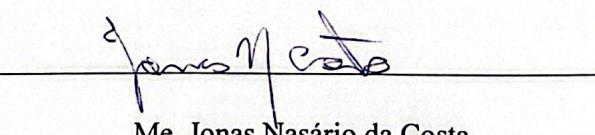
BANCA EXAMINADORA



Dr. Nathan Oliveira Barros - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Me. Anderson Machado de Melo Junior
Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Jaboticabal



Me. Jonas Nasário da Costa
Universidade Federal de Juiz de Fora

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE FÓSFORO EM SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO AQUÍCOLA

Arthur Carvalho Martins*

Nathan Oliveira Barros**

RESUMO

A aquicultura intensiva é uma atividade em constante expansão ao redor do mundo. Contudo, essa expansão pode causar o aumento de impactos ambientais. Nesse contexto, destaca-se a liberação descontrolada de nutrientes ao ambiente, como o fósforo (P). Os sistemas de recirculação aquícola (RAS) surgem como uma alternativa sustentável, por reduzirem o consumo de água e permitirem o tratamento interno dos efluentes por meio de biofiltros e macrófitas aquáticas. Com esse estudo, objetiva-se quantificar o balanço de fósforo em um RAS destinado ao cultivo de tilápias-do-nilo (*Oreochromis niloticus*), avaliando sua distribuição nos tanques de cultivo e compartimentos do biofiltro ao longo de um ciclo produtivo de oito meses. Foram realizadas coletas mensais de água para determinação do fósforo total (PT) por método colorimétrico, além de cálculos de acúmulo e balanço de fósforo no sistema. Os resultados indicaram que a maior parte do fósforo permaneceu retida no próprio RAS, concentrando-se principalmente nos compartimentos do biofiltro e, em menor escala, nos tanques de cultivo, enquanto uma fração foi direcionada para rotas não monitoradas, como sedimentos e assimilação por macrófitas do biofiltro. A eficiência global de remoção de fósforo pelo biofiltro foi de 24%, com maior retenção nos compartimentos iniciais do sistema de tratamento. Conclui-se que a utilização de biofiltros com macrófitas em RAS contribui para a mitigação da carga de fósforo em efluentes aquícolas, promovendo maior sustentabilidade na produção intensiva de tilápias.

*Discente. Universidade Federal de Juiz de Fora, Graduando em Ciências Biológicas. Universidade Federal de Juiz de Fora. E-mail: arthurcarvalho.martins@estudante.ufjf.br

**Docente. Universidade Federal de Juiz de Fora. Doutor em Ecologia. Universidade Federal de Juiz de Fora. E-mail: nathan.barros@ufjf.br

Palavras-chave: Macrófitas aquáticas; efluentes aquícolas; balanço de nutrientes; biofiltro.

1 INTRODUÇÃO

A aquicultura consolidou-se como uma das atividades de produção de alimentos que mais cresce globalmente, desempenhando papel fundamental na segurança alimentar ao fornecer proteínas de alta qualidade para uma população mundial em expansão. Mais da metade do pescado consumido atualmente provém da aquicultura, com tendência de intensificação diante da superexploração dos estoques pesqueiros e da crescente demanda por alimentos (FAO, 2022). Apesar de seu potencial, o rápido avanço da aquicultura intensiva impõe desafios ambientais relevantes, sobretudo relacionados à gestão dos efluentes ricos em nutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P). A liberação excessiva desses elementos em corpos hídricos pode desencadear processos de eutrofização, promover a proliferação de algas nocivas e causar déficit de oxigênio dissolvido, comprometendo a integridade dos ecossistemas aquáticos e a própria sustentabilidade da produção (OSTI et al., 2018).

O fósforo (P) é um nutriente essencial para organismos aquáticos, mas quando liberado em excesso nos ecossistemas pode desencadear a eutrofização, caracterizada por proliferação de algas, zonas hipóxicas e degradação da qualidade da água (YOGEV et al., 2020). Na aquicultura intensiva, apenas uma fração do fósforo presente na ração é assimilada pelos peixes, enquanto o restante é liberado no sistema efluente, contribuindo para a carga de nutrientes em corpos hídricos receptores (FLO et al., 2024). Tal cenário evidencia a necessidade de tecnologias que conciliem elevada produtividade com mitigação dos impactos ambientais, otimizando o uso da água e dos nutrientes.

Nesse contexto, os Sistemas de Recirculação Aquícola (RAS, do inglês *Recirculating Aquaculture Systems*) surgem como uma alternativa inovadora e sustentável, capazes de recircular até 99% da água utilizada, reduzindo significativamente a captação de recursos hídricos externos e minimizando a descarga de efluentes (MARTINS et al., 2010). Os RAS combinam tanques de cultivo com módulos integrados de tratamento, onde processos físicos, químicos e biológicos atuam para manter a qualidade da água. O biofiltro é um componente essencial nesse processo, realizando a purificação biológica por meio da conversão de compostos nitrogenados tóxicos, como amônia (NH_3) e nitrito (NO_2^-), em nitrato (NO_3^-), menos prejudicial. Essa etapa garante a manutenção da qualidade da água, favorece o bem-estar animal e contribui para a redução do impacto ambiental, ao minimizar a liberação de nutrientes nos corpos d'água. Biofiltros eficientes aumentam a sustentabilidade dos RAS,

possibilitando menor renovação de água e controle parcial de nutrientes como o fósforo (FLO et al., 2024). Dessa forma, os RAS não apenas permitem o reuso da água, mas também potencializam a reciclagem de nutrientes, contribuindo para a mitigação de impactos ambientais e agregando valor à produção.

Além do papel microbiano, os biofiltros podem ser associados a macrófitas aquáticas, que atuam como filtros biológicos complementares. Essas plantas auxiliam na remoção de nutrientes, favorecem a clarificação da água e criam micro-habitats na rizosfera, que estimulam comunidades microbianas capazes de potencializar a nitrificação e a assimilação de fósforo. A presença de macrófitas também promove maior estabilidade ecológica no sistema, ao competir com algas por nutrientes e reduzir o risco de desequilíbrios ambientais (NG e CHAN, 2021).

Dessa forma, torna-se essencial compreender de forma detalhada a dinâmica do fósforo nos sistemas de recirculação, desde sua entrada pela alimentação, passando pela retenção na biomassa e acúmulo em biofiltros, até as possíveis perdas para o meio ambiente. Este conhecimento é fundamental para aprimorar o manejo da qualidade da água, aumentar a eficiência alimentar e minimizar os impactos ambientais associados à aquicultura intensiva. Assim, objetiva-se quantificar o balanço de fósforo em um sistema de recirculação aquícola para tilápias-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*), avaliando sua distribuição nos tanques de cultivo e compartimentos do biofiltro, bem como a eficiência global na mitigação dos impactos ambientais ao longo do ciclo produtivo. Por meio de análises periódicas de fósforo total na água, determinação do nutriente retido na biomassa e cálculos de balanço, espera-se fornecer informações relevantes para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes e sustentáveis na produção aquícola.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

2.1.1 Local da pesquisa

A pesquisa foi conduzida em uma piscicultura com sistema de recirculação aquícola (RAS), localizada no município de Além Paraíba, Minas Gerais, sudeste do Brasil (21.761421°S; 42.737034°O). O sistema de cultivo adotado era intensivo, com produção exclusiva de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*), da linhagem *Genetically Improved Farmed Tilapia* (GIFT). Os peixes foram mantidos em tanques suspensos circulares

revestidos com geomembrana, com 9,76 m de diâmetro e 1,28 m de altura, cada um com capacidade total de 96.000 L. Contudo, o volume operacional utilizado foi de aproximadamente 75.000 L, com profundidade mantida em 1 metro. O sistema contava com seis tanques, cada um equipado com dois aeradores tipo fonte (1,47 kW e 0,37 kW), operando por 14 horas diárias, do final da tarde ao início da manhã, garantindo adequada oxigenação da água.

Para a remoção dos sedimentos (fezes e resíduos de ração), foi instalado um sistema de bombeamento no fundo de cada tanque. A água retirada era direcionada por tubulações subterrâneas até um filtro biológico (biofiltro), onde ocorria o tratamento antes do reuso. O bombeamento era alimentado por sistema de energia solar. O filtro biológico da piscicultura possuía uma área total de 160,82 m² e era constituído por área alagada construída em alvenaria, subdividida em seis compartimentos sequenciais, cada um com diferentes características de filtragem. A filtração biológica era realizada por meio da ação conjunta de plantas aquáticas e microrganismos, cuja densidade variava naturalmente ao longo do ciclo de produção. A presença e o desenvolvimento das plantas em cada compartimento foram observados visualmente durante as campanhas de coleta.

O primeiro compartimento (21,39 m²) recebia a água com elevada carga orgânica e realizava a filtragem inicial com pedras marroadas no fundo e plantas flutuantes (*Lemna minor* e *Pistia stratiotes L.*) na superfície. Os compartimentos seguintes, segundo (10,22 m²), terceiro (10,8 m²) e quarto (12,56 m²), eram ocupados exclusivamente por *Pistia stratiotes L.*, enquanto o quinto compartimento (49,64 m²) continha apenas *Lemna minor*. O sexto compartimento (56,21 m²) armazenava a água tratada, que era parcialmente recirculada para os tanques de cultivo por meio de tubulações subterrâneas. Embora houvesse recirculação, o sistema era abastecido diariamente com aproximadamente 250.000 L de água proveniente de uma fonte natural existente na propriedade, garantindo a reposição da água consumida por evaporação, drenagem ou absorção. Uma pequena parcela da água tratada também era utilizada na irrigação de uma horta mantida na fazenda.

Entre maio e dezembro de 2023 foram coletadas mensalmente amostras de água em todos os compartimentos do biofiltro, bem como nas entradas e saídas do sistema. A exceção ocorreu no mês de julho, quando não foi possível realizar a coleta do sistema devido a um problema pessoal do produtor no dia agendado, totalizando sete meses de coleta. Entre os meses de agosto e dezembro, também foram realizadas coletas nos tanques de cultivo As

amostras foram acondicionadas em garrafas plásticas de 1 L, mantidas sob refrigeração a 7 °C por até 24 horas antes das análises laboratoriais.

2.1.2 Análise de amostra

A análise de fósforo total (PT) nas amostras de água foi realizada segundo o método colorimétrico do ácido ascórbico, conforme descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Inicialmente, 10 mL de cada amostra, em duplicata, foram pipetados em tubos de vidro para digestão e submetidos à digestão ácida com persulfato de potássio ($K_2S_2O_8$), com o objetivo de converter todas as formas de fósforo (ortofosfatos, polifosfatos e fósforo orgânico) em ortofosfato (PO_4^{3-}). A digestão foi realizada em autoclave, sendo as amostras aquecidas em potência máxima até atingir 1 atm, reduzindo-se em seguida para potência média por 30 minutos. Após o resfriamento, para o desenvolvimento da cor, foi adicionado à amostra digerida o reagente misto constituído por molibdato de amônio $[(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O]$, tartarato de antimônio e potássio $[KSbC_4H_4O_7 \cdot \frac{1}{2}H_2O]$, ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$), preparado no momento do uso. Esse procedimento promoveu a formação do complexo fosfomolibdato-antimônio, reduzido pelo ácido ascórbico à forma azul de molibdênio, cuja intensidade é proporcional à concentração de fósforo. Após a reação, as amostras foram transferidas para tubos Falcon de 15 mL e submetidas à leitura de absorbância em espectrofotômetro a 880 nm. A quantificação foi obtida por meio de curva de calibração construída com padrões de fosfato monopotássico (KH_2PO_4) em concentrações conhecidas, variando de 0,01 a 1,0 mg/L de P.

2.1.3 Quantificação de fósforo no RAS

O cálculo da concentração de fósforo total (PT, mg/L) foi realizado conforme a seguinte equação:

$$PT(\text{mg/L}) = \left(\frac{A_{\text{amostra}} - A_{\text{branco}}}{\text{Inclinação da curva}} \right)$$

Em que:

A_{amostra} = absorbância da amostra;

A_{branco} = absorbância do branco reagente;

Inclinação da curva = coeficiente angular obtido na calibração;

Para a organização e análise dos dados, as concentrações de fósforo foram agrupadas conforme os compartimentos do sistema:

1. Tanques: Calculou-se a média das concentrações obtidas nos seis tanques experimentais, tratados em conjunto como “Tanques”.
2. Biofiltro: Os compartimentos 3 e 4, por apresentarem características de tratamento semelhantes (com a *Pistia stratiotes L.*), tiveram suas concentrações combinadas em uma média única.

Dessa forma, a análise considerou cinco compartimentos distintos, denominados A, B, C, D e E. O acúmulo de fósforo total (PT) em cada compartimento foi obtido por meio do cálculo de intervalos entre coletas sucessivas. Para cada par de amostragens consecutivas, utilizou-se a média aritmética das concentrações e o intervalo de tempo em dias entre as coletas, segundo a seguinte equação:

$$\text{Intervalo} = \frac{(PT_n + PT_{n1})}{2} \times (tn1 - tn)$$

Em que:

PT_n e PT_{n1} = concentrações de Fósforo Total (mg/L) em duas coletas consecutivas.

$tn1 - tn$ = número de dias entre as datas de amostragem consecutivas.

A soma dos valores de todos os intervalos resultou no acúmulo de fósforo total em cada compartimento ao longo do período experimental. Esses valores foram utilizados para avaliar a dinâmica de acúmulo de fósforo no biofiltro e nos tanques, sendo posteriormente convertidos de mg/L para kg considerando o volume de cada compartimento. Para determinar o balanço de fósforo no sistema, foi considerada a entrada de fósforo por meio da ração utilizada (Tilamax®, IRCA Nutrição Animal), cujo teor de fósforo foi obtido a partir de sua formulação nutricional. A proporção de P efetivamente retida na biomassa de peixes em sistemas aquícolas apresenta variações consideráveis em função de fatores como espécie cultivada, manejo alimentar e condições do sistema. Para a tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*), quando alimentada com rações comerciais, estudos indicam que aproximadamente 28% do fósforo ingerido é incorporado à biomassa dos peixes (MONTANHINI-NETO; OSTRENSKY, 2015). As equações aplicadas foram:

$$1. \text{ Entrada de Fósforo} = C \times \frac{T}{1000}$$

$$2. \text{ Fósforo retido no peixe} = \text{Entrada de P} \times r$$

$$3. \text{ Fósforo no sistema} = \text{Entrada de P} - \text{P retido no peixe}$$

$$4. \text{ Fósforo perdido} = \text{P no sistema} - (\text{Pbio} + \text{Ptanque})$$

Em que:

C = Consumo total de ração (kg)

T = Teor de fósforo na ração (g)

P = Fósforo

r = Proporção de fósforo retido no peixe (ex.: 0,28)

P_{bio} = Fósforo acumulado no biofiltro (kg)

P_{tanque} = Fósforo acumulado nos tanques (kg)

Com esse procedimento, foi possível quantificar a entrada, retenção, acúmulo e perda de fósforo no sistema de produção, fornecendo subsídios para avaliar a eficiência de retenção de nutrientes e a carga remanescente no ambiente.

2.1.4 Análise Estatística

Os dados foram inicialmente avaliados quanto à distribuição de normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk utilizando o software JMP® Pro 14 (SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA). Os resultados encontrados indicam que os dados atendem ao pressuposto de normalidade, permitindo a aplicação de testes paramétricos para comparação entre os tratamentos. Dessa forma, para comparar os intervalos entre os cinco compartimentos (A, B, C, D e E), foi realizado teste de Análise de Variância (ANOVA *one-way*). O modelo indicou que não houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos ao nível de significância. Apesar da ausência de diferença geral na ANOVA, foram conduzidas comparações múltiplas pelo teste LSD (Least Significant Difference), para verificar tendências entre pares de médias. Todos os testes estatísticos foram realizados considerando nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

2.2 Resultados

2.2.1 Entrada e destino do fósforo no sistema RAS

Durante o ciclo produtivo monitorado, foram utilizados 15.000 kg de ração com teor médio de 10 g/kg de fósforo, resultando em uma entrada total de 150 kg de fósforo no sistema de recirculação. Desse total, cerca de 28% (42 kg) foram efetivamente retidos na biomassa dos peixes, correspondendo à produção final de 9.150 kg. Os 108 kg remanescentes de fósforo permaneceram no sistema, sendo parcialmente acumulados nos compartimentos físicos e parcialmente perdidos por vias não monitoradas. A análise de distribuição interna do fósforo evidenciou que os tanques de cultivo acumularam 13,88 kg e o biofiltro 23,69 kg, totalizando 37,57 kg retidos fisicamente no sistema. Consequentemente, estima-se que 70,43 kg de fósforo tenham sido removidos por rotas não quantificadas diretamente, como deposição em sedimentos, assimilação por macrófitas ou perdas na água de reposição.

Tabela 1 - Balanço de fósforo no sistema de recirculação ao longo do ciclo produtivo.

Consumo Total de ração (kg)	15000
Produção total de peixe (kg)	9150
Teor de Fósforo na ração (g/kg)	10
Total de Entrada de Fósforo pela ração (kg)	150
Fósforo retido no peixe	28%
Total de Fósforo no peixe (kg)	42
Total Final de Fósforo pela ração no sistema (kg)	108
Total de Fósforo Tanques (kg)	13.88
Total de Fósforo Biofiltro (kg)	23.69
Soma dos sistemas (Biofiltro+Tanques) (kg)	37.57
Fósforo perdido no sistema (kg)	70.43

2.2.2 Remoção absoluta de fósforo pelo biofiltro e tanques

A quantificação do fósforo acumulado evidenciou que os compartimentos do biofiltro foram os principais responsáveis pela retenção do nutriente, com maior concentração nos primeiros compartimentos do fluxo de água. A distribuição do fósforo acumulado, em gramas, foi a seguinte:

Tabela 2 - Distribuição absoluta do fósforo acumulado (g) nos compartimentos do biofiltro e tanques de cultivo.

Compartimento	Fósforo acumulado (g)
Biofiltro A	283,32

Biofiltro B	259,20
Biofiltro C	229,01
Biofiltro D	186,19
Biofiltro E	141,13
Tanques (média)	185,58

Os compartimentos do biofiltro A, B e C apresentaram os maiores acúmulos, superiores a 220 g cada, enquanto os tanques de cultivo retiveram em média 185,58 g por unidade, indicando que parte relevante do fósforo permaneceu depositada no fundo desses compartimentos.

2.2.3 Crescimento e ocupação por macrófitas no biofiltro

A colonização por macrófitas aquáticas variou entre os compartimentos, sendo dominada principalmente por *Pistia* spp., com maior cobertura nos biofiltros B e C (90%), enquanto *Lemna* spp. foi dominante apenas no biofiltro D (100%). O biofiltro E permaneceu sem colonização durante todo o período.

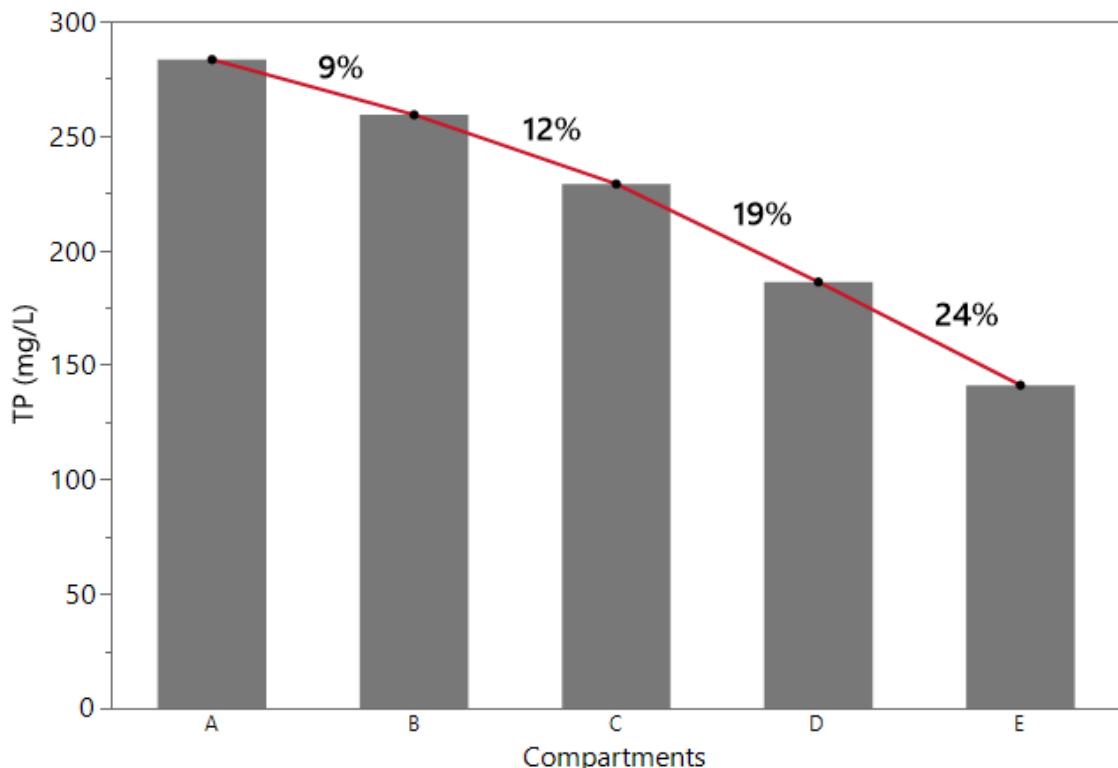
Tabela 3 - Percentual de ocupação superficial por macrófitas aquáticas nos compartimentos do biofiltro A, B, C, D e E durante o ciclo produtivo.

ID Compartimento	<i>Lemna</i> (%)	<i>Pistia</i> (%)	Ocupação total (%)
A	5	75	80
B	10	90	100
C	10	90	100
D	100	0	100
E	0	0	0

2.2.4 Eficiência de remoção de fósforo pelo biofiltro

A eficiência global de remoção de fósforo pelo biofiltro atingiu 24% do total de fósforo inserido no sistema ao longo do ciclo produtivo. Essa eficiência apresentou variações mensais, com maiores valores nos períodos iniciais do cultivo, e reflete a capacidade conjunta de retenção física e assimilação biológica do nutriente nos compartimentos do biofiltro.

Figura 1 - Eficiência mensal de remoção de fósforo (%) pelo biofiltro do sistema de recirculação.



2.2.5 Análise estatística

A concentração média de fósforo total (PT) na água foi de $0,9369 \pm 0,3842$ mg/L, apresentando distribuição próxima à normal, conforme o teste de Shapiro-Wilk ($W = 0,9429$; $p = 0,0684$). A ANOVA *one-way* não identificou diferenças significativas entre os cinco compartimentos do biofiltro ($F(4,25) = 1,8114$; $p = 0,1582$), indicando comportamento semelhante entre os compartimentos. Contudo, o teste LSD revelou diferença significativa apenas entre os compartimentos A e o E ($p = 0,0256$), reforçando que, apesar da uniformidade geral, o compartimento E apresentou desempenho inferior em relação à retenção de fósforo.

Tabela 4 - Resumo estatístico da concentração de fósforo total (PT) e resultados da ANOVA e teste LSD.

Parâmetro	Resultado
Média de PT (mg/L)	0,9369
Desvio-padrão (mg/L)	0,3842
Shapiro-Wilk (W ; p)	0,9429; 0,0684
ANOVA (F ; p)	1,8114; 0,1582
Comparação LSD significativa	Compartimento A × Compartimento E ($p = 0,0256$)
Demais comparações LSD	Não significativas ($p > 0,05$)

2.3 Discussão

A análise da distribuição de fósforo no sistema de recirculação aquícola (RAS) monitorado demonstra que grande parte do nutriente inserido via ração permaneceu no próprio sistema, sendo retida pelos compartimentos do biofiltro, tanques de cultivo ou direcionada para rotas não monitoradas, como sedimentos e macrófitas. Essa retenção parcial é característica de sistemas de recirculação, nos quais o fósforo tende a se acumular principalmente em partículas sólidas e biofilmes microbianos (CRAB et al., 2007). No sistema estudado, aproximadamente 24 % do fósforo total inserido foi retido no biofiltro. Esta retenção está em consonância com os intervalos observados em sistemas RAS convencionais, nos quais a deposição de sólidos finos e o acúmulo de biofilmes microbianos representam os mecanismos predominantes de remoção de nutrientes. Estudos anteriores demonstraram que os biofiltros influenciam diretamente a dinâmica das partículas finas orgânicas, retendo-as e promovendo sua sedimentação ou fixação em estruturas microbianas no meio filtrante, o que está alinhado com a retenção observada no sistema estudado (OSTEROTH et al., 2016).

O acúmulo de fósforo no biofiltro ocorreu de forma heterogênea, com destaque para os módulos A, B e C, que apresentaram os maiores valores absolutos. Essa variação provavelmente está relacionada à dinâmica do fluxo hidráulico e à maior disponibilidade de partículas nos primeiros pontos do biofiltro, favorecendo a colonização por biofilmes microbianos e a sedimentação local. Esses fenômenos são descritos como mecanismos centrais de retenção de nutrientes em sistemas de recirculação (MARTINS et al., 2010). Além da ação do biofiltro, a presença e o desenvolvimento de macrófitas, como *Pistia* spp. e *Lemna* spp., tiveram papel relevante na retenção de fósforo. A cobertura vegetal mais expressiva foi observada nos biofiltros B e C, com predominância de *Pistia* spp., enquanto *Lemna* spp. dominou o biofiltro D. Essas macrófitas absorvem nutrientes dissolvidos e promovem a sedimentação de partículas entre suas raízes, atuando como zonas naturais de polimento. Estudos com efluentes de piscicultura indicam que *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes* podem remover de 82 % a 83,3 % do fósforo total quando corretamente manejadas, especialmente com colheita periódica da biomassa vegetal (HENRY SILVA; CAMARGO, 2006).

De forma semelhante, a integração de macrófitas em RAS contribui para a remoção de fósforo e nitrogênio e possibilita o aproveitamento da biomassa em compostagem ou biofertilizantes, agregando valor ao sistema (ABDEL RAOUF et al., 2012). Quando comparado a outros sistemas de tratamento, o RAS com biofiltro vegetado apresenta

eficiência intermediária. Áreas alagadas construídas (*constructed wetlands*), por exemplo, podem atingir remoções superiores a 70 % de fósforo quando combinam macrófitas com substratos adsorventes ou condições favoráveis à precipitação química (VYMAZAL, 2011). Nesse contexto, o RAS vegetado representa uma alternativa mais simples e de menor custo que, mesmo sem atingir a máxima eficiência, contribui significativamente para reduzir a carga de fósforo nos efluentes e aumentar a sustentabilidade do cultivo.

A análise estatística da concentração de fósforo total (PT) indicou distribuição próxima da normalidade, confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk, validando o uso de métodos paramétricos para avaliar diferenças entre os compartimentos do biofiltro. A ANOVA *one-way* revelou ausência de diferenças significativas na maior parte das comparações, indicando desempenho globalmente homogêneo entre os módulos. Contudo, a diferença identificada entre os biofiltros A e E pelo teste LSD sugere que fatores locais, como variação de fluxo, formação de biofilme ou presença de macrófitas, podem influenciar pontualmente a eficiência de retenção do nutriente. Resultados semelhantes são relatados em sistemas RAS, onde a variação entre compartimentos está mais associada a fatores hidráulicos e microbiológicos do que a diferenças estruturais (MARTINS et al., 2010). Assim, mesmo que a análise estatística não revele diferenças amplas, ela aponta tendências importantes para ajustes operacionais que promovam maior uniformidade no desempenho dos biofiltros.

Em conjunto, os resultados confirmam que biofiltros e macrófitas atuam de forma complementar na retenção de fósforo, contribuindo para a mitigação de impactos ambientais do RAS. Estratégias como otimização do fluxo hidráulico, manutenção periódica do biofilme e colheita regular da biomassa vegetal podem elevar a eficiência do sistema, aproximando-o do desempenho de sistemas mais sofisticados, sem comprometer a simplicidade operacional característica de unidades de recirculação.

3 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que sistemas de recirculação aquícola (RAS), equipados com biofiltros e integrados à presença de macrófitas aquáticas, apresentam desempenho relevante na retenção de fósforo, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais da aquicultura intensiva. Ao longo do ciclo produtivo monitorado, verificou-se que a maior parte do fósforo permaneceu no próprio sistema, sendo retida principalmente no biofiltro e tanques de cultivo, enquanto uma fração foi direcionada para rotas não

monitoradas, como acúmulo em sedimentos ou assimilação por macrófitas. Esses resultados reforçam o papel fundamental dos biofiltros na remoção de nutrientes, atuando tanto na fixação de partículas fosfatadas quanto na promoção de processos microbiológicos essenciais à manutenção da qualidade da água. A distribuição heterogênea do fósforo entre os compartimentos do biofiltro evidenciou a influência do fluxo hidráulico e da disponibilidade de superfícies para colonização microbiana sobre a eficiência de retenção do nutriente. A presença de macrófitas, como *Pistia stratiotes* e *Lemna minor*, contribuiu de forma complementar ao tratamento da água, favorecendo a clarificação, a sedimentação de sólidos e a absorção de fósforo dissolvido. Além disso, as macrófitas auxiliam na estabilidade ecológica do sistema, ao competir com algas por nutrientes e fornecer micro-habitats que estimulam a atividade microbiana nos biofiltros.

Os achados deste estudo indicam que a utilização de RAS com biofiltros vegetados representa uma estratégia eficaz para a redução da carga de fósforo em efluentes aquícolas, com potencial de aumento de eficiência mediante ajustes operacionais. Estratégias como a otimização do fluxo hidráulico, a manutenção periódica do biofilme e a colheita da biomassa vegetal podem elevar ainda mais a eficiência do sistema, aproximando-o do desempenho de sistemas de tratamento mais complexos, sem comprometer a simplicidade operacional do RAS. Dessa forma, conclui-se que a integração de biofiltros e macrófitas em sistemas de recirculação constitui uma solução promissora para a aquicultura sustentável, conciliando produtividade elevada com a mitigação de impactos ambientais. Os resultados obtidos contribuem para o avanço do manejo de nutrientes em piscicultura intensiva, fornecendo subsídios técnicos para o aprimoramento de sistemas de recirculação e para a gestão estratégica da qualidade da água.

REFERÊNCIAS

ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOMAIDAN, A. A.; IBRAHEEM, I. B. M. Microalgae and wastewater treatment. Saudi Journal of Biological Sciences, v. 19, n. 3, p. 257-275, 2012.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA – AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF – WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington, D.C.: APHA, 2017. 1360 p.

CRAB, R. et al. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, v. 277, n. 3-4, p. 125-137, 2007.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Rome: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc0461en/cc0461en.pdf>.

FLO, V. Ø. et al. RAS Designed Diets Result in Lower Accumulation of Nitrogen, Phosphorus, and Zinc in Recirculating Aquaculture System Compared with Traditional Flow Through Designed Diets. *Fishes*, v. 9, n. 8, p. 300, 2024. DOI: 10.3390/fishes9080300.

HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. Efficiency of aquatic macrophytes to treat Nile tilapia pond effluents. *Scientia Agricola*, v. 63, n. 5, p. 433-438, 2006.

MARTINS, C. I. M. et al. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, v. 43, n. 3, p. 83-93, 2010.

MONTANHINI NETO, R.; OSTRENSKY, A. Nutrient load estimation in the waste of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) reared in cages in tropical climate conditions. *Aquaculture Research*, v. 46, n. 6, p. 1309–1322, 2015.

NG, Y. S.; CHAN, D. J. C. The role and effectiveness of monoculture and polyculture phytoremediation systems in fish farm wastewater. *RSC Advances*, v. 11, p. 13853–13866, 2021.

OSTEROTH, R. et al. Influence of fixed and moving bed biofilters on micro particle dynamics in a recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering*, v. 75, p. 35-42, 2016.

OSTI, J. A. S.; MORAES, M. A. B.; CARMO, C. F.; MERCANTE, C. T. J. Nitrogen and phosphorus flux from the production of Nile tilapia through the application of environmental indicators. *Brazilian Journal of Biology*, v. 78, n. 1, p. 25–31, 2018.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. Environmental Science & Technology, v. 45, n. 1, p. 61-69, 2011.

YOGEV, U. et al. Phosphorous recovery from a novel recirculating aquaculture system followed by its sustainable reuse as a fertilizer. Science of the Total Environment, v. 722, art. 137949, 2020.