

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP**

**O uso de lentilha-d'água *Lemna aequinoctialis* na  
alimentação de juvenis de tilápias-do-nilo *Oreochromis  
niloticus* em sistema aquapônico com produção de  
manjeriço *Ocimum basilicum***

**TOMAZ SOLIGO DE MELLO AYRES**

**Jaboticabal, São Paulo**

**2025**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP**

**O uso de lentilha-d'água *Lemna aequinoctialis* na  
alimentação de juvenis de tilápias-do-nilo *Oreochromis  
niloticus* em sistema aquapônico com produção de  
manjeriço *Ocimum basilicum***

**Tomaz Soligo de Mello Ayres**

**Orientadora: Dra. Maria Célia Portella**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Aquicultura  
do Centro de Aquicultura da UNESP - CAUNESP, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Doutor.

**Jaboticabal, São Paulo**

**2025**

A985u Ayres, Tomaz Soligo de Mello  
O uso de lentilha-d'água *Lemna aequinoctialis* na  
alimentação de juvenis de tilápias-do-nilo *Oreochromis niloticus*  
em sistema aquapônico com produção de manjerição *Ocimum  
basilicum* / Tomaz Soligo de Mello Ayres. -- Jaboticabal, 2025  
91 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Centro de Aquicultura da Unesp, Jaboticabal  
Orientadora: Maria Celia Portella

1. Aquicultura. 2. Macrófitas Aquáticas. 3. Peixes  
Alimentação e Ração. 4. Circularidade. I. Título.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: **O uso de lentilha-d'água *Lemna minor* na alimentação de juvenis de tilápias-do-nilo *Oreochromis niloticus* em sistema aquapônico com produção de manjeriço**

**AUTOR: TOMAZ SOLIGO DE MELLO AYRES**

**ORIENTADORA: MARIA CÉLIA PORTELLA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências, área de Aquicultura, pela Comissão Examinadora:


Profa. Dra. MARIA CÉLIA PORTELLA (Participação Virtual)  
Departamento de Biologia / FCAV - Unesp Jaboticabal/SP


Prof. Dr. GUSTAVO DA SILVA CLAUDIANO (Participação Virtual)  
Instituto de Biodiversidade e Floresta / Universidade Federal do Oeste do Pará


Pós Doc. LEONARDO CASTILHO BARROS (Participação Virtual)  
. / Centro de Aquicultura da Unesp, Jaboticabal/SP


Prof. Dr. BRUNNO DA SILVA CEROZI (Participação Virtual)  
Departamento de Zootecnia / Universidade de São Paulo,  
Piracicaba/SP

Prof. Dr. JESAIAS ISMAEL DA COSTA (Participação Virtual)  
Instituto Federal do Amazonas (IFAM) / Manaus/AM

Documento assinado digitalmente  
 **MARIA CELIA PORTELLA**  
Data: 08/08/2025 11:08:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
 **GUSTAVO DA SILVA CLAUDIANO**  
Data: 11/08/2025 09:17:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
 **LEONARDO CASTILHO DE BARROS**  
Data: 11/08/2025 10:02:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
 **JESAIAS ISMAEL DA COSTA**  
Data: 13/08/2025 14:33:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



**Assinado eletronicamente  
Brunno da Silva Cerozi**

Jaboticabal, 01 de agosto de 2025

Centro de Aquicultura - Unidade Complementar - Jaboticabal -  
Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellani, s/nº, 14870000  
<http://www.caunesp.unesp.br/#/pos-graduacao/>



## USPAssina - Autenticação digital de documentos da USP

### Registro de assinatura(s) eletrônica(s)

Este documento foi assinado de forma eletrônica pelos seguintes participantes e sua autenticidade pode ser verificada através do código BLWL-RESZ-J3N1-TMXA no seguinte link:  
<https://portalservicos.usp.br/iddigital/BLWL-RESZ-J3N1-TMXA>

**Brunno da Silva Cerozi**

Nº USP: 5152941

Data: 13/08/2025 15:07

## Sumário

AGRADECIMENTOS .....	4
RESUMO.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS .....	9
INTRODUÇÃO GERAL .....	11
OBJETIVO GERAL.....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
REFERÊNCIAS .....	15
<b>CAPÍTULO I. ....</b>	<b>18</b>
Resumo .....	19
Abstract .....	20
Introdução.....	21
Sistemas aquapônicos .....	22
Lentilha-d'água <i>Lemna minor</i> .....	24
Aplicações de <i>Lemna</i> spp.na aquaponia.....	26
Considerações Finais .....	30
Referências .....	31
<b>CAPÍTULO II. ....</b>	<b>36</b>
Resumo .....	37
Abstract .....	38
Introdução.....	39
Material e métodos .....	43
Resultados.....	55
Discussão.....	71

Conclusão.....	79
Referências .....	81
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, que sempre me ofereceu amor, apoio e incentivo incondicionais. Em especial, à minha mãe, Rosane Maria Soligo de Mello Ayres, por ser minha base, meu exemplo de força e generosidade, e por caminhar ao meu lado em todos os momentos desta jornada.

Expresso minha profunda gratidão à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Célia Portella, pela orientação dedicada, pela confiança depositada em meu trabalho e por todas as oportunidades de crescimento profissional e pessoal ao longo desta caminhada.

Um imenso agradecimento aos amigos de laboratório e equipe, que contribuíram não apenas com conhecimento e auxílio prático nesta pesquisa, mas também com companheirismo e bom humor nos dias desafiadores. Em especial, Hugo Santos, Leonardo Castilho Barros, Lucas Caetano, Caio Green, Hyuri Torres e Yeraldine Pedroza, cuja presença tornou o processo mais leve e enriquecedor.

Sou também grato a toda equipe do Laboratório de Nutrição de Organismos Aquáticos, em especial ao Prof. Dr. Dalton José Carneiro e ao querido Magdiel Santos, pelo apoio técnico, pelas valiosas trocas de conhecimento e pela colaboração direta com aspectos da nutrição e alimentação na aquicultura, fundamentais para o desenvolvimento desta etapa da pesquisa.

Registro um agradecimento especial à Janaina Graça de Oliveira pela incrível competência técnica e as contribuições com análises químicas, bioquímicas e histológicas, ainda agradeço ao seu laboratório Aquapathos pelo apoio técnico e estrutural essencial ao desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço também ao Prof. Dr. Levi Machado Pompermeyer (UNESP, Campus Registro – SP), pela contribuição com a biomassa de macrófitas utilizada no experimento, e ao Prof. Dr. Vitor Fernandes Oliveira de Miranda do Departamento de Biologia– da FCAV/Unesp e responsável pelo Herbário JABU, pela identificação taxonômica da espécie de *Lemna* empregada na pesquisa.

Agradeço ao meu querido amigo Ingo Lourenço Sewaybrick pelos valiosos ensinamentos em Python, programação e hardware, que contribuíram de forma significativa para esta pesquisa e para minha formação pessoal, além da amizade leal e inspiradora.

Reconheço ainda o apoio de todos os professores, técnicos e funcionários do CAUNESP, cuja dedicação e compromisso foram fundamentais para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica.

## **APOIO FINANCEIRO**

Este trabalho contou com apoio financeiro da CAPES, por meio da bolsa de permanência durante o doutorado, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio de projeto nº 406145/2023-7, aprovado na Chamada CNPq/MCTI N° 10/2023 – UNIVERSAL.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

## RESUMO

Este estudo parte da hipótese de que a inclusão de *Lemna aequinoctialis* fresca como suplemento alimentar permite reduzir, de forma controlada, a taxa diária de arraçoamento de juvenis de tilápia-do-nilo, aumentando a eficiência no uso de nutrientes e diminuindo o custo de ração sem comprometer o desempenho dos peixes e a homeostase fisiológica. Além disso, espera-se que essa estratégia intensifique o aporte de nutrientes às plantas e favoreça o crescimento do manjeriço *Ocimum basilicum*. Com base nisso, o estudo teve como objetivo avaliar, em sistemas aquapônicos acoplados, os efeitos do uso de *L. aequinoctialis* na alimentação de juvenis de tilápia-do-nilo *Oreochromis niloticus* associado a níveis decrescentes de arraçoamento sobre o desempenho zootécnico e parâmetros morfo-fisiológicos dos peixes, o crescimento do manjeriço, custo de produção de cada tratamento e determinar a digestibilidade aparente da macrófita. No primeiro capítulo, a revisão mostrou que os estudos com *Lemna* em aquaponia tratam sobretudo de produção e fitorremediação no próprio circuito, de cultivo da macrófita como planta do sistema com foco em rendimento e composição, e de seu uso tanto fresca quanto processada na alimentação dos peixes, com avaliação de níveis de inclusão e respostas de desempenho. Persistem lacunas como testar arranjos completos com lentilha-d'água, peixes e cultivo vegetal integrados, avaliações do uso dietético da macrófita sobre os leitos hidropônicos, comparações com uso de biomassa fresca versus processada e harmonização de métricas e protocolos. Entre os desafios práticos aparecem a variabilidade composicional da biomassa, o manejo para evitar acúmulo de biomassa e o risco de escapes. No segundo capítulo, avaliou-se a suplementação *in natura* de *L. aequinoctialis* associada à redução do arraçoamento em juvenis de tilápia cultivados com manjeriço. Quatro regimes foram testados: controle sem macrófita, com oferta de ração equivalente a 5% do peso vivo por dia, e reduções para 4,25%, 3,5% e 2,75% do peso vivo por dia, com oferta da macrófita até a saciedade aparente nos tratamentos com restrição de ração. O regime de 4,25% manteve o crescimento dos peixes equivalente ao controle, melhorou a conversão alimentar, elevou a produtividade do manjeriço e resultou no menor custo por quilograma de tilápia (R\$ 18,64 ± 0,64) e manjeriço (R\$ 17,66 ± 1,68) produzido ao longo do ciclo completo. A partir de 3,5% por dia, observou-se redução do crescimento dos peixes. Ainda assim, a produção vegetal permaneceu maior no tratamento de 4,25% e 3,5% e significativamente inferior nos grupos 2,75% e controle sem macrófita. A biomassa de *L. aequinoctialis* apresentou 37,5% de proteína bruta, perfil favorável de aminoácidos essenciais (lisina, valina e leucina) e concentrações expressivas de potássio, ferro, manganês e zinco. Os coeficientes de digestibilidade aparente da macrófita para proteína bruta e energia bruta foram de 86,79% e 72,22%, respectivamente. As carcaças dos peixes mantiveram teores semelhantes de proteína, com maior teor de lipídios no tratamento controle. Do ponto de vista fisiológico, a integridade intestinal foi preservada nos tratamentos, com exceção do grupo alimentado com 2,75% de taxa de arraçoamento em que se observou diferenças na largura das vilosidades. As alterações histológicas hepáticas foram mais evidentes nos grupos com menor restrição de ração. Concluiu-se que, incluir *L. aequinoctialis* fresca na alimentação, combinada a um arraçoamento moderado de 4,25% do peso vivo por dia, otimizou o desempenho integrado peixe-planta em aquaponia e reduziu o custo unitário de produção, evidenciando viabilidade de aplicação.

**Palavras-chave:** Aquaponia; macrófita; manejo alimentar; nutrição; planta aquática.

## ABSTRACT

This study is based on the hypothesis that including fresh *Lemna aequinoctialis* as a dietary supplement enables a controlled reduction in the daily feeding rate of Nile tilapia juveniles, increasing nutrient-use efficiency and lowering feed costs without compromising fish performance or physiological homeostasis. In addition, this strategy is expected to intensify nutrient supply to plants and promote the growth of basil (*Ocimum basilicum*). Based on this premise, the study aimed to evaluate, in coupled aquaponic systems, the effects of using *L. aequinoctialis* in the diet of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) juveniles, combined with decreasing feeding levels, on fish zootechnical performance and morphophysiological parameters, basil growth, the production cost of each treatment and measure the apparent digestibility of the macrophyte. In Chapter 1, the review showed that studies on *Lemna* in aquaponics address, above all, in-system production and phytoremediation, cultivation of the macrophyte as the plant component with a focus on yield and composition, and use of the biomass in fish feeding—both fresh and processed—with assessments of inclusion levels and performance responses. Gaps remain, including testing complete arrangements that integrate duckweed, fish, and plant cultivation; evaluating how dietary use of the macrophyte feeds back into hydroponic beds; comparing fresh versus processed biomass; and harmonizing metrics and protocols. Practical challenges include compositional variability of the biomass, managing biomass accumulation to prevent clogging, and the risk of escapes. In Chapter 2, the study evaluated fresh *L. aequinoctialis* supplementation associated with reduced feeding in tilapia juveniles reared with basil. Four regimes were tested: a control without macrophyte, with a feeding rate equivalent to 5% of live weight per day, and reductions to 4.25%, 3.5%, and 2.75% of live weight per day, with macrophyte offered to apparent satiation in the reduced-feeding treatments. The 4.25% group showed fish growth equivalent to the control, improved feed conversion, increased basil productivity, and yielded the lowest cost per kilogram of tilapia (R\$ 18.64 ± 0.64) and basil (R\$ 17.66 ± 1.68) over the full cycle. From 3.5% per day onward, fish growth declined. Even so, plant production remained higher at 4.25% and 3.5% and was significantly lower at 2.75% and in control group without macrophyte. *L. aequinoctialis* biomass contained 37.5% crude protein, a favorable essential amino acid profile (notably lysine, valine, and leucine), and noteworthy concentrations of potassium, iron, manganese, and zinc. The apparent digestibility coefficients of the macrophyte were also determined, with values of 86.79% for crude protein and 72.22% for gross energy. Fish carcasses maintained similar protein levels, with higher lipid content in the control treatment. Physiologically, intestinal integrity was preserved across treatments, except in the group fed at 2.75% per day, where differences in villus width were observed; hepatic histological alterations were more evident in the less-restricted groups. We conclude that including fresh *L. aequinoctialis* in the diet, combined with a moderate feeding rate of 4.25% of live weight per day, optimized integrated fish–plant performance in aquaponics and reduced unit production cost, demonstrating practical feasibility.

**Keywords:** Aquaponics; macrophyte; feeding strategies; nutrition; aquatic plant.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Desenho ilustrativo do sistema de aquaponia permanentemente acoplado de cada unidade experimental. a - tanque de peixes; b - tanque de sedimentação; c – filtro mecânico (bag); d - biofiltro; e – bomba submersa; f – leitos hidropônicos.....27

**Figura 2.** Variação semanal das concentrações de amônia, nitrito, nitrato e ortofosfato ( $\text{mg L}^{-1}$ ) nos diferentes tratamentos ao longo do período experimental. .... 58

**Figura 3.** Cortes histológicos das vilosidades intestinais de juvenis de tilápia-do-nilo *O. niloticus* submetidos aos tratamentos experimentais: (A) R100, (B) R85, (C) R70 e (D) R55. .... 64

**Figura 4.** Micrografias do fígado de *Oreochromis niloticus* nos tratamentos R100 (A), R85 (B), R70 (C) e R55 (D). Observam-se os hepatócitos (H), seus núcleos (N) e vacuolização citoplasmática (V). Coloração: hematoxilina-eosina (HE). Escala: 20  $\mu\text{m}$ . .... 65

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Alocação proporcional dos custos operacionais entre os componentes hidropônico e aquícola em sistema aquapônico.....	54
<b>Tabela 2.</b> Índices de produção vegetal de manjeriço (média $\pm$ desvio-padrão) após 59 dias de cultivo em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçamento e suplementação com <i>Lemna aequinoctialis in natura</i> .....	56
<b>Tabela 3.</b> - Peso e comprimento médio dos ramos de manjeriço removidos na poda realizada aos 27 dias após o transplante .....	56
<b>Tabela 4.</b> Parâmetros de qualidade da água (média $\pm$ desvio-padrão) coletados diariamente pela manhã e tarde em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçamento e suplementação com <i>Lemna aequinoctialis in natura</i> .....	57
<b>Tabela 5.</b> Concentrações de compostos nitrogenados e ortofosfato (média $\pm$ desvio-padrão) aferidos semanalmente em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçamento e suplementação com <i>Lemna aequinoctialis in natura</i> .....	57
<b>Tabela 6.</b> Parâmetros de desempenho zootécnico (média $\pm$ desvio-padrão) de juvenis de tilápia cultivados durante 59 dias de experimento.....	59
<b>Tabela 7.</b> Composição centesimal média da farinha de <i>Lemna aequinoctialis</i> e ração comercial expressos na material seca.....	61
Legenda: FDN – Fibra em detergente neutro; FDA – Fibra em detergente ácido....	61
<b>Tabela 8.</b> Perfil de aminoácidos da <i>Lemna aequinoctialis</i> cultivada e ração comercial utilizadas na alimentação de juvenis de tilápia-do-nilo.....	62
Legenda: Limite de Quantificação.....	62
<b>Tabela 9.</b> Composição centesimal da carcaça (média $\pm$ desvio-padrão) de juvenis de tilápia-do-nilo expressa na matéria natural, após 59 dias de cultivo em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçamento e suplementação com <i>Lemna aequinoctialis in natura</i> .....	63
<b>Tabela 10.</b> Medidas de altura e largura das vilosidades intestinais (média $\pm$ desvio-padrão) de juvenis de tilápia-do-nilo após 59 dias de cultivo em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçamento e suplementação com <i>Lemna aequinoctialis in natura</i> ..	66

<b>Tabela 11.</b> Parâmetros bioquímicos sanguíneos e índices hepatossomático e lipossomático (média ± desvio-padrão) de juvenis de tilápia-do-nilo após 59 dias de cultivo em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com <i>Lemna aequinoctialis in natura</i> . .....	66
<b>Tabela 12.</b> Alocação de tempo e custo de mão de obra para tarefas operacionais em duas fases do cultivo aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com <i>Lemna aequinoctialis in natura</i> . .....	67
<b>Tabela 13.</b> Estimativa do custo operacional efetivo (COE) e custo operacional total (COT) para quatro tratamentos experimentais com diferentes taxas de arraçoamento e suplementação com <i>Lemna aequinoctialis in natura</i> , nas condições A (20 dias iniciais) e B (ciclo completo). .....	69
<b>Tabela 14.</b> Valores médios e desvio padrão de produção e custos de produção de tilápias e manjericões cultivados em sistema aquapônico nas condições A e B .....	70

## INTRODUÇÃO GERAL

Em 2022, a aquicultura superou a pesca extrativa como principal fonte mundial de animais aquáticos para consumo humano, marco que ressalta sua importância na produção e segurança alimentar. Essa constatação, registrada no relatório SOFIA 2024 da FAO, reforça a agenda de *Blue Transformation*, que propõe ampliar a produção aquícola de modo sustentável, eficiente no uso de água e insumos, e com menor pegada ambiental (FAO, 2024). Para sustentar esse avanço com menor pressão hídrica e de nutrientes, ganham relevância arranjos produtivos mais circulares. A aquaponia é um desses caminhos, ao integrar produção de peixes e hortaliças no mesmo circuito (Rakocy et al., 2006). Esse arranjo traz oportunidades e limites específicos de adoção, que variam conforme o contexto produtivo e o mercado.

A aquaponia é praticada majoritariamente em pequena escala, com forte presença de iniciativas educacionais e de hobby. No levantamento internacional de Love et al. (2014), cerca de 80% das respostas vieram dos Estados Unidos e apenas 32% declararam operar comercialmente, o que indica um campo ainda pouco empresarial. No recorte comercial analisado por Love et al. (2015), a amostra também se concentrou nesse país (81%), e menos de um terço dos empreendimentos relatou lucro nos 12 meses anteriores. Na Europa, embora o interesse, a produção científica e as redes interdisciplinares tenham crescido acentuadamente desde 2012, a produção em aquaponia segue dominada por unidades de pequena escala e poucos projetos atingem a dimensão necessária à viabilidade econômica. (Turnšek et al., 2020). No Brasil, a produção científica em aquaponia cresceu, mas permanece concentrada no Sudeste e Sul e carece de estudos de bioeconomia em escala comercial e de padronização (Moraes-Viana et al., 2025). Modelagens recentes reforçam o potencial da aquaponia para a agricultura familiar e evidenciam ausência de políticas específicas, certificação e programas de compra pública, fatores que contribuem para a subvalorização do sistema (Francisco et al., 2025).

No lado vegetal, o manjericão (*Ocimum basilicum*) é uma hortaliça aromática de alto valor comercial e tecnológico, largamente empregada na gastronomia e em produtos fitoterápicos e cosméticos pelo teor e perfil de óleos essenciais e fenólicos (Azizah et al., 2023). Do ponto de vista agrônomo, combina ciclo curto, alta aceitação de mercado e bom desempenho em cultivos sem solo. Em sistemas aquapônicos, é

apontado pelo manejo relativamente simples, tolerância a patógenos e temperatura, além do alto valor comercial (Somerville et al., 2014; Ferrarezi & Bailey, 2019). Ainda, comparações diretas indicam que, com bom balanceamento nutricional, o desempenho pode igualar ou superar a hidroponia (Saha et al., 2016). Essa performance vegetal depende diretamente do componente aquícola uma vez que a amônia excretada pelos peixes é nitrificada a nitrato, de modo que a escolha da espécie e o manejo alimentar dos peixes condicionam a produtividade do sistema (Eck et al., 2019).

Do lado aquícola, a tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*) é popular em cultivos em aquaponia sendo descrita como espécie onívora de água doce, rústica e bem adaptada a sistemas de recirculação, com bom desempenho em faixas de 25-30 °C (El Asely et al., 2020; Abd El-Hack et al., 2022). Além de aceitar dietas com teor proteico moderado e apresentar crescimento rápido, a tilápia fornece um fluxo estável de excreção nitrogenada que alimenta a nitrificação e o suprimento de nitrato às plantas (Somerville et al., 2014). Do ponto de vista da nutrição e alimentação, a tilápia aceita participação de alimentos vegetais, tais como a soja, o milho, farelo de coco e as algas, embora seja essencial ponderar aminoácidos limitantes e a mitigação de fatores antinutricionais (Magbanua & Ragaza, 2024). Em aquaponia, essas escolhas de ingrediente e de arraçoamento repercutem diretamente na oferta de nutrientes às plantas (Robaina et al., 2019).

A lentilha-d'água (*Lemna minor*) é uma macrófita aquática flutuante de crescimento rápido e alto rendimento, podendo apresentar teor proteico elevado na matéria seca, o que a torna um recurso vegetal aplicável para sistemas aquícolas integrados (Leng et al., 1995; Acosta et al., 2021). Essa biomassa pode seguir para múltiplos usos como a fitorremediação e biofiltro (Galaviz-Villa et al., 2016; Zhou et al., 2023), ingrediente em rações (Tavares et al., 2008; Opiyo et al., 2022), alimento fresco (Hassan & Edwards, 1992; El-Shafai et al., 2004) e bioprodutos (Xu et al., 2011; Yang, 2022). No segundo capítulo deste estudo, o enfoque recai no seu uso *in natura* como alimento fresco complementar à ração comercial, por entendermos que o fornecimento direto da biomassa é operacionalmente simples, mais reprodutível e escalável em condições reais de produção.

Com base nesse panorama, esta tese foi estruturada em dois capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma revisão de literatura sobre o emprego da macrófita lentilha-d'água *Lemna* spp. em aquaponia com tilápia-do-nilo *O. niloticus*, enquanto o Capítulo 2 descreve um experimento de aquaponia acoplada com produção de manjeriço *Ocimum basilicum* que testa o uso de *L. aequinoctialis in natura* como suplemento alimentar para juvenis de tilápia, em combinação com níveis decrescentes de taxa de arraçoamento de ração comercial, avaliando a composição da macrófita, crescimento dos peixes e do manjeriço, composição de carcaças, respostas fisiológicas e avaliação de custo de produção. Esta pesquisa parte da hipótese, que inclusão de *L. aequinoctialis in natura* como suplemento alimentar permitirá reduzir de forma controlada a taxa de arraçoamento de juvenis de tilápia-do-nilo, aumentando a eficiência no uso de nutrientes e diminuindo o custo de ração, sem comprometer o desempenho zootécnico nem a homeostase fisiológica dos peixes. Adicionalmente, em consonância com princípios de economia circular e uso parcimonioso de insumos, essa estratégia deverá potencializar o aporte de nutrientes às plantas e beneficiar o crescimento do manjeriço.

## OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos do uso de lentilha-d'água *Lemna aequinoctialis* na alimentação de juvenis de tilápia-do-nilo *Oreochromis niloticus* com níveis decrescentes de arraçoamento, cultivados em sistemas aquapônicos acoplados, sobre o desempenho zootécnico dos peixes, o crescimento do manjeriço *Ocimum basilicum* e parâmetros morfo-fisiológicos, nutricionais e custo de produção.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear e analisar, por meio de revisão de literatura, as aplicações da macrófita do gênero *Lemna* em aquaponia e identificar lacunas de pesquisa;
- Determinar o coeficiente de digestibilidade aparente da *L. aequinoctialis* para proteína e energia bruta;
- Verificar o desempenho zootécnico dos juvenis de tilápia submetidos a diferentes níveis de arraçoamento complementado com lentilha-d'água;
- Avaliar os efeitos dos tratamentos sobre o crescimento, produtividade e características morfológicas do manjeriço cultivado em sistema aquapônico;
- Determinar a composição centesimal da ração, da lentilha-d'água e da carcaça dos peixes dos diferentes tratamentos;
- Analisar parâmetros histológicos do fígado e do intestino dos peixes, visando identificar possíveis alterações morfofisiológicas associadas à dieta;
- Avaliar os efeitos dos tratamentos sobre parâmetros bioquímicos sanguíneos dos peixes;
- Realizar análise de custo de produção dos tratamentos.

## REFERÊNCIAS

- Abd El-Hack, M. E., El-Saadony, M. T., Nader, M. M., Salem, H. M., El-Tahan, A. M., Soliman, S. M., & Khafaga, A. F. (2022). Effect of environmental factors on growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *International Journal of Biometeorology*, 66, 2183–2194. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02347-6>
- Acosta, K., Appenroth, K. J., Borisjuk, L., Edelman, M., Heinig, U., Jansen, M. A. K., Oyama, T., Pasaribu, B., Schubert, I., Sorrels, S., Sowjanya Sree, K., Xu, S., Michael, T. P., & Lam, E. (2021). Return of the Lemnaceae: Duckweed as a model plant system in the genomics and postgenomics era. *The Plant Cell*, 33(10), 3207–3234. <https://doi.org/10.1093/plcell/koab189>
- Azizah, N. S., Irawan, B., Kusmoro, J., Safriansyah, W., Farabi, K., Oktavia, D., Doni, F., & Miranti, M. (2023). Sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) - A review of its botany, phytochemistry, pharmacological activities, and biotechnological development. *Plants*, 12(24), 4148. <https://doi.org/10.3390/plants12244148>
- Eck, M., Körner, O., & Jijakli, M. H. (2019). Nutrient cycling in aquaponics systems. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems* (pp. 231–246). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_9)
- El Asely, A. M., Reda, R. M., Salah, A. S., Mahmoud, M. A., & Dawood, M. A. O. (2020). Overall performances of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) associated with using vegetable oil sources under suboptimal temperature. *Aquaculture Nutrition*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/anu.13072>
- El-Shafai, S. A., El-Gohary, F. A., Verreth, J. A. J., Schrama, J. W., & Gijzen, H. J. (2004). Apparent digestibility coefficient of duckweed (*Lemna minor*), fresh and dry for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquaculture Research*, 35(6), 574–586. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01055.x>
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue transformation in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Ferrarezi, R. S., & Bailey, D. S. (2019). Basil performance evaluation in aquaponics. *HortTechnology*, 29(1), 85–93. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH03797-17>
- Francisco, E. C., Freato, T. A., Piolli, A. L., & Dal Poz, M. E. S. (2025). Analysis of the aquaponic system sustainability via system dynamics modelling – FEW nexus approach. *Circular Economy and Sustainability*, 5(2577–2592). <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00408-z>
- Galaviz-Villa, I., Sosa-Villalobos, C., García-Sánchez, A., Castañeda-Chávez, M. R., Lango-Reynoso, F., & Amaro-Espejo, I. (2016). Evaluation of the efficiency of duckweeds, *Lemna* sp. and *Spirodela* sp., in the treatment of tilapia effluents. *Journal of Agricultural Science*, 8(12), 188–196. <https://doi.org/10.5539/jas.v8n12p188>
- Hassan, M. S., & Edwards, P. (1992). Evaluation of duckweed (*Lemna perpusilla* and *Spirodela polyrrhiza*) as feed for tilapia. *Aquaculture*, 104(3–4), 315–326. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(92\)90213-5](https://doi.org/10.1016/0044-8486(92)90213-5)

- Leng, R. A., Stambolie, J. H., & Bell, R. (1995). Duckweed - a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish. *Livestock Research for Rural Development*. Volume 7(5). <http://www.lrrd.org/lrrd7/1/3.htm>
- Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens, K. (2014). An international survey of aquaponics practitioners. *PLOS ONE*, 9(7), e102662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>
- Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023>
- Magbanua, T. O., & Ragaza, J. A. (2024). Selected dietary plant-based proteins for growth and health response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture and Fisheries*, 9(1), 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.04.001>
- Moraes-Viana, G. de, Santos, O. A., Santos-Silva, E. N., & Bordinhon, A. M. (2025). Status of aquaponics systems in Brazil: A systematic literature review. *Boletim do Instituto de Pesca*, 51(2025). <https://doi.org/10.20950/1678-2305/bip.2024.51.e945>
- Opiyo, M. A., Muendo, P. N., Mbogo, K., Ngugi, C., ... (2022). Inclusion of duckweed (*Lemna minor*) in the diet improves flesh omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acid profiles but not the growth of farmed Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Animal Feed Science and Technology*, 292, 115442. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115442>
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics—Integrating fish and plant culture* (SRAC Publication No. 454). Southern Regional Aquaculture Center. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/recirculating-aquaculture-tank-production-systems-aquaponics-integrating-fish-and-plant-culture.html>
- Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Sánchez, J., & Goosen, N. (2019). Fish diets in aquaponics. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems* (pp. 333–352). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_13)
- Saha, S., Monroe, A., & Day, M. R. (2016). Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless agricultural systems. *Annals of Agricultural Sciences*, 61(2), 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.aogas.2016.10.001>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i4021e>
- Tavares, F. A., Rodrigues, J. B. R., Fracalossi, D. M., Esquivel, J., & Roubach, R. (2008). Dried duckweed and commercial feed promote adequate growth performance of tilapia fingerlings. *Biotemas*, 21(3), 91–97. <https://doi.org/10.5007/2175-7925.2008v21n3p91>

Turnšek, M., Joly, A., Thorarinsdottir, R., & Junge, R. (2020). Challenges of commercial aquaponics in Europe: Beyond the hype. *Water*, 12(1), 306. <https://doi.org/10.3390/w12010306>

Xu, J., Cui, W., Cheng, J. J., & Stomp, A.-M. (2011). Production of high-starch duckweed and its conversion to bioethanol. *Biosystems Engineering*, 110(2), 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.007>

Yang, G.-L. (2022). Duckweed is a promising feedstock of biofuels: Advantages and approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 15231. <https://doi.org/10.3390/ijms232315231>

Zhou, Y., Stepanenko, A., Kishchenko, O., Xu, J., & Borisjuk, N. (2023). Duckweeds for phytoremediation of polluted water. *Plants*, 12(3), 589. <https://doi.org/10.3390/plants12030589>

## **CAPÍTULO I.**

**O uso de lentilha-d'água (*Lemna* spp.) em sistemas aquapônicos:  
revisão de literatura**

**Jaboticabal, São Paulo**

**2025**

## RESUMO

A intensificação sustentável dos sistemas alimentares exige soluções que recirculem água e nutrientes, reduzam perdas e diversifiquem insumos. A aquaponia atende a esse escopo ao integrar aquicultura e hidroponia em circuitos compartilhados, nos quais o nitrogênio excretado pelos peixes é convertido via nitrificação em formas assimiláveis pelas plantas. Nesse contexto, macrófitas do gênero *Lemna* despontam como componente multifuncional: removem nutrientes do efluente, geram biomassa com teores relevantes de proteína e podem compor a alimentação dos animais cultivados. Este estudo apresenta uma revisão de literatura cujo objetivo foi mapear e analisar as formas de uso e as condições de aplicação de *Lemna* spp. em aquaponia, indicando lacunas para pesquisas futuras. A literatura específica, ainda incipiente, descreve três frentes principais: produção de *Lemna* no próprio circuito aquapônico, inclusive como cultivo vegetal dedicado; uso da biomassa como ingrediente de ração ou suplemento, com níveis moderados de inclusão associados a desempenho zootécnico estável ou superior; e efeitos sistêmicos desejáveis, como melhora da qualidade da água e sombreamento. Em contrapartida, há desafios operacionais notórios, como a variabilidade composicional da biomassa, a necessidade de manejo para evitar acúmulo e entupimentos e o risco de escapes. Persistem lacunas experimentais relevantes, como a possibilidade de aplicação em ensaios com arranjos aquapônicos completos (macrófita + peixes + produção vegetal), aprofundamento de estudos sobre como o uso de *Lemna* na dieta dos peixes retroalimenta os leitos hidropônicos, ponderação do uso de biomassa fresca versus processada; e harmonização das métricas e protocolos para viabilizar recomendações de manejo reprodutíveis.

**Palavras-chave:** macrófitas; aquaponia; sistemas integrados; circularidade; planta aquática.

## ABSTRACT

Sustainable intensification of food systems requires solutions that recirculate water and nutrients, reduce losses, and diversify inputs. Aquaponics fits this scope by integrating aquaculture and hydroponics in shared loops, in which nitrogen excreted by fish is converted via nitrification into forms assimilable by plants. In this context, macrophytes of the genus *Lemna* emerge as a multifunctional component: they remove nutrients from effluents, generate biomass with relevant protein levels, and can make up part of the diet of the cultured animals. This study presents a literature review aimed at mapping and analyzing the modes of use and application conditions of *Lemna* spp. in aquaponics, highlighting gaps for future research. The specific literature, still incipient, describes three main fronts: production of *Lemna* within the aquaponic loop itself, including as a dedicated plant crop; use of the biomass as a feed ingredient or supplement, with moderate inclusion levels associated with stable or superior zootechnical performance; and desirable system-level effects, such as improved water quality and shading. Conversely, there are notable operational challenges, such as compositional variability of the biomass, the need for management to avoid accumulation and clogging, and the risk of escapes. Relevant experimental gaps persist, including the feasibility of trials with complete aquaponic configurations (macrophyte + fish + plant production), deeper studies on how using *Lemna* in fish diets feeds back into hydroponic beds, assessment of fresh versus processed biomass, and the harmonization of metrics and protocols to enable reproducible management recommendations.

**Keywords:** macrophytes; aquaponics; integrated systems; circularity; aquatic plant.

## INTRODUÇÃO

A produção de alimentos ao redor do mundo tem sido crescentemente desafiada por fatores interligados, como o aumento da população, a mudança nos padrões de consumo, e a degradação progressiva e escassez de recursos naturais. Segundo o relatório *The State of Food and Agriculture 2024*, da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), os sistemas de produção encontram-se em um cenário de ruptura, demandando transformações profundas e integradas para tornarem-se mais sustentáveis, resilientes e inclusivos. A publicação evidencia que não será uma estratégia única a responsável por alcançar todas as demandas globais, sendo necessário adaptar as soluções aos contextos específicos, considerando as desigualdades e os limites ambientais. Essa urgência de transformação afeta desproporcionalmente os países de baixa renda e as populações mais vulneráveis (FAO, 2024a).

Além disso, os sistemas de produção agrícola consomem cerca de 70% da água doce disponível mundialmente, tornando a agricultura a maior responsável pelo uso desse recurso (FAO, 2017). No Brasil, a situação é semelhante. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indicam que a agricultura, pecuária, silvicultura, pesca e aquicultura foram responsáveis por 97,1% do consumo total de água no país em 2020 (equivalente a aproximadamente 297,2 mil hm<sup>3</sup>), sendo a agricultura de sequeiro o principal demandante (IBGE, 2023). Essa condição também é agravada pelas mudanças climáticas, que alteram os padrões de precipitação e aumentam a frequência de eventos extremos, ameaçando a estabilidade da produção agrícola (IPCC, 2022). Nesse contexto, a transformação dos sistemas alimentares globais deve ocorrer de forma urgente, com base em modelos integrados e mais sustentáveis, que respeitem os limites planetários e estejam alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 das Nações Unidas (Rockström et al., 2020). Entre essas alternativas, a aquaponia tem sido apontada como tecnologia de recirculação hídrica e aproveitamento de nutrientes (Somerville et al., 2014).

O pescado representa uma importante fonte de proteína animal para populações ao redor do mundo, sendo valorizado por seu alto valor nutricional e, em muitos

contextos, por apresentar menor pegada ambiental em comparação à produção de proteína terrestre (Béné et al., 2015; Hall et al., 2011). No entanto, a crescente demanda por pescado tem contribuído para a sobrepesca e a consequente redução dos estoques naturais, com estimativas recentes apontando que mais de um terço dos estoques pesqueiros globais estão sendo explorados em níveis biologicamente insustentáveis (FAO, 2024b). A sobrepesca, em conjunto com as mudanças climáticas, figura entre as maiores ameaças à saúde dos oceanos, comprometendo a biodiversidade marinha, a resiliência dos ecossistemas e a segurança alimentar mundial (Sumaila & Tai, 2020).

Como resposta a esses desafios, a aquicultura tem se consolidado como uma estratégia fundamental para suprir a crescente demanda por pescado sem comprometer ainda mais a fauna. Em 2022 a produção mundial proveniente da aquicultura superou a da pesca extrativa, atingindo 94,4 milhões de toneladas contra 91 milhões de toneladas da captura selvagem (FAO, 2024b). Apesar de seu rápido crescimento e potencial, a aquicultura também enfrenta críticas quanto aos seus impactos ambientais, como a poluição por nutrientes, a alteração de habitats naturais e a possibilidade de escape de organismos cultivados (Naylor et al., 2021), o que reforça a necessidade de intensificação sustentável e inovações no setor. Nesse sentido, insumos e bioestratégias de base vegetal produzidos no próprio ambiente, como macrófitas aquáticas do gênero *Lemna*, com potencial para maior aproveitamento de nutrientes do sistema e uso alimentar, alinhavam-se a essa agenda de circularidade (Martínez-Yáñez et al., 2018; Zhou et al., 2023). Ante o exposto, este estudo teve como objetivo, a partir de revisão bibliográfica, identificar e analisar as formas de uso da lentilha-d'água (*Lemna* spp.) em aquaponia e as condições em que tem sido aplicada, bem como apontar lacunas para estudos futuros.

## **SISTEMAS AQUAPÔNICOS**

Nesse cenário, sistemas de produção integrados, como a aquaponia, têm se destacado por oferecerem soluções mais eficientes e ambientalmente responsáveis, ao promoverem a reutilização de recursos e a redução da poluição ambiental (Goddek et al., 2015; Somerville et al., 2014). A aquaponia integra a criação de organismos

aquáticos com o cultivo de plantas sem solo, em arranjos permanentemente acoplados ou acoplados sob-demanda, nos quais a água rica em nutrientes circula entre os compartimentos produtivos. Os resíduos nitrogenados excretados pelos peixes são convertidos por bactérias nitrificantes, principalmente dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, em formas assimiláveis pelas plantas, como o nitrato, promovendo um ciclo eficiente de nutrientes (Tyson et al., 2008; Lennard & Leonard, 2006).

Os sistemas aquapônicos combinam a recirculação aquícola (RAS) com o cultivo de plantas sem solo (hidroponia), permitindo a reutilização eficiente de nutrientes e água (Lennard & Goddek, 2019). Essa integração prevê que a água proveniente dos tanques de peixes seja aproveitada no cultivo vegetal, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e minimizando o desperdício de recursos. Segundo Yildiz et al., (2017), os resíduos da aquicultura, compostos principalmente por nitrogênio (amônia e nitrato) e fósforo (fosfato), representam nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, que atuam como filtro biológico e contribuem para a manutenção da qualidade da água nos sistemas.

De acordo com Baganz et al. (2022), os sistemas aquapônicos podem ser classificados como permanentemente acoplados ou acoplados sob-demanda (também chamados de desacoplados). No sistema acoplado sob-demanda, os circuitos de água da aquicultura e da hidroponia operam em *loops* independentes, sendo o fluxo de nutrientes regulado pelas necessidades da unidade hidropônica, o que permite maior flexibilidade e ajustes físico-químicos (Goddek et al., 2016). Por outro lado, os sistemas permanentemente acoplados compartilham um único circuito de água, com estrutura mais simplificada, facilidade de implementação e manutenção, sendo amplamente utilizados por pequenos e médios produtores (Palm et al., 2019).

A estrutura básica desses sistemas inclui tanque de peixes, unidade de filtração mecânica, decantador (unidade de sedimentação), biofiltro e sistema hidropônico, interconectados pelo fluxo de água (Rakocy et al., 2006). A filtração mecânica remove sólidos suspensos, enquanto o biofiltro promove a atividade de bactérias nitrificantes que convertem a amônia em nitrito e, posteriormente, em nitrato, disponibilizando esse nutriente para as plantas (Eck et al., 2019). As culturas vegetais atuam como biofiltros naturais, absorvendo nutrientes derivados da excreção dos peixes e da nitrificação.

Folhosas, ervas aromáticas e hortaliças de rápido crescimento são preferidas por sua alta demanda de nitrogênio e fósforo, principais compostos derivados do metabolismo dos peixes (Somerville et al., 2014). Ainda, entre as espécies de peixe cultivadas em aquaponia relatadas na literatura, destacam-se a carpa comum *Cyprinus carpio* (Filep et al., 2016), o bagre africano *Clarias gariepinus* (Knaus et al., 2020), o tambaqui *Colossoma macropomum* e, sobretudo, a tilápia-do-nylo *O. niloticus* (Pinho et al, 2021; Nascimento et al., 2023).

### **LENTILHA-D'ÁGUA *Lemna minor***

As macrófitas do gênero *Lemna*, conhecidas como lentilhas-d'água, destacam-se pelo pequeno tamanho, rápido crescimento e facilidade de cultivo em comparação com outras angiospermas aquáticas (Hillman, 1961). Originalmente descrita por Linnaeus (1753), esta planta é uma macrófita aquática flutuante de pequeno porte, amplamente distribuída em regiões tropicais e subtropicais, adaptada ao crescimento em ambientes aquáticos de águas calmas e com disponibilidade de nutrientes. Apresentam formato oval, diâmetro médio de 1,7 mm e forma estruturas compostas por pelo menos duas a quatro folhas interligadas, além de um sistema radicular característico. Suas aplicações na aquicultura são diversas, incluindo remoção de nutrientes e metais pesados de efluentes (Zhou et al., 2023) e produção de biocombustíveis (Xu et al., 2011; Cui & Cheng, 2014). Além disso, podem ser utilizadas como alimento para várias espécies de peixes, como a tilápia-do-nylo, demonstrando potencial para compor a alimentação e dietas (Opiyo et al., 2024). No tema cultivo hidropônico, poucos estudos são relatados na literatura demonstrando aplicação da macrófita. De acordo com Regni et al. (2021) a aplicação foliar de extrato aquoso de *L. minor* promoveu efeito bioestimulante no cultivo de oliveiras em hidroponia, esses autores relataram aumento na taxa de fotossíntese, teor de clorofila e na biomassa das folhas produzidas.

Dentre os alimentos para animais, estas macrófitas têm reconhecimento histórico por sua versatilidade ecológica e potencial produtivo. Diversas espécies animais têm se beneficiado da inclusão de lentilha-d'água na alimentação. Em frangos de corte, por exemplo, níveis de até 6% de inclusão de *L. minor* substituindo parcialmente o farelo

de gergelim promoveram melhora do desempenho zootécnico (Ahmmad et al., 2003), ao passo que em galinhas poedeiras, a inclusão de *L. minor* em níveis de até 15% da dieta manteve o desempenho produtivo e a qualidade dos ovos (Akter et al., 2011). Em ruminantes, estudos recentes com vacas leiteiras demonstraram que a suplementação da dieta com *L. minor* melhora parâmetros hematológicos e o perfil antioxidante, indicando potencial para otimizar o desempenho produtivo e a biossíntese do leite (Tanuwiria & Mushawwir, 2020). Tais evidências demonstram a versatilidade da lentilha-d'água como insumo alimentar de baixo custo e viável para diferentes espécies, o que justifica o crescente interesse em sua utilização em sistemas integrados.

Entretanto, por se tratar de uma planta aquática flutuante, sua produção está naturalmente mais alinhada com sistemas de aquicultura e cultivos que dependem diretamente da água, onde sua integração pode otimizar recursos e fortalecer práticas sustentáveis. O cultivo da lentilha-d'água pode ser integrado a diferentes arranjos produtivos, como viveiros escavados, sistemas de recirculação e aquaponia, atuando simultaneamente na remoção de compostos nitrogenados e na produção de biomassa (Leng et al., 1995; Martínez-Yáñez et al., 2018). Seu papel multifuncional no sistema confere à planta relevância crescente no desenvolvimento de práticas mais eficientes e ambientalmente responsáveis na aquicultura (Chakrabarti et al., 2018).

A composição bromatológica de *L. minor* varia amplamente e é sensível às condições de cultivo e ao processamento, com efeitos claros da disponibilidade de N e P no meio de crescimento (El-Shafai et al., 2004; Djeke et al., 2023; Miltko et al., 2024; Ullah et al., 2022; Yilmaz et al., 2004). Em termos de amplitude, a proteína bruta situa-se em 12–41% da matéria seca. Os lipídios variam aproximadamente de 2% a 10% da matéria seca, cinzas abrangem 2–24% da matéria seca, a fibra bruta oscila de 1,6% a 13,6% da matéria seca. A concentração de energia bruta é relatada entre 17,9–19,1 kJ g<sup>-1</sup>. Além dos macronutrientes, observam-se teores relevantes de minerais como Ca, P, Mg, Fe, Mn e Zn, bem como antioxidantes naturais como carotenoides (provitamina A) e tocoferóis (vitamina E). Não obstante, são relatados fatores antinutricionais, como oxalatos, saponinas, taninos e fitatos, em níveis baixos a moderados (Djeke et al., 2023; Sandan et al., 2024). Essa variação observada na composição centesimal das macrófitas representa um desafio para sua padronização e aplicação em dietas comerciais. A adoção industrial deste tipo de ingrediente

alternativo enfrenta desafios de padronização e escala por fatores como a variabilidade na composição e sua disponibilidade irregular, como apontado para macroalgas em dietas de aquicultura (Siddik et al., 2023), ao passo que *commodities* como o farelo de soja e o milho apresentam uso e especificações mais estáveis (Tacon et al., 2011).

## **APLICAÇÕES DE *Lemna* spp. NA AQUAPONIA**

Embora a aquaponia seja um campo em expansão, o emprego de *L. minor* dentro desses sistemas ainda aparece pouco na literatura. Um dos primeiros documentos de amplo alcance a dar visibilidade à essa aplicação, é o manual de Somerville et al. (2014) que sugerem que o cultivo da lentilha-d'água pode ocorrer em um tanque independente conectado na linha de retorno entre o leito hidropônico e o tanque de peixes. Assim, a água que sai do leito, ainda com parte dos nutrientes não absorvidos pelas hortaliças, fertiliza a macrófita, e a água retorna mais limpa para os peixes. Além disso, esses autores também recomendam seu uso como suplemento alimentar em níveis moderados para o cultivo aquícola, pois a menor digestibilidade e o maior teor de fibra podem elevar a carga de sólidos no sistema. Logo, produzir *L. minor* no próprio sistema para uso parcial na dieta dialoga diretamente com a circularidade, mas demanda avaliações de viabilidade estrutural e operacional.

Posteriormente, Popa et al. (2017) apontam vantagens e desvantagens do emprego de *L. minor* no sistema. Listam como vantagens o potencial de uso alimentar, dado que a biomassa seca pode conter até ~40% de proteína, e remoção substancial de nitrogênio e fósforo da água. Já como desvantagens: o alto teor de umidade (aproximadamente 86-97%), que se traduz em baixo teor proteico em base úmida; alto teor de RNA, presença de ráfides e possível bioacúmulo de compostos tóxicos na biomassa; e os riscos operacionais de fuga de biomassa e entupimento de tubulações quando o crescimento não é manejado. No mesmo artigo, ao tratar do uso alimentar, esses pesquisadores apontam que uma dieta mista, combinando ração formulada e a macrófita ainda fresca, pode reduzir o custo com alimentação. Todavia, essa publicação aborda o tema a partir de revisão de literatura e não de um ensaio

aquapônico controlado, o que reforça a lacuna metodológica de estudos experimentais focados em *L. minor* versus aquaponia.

Em estudo de Martínez-Yáñez et al. (2018), os autores cultivaram *L. minor* e outras macrófitas dentro do sistema de aquaponia e caracterizaram produtividade e qualidade nutricional da biomassa. Nesse arranjo, a lentilha-d'água destacou-se por apresentar maior teor de proteína bruta na matéria seca (aproximadamente 29,9%), frações da fibra relativamente mais baixa que as outras espécies mais lignificadas, além teores significativos de cálcio e fósforo, enfatizando *L. minor* como candidata a ingrediente de ração produzido no próprio sistema. Considerando uma possível trilha lógica, esse estudo fornece o ponto de partida da circularidade, i.e., primeiro produzir lentilha-d'água *Lemna minor* no circuito com qualidade compatível ao uso alimentar, depois, testar seu uso na alimentação de peixes e discutir como a excreção subsequente retroalimenta o módulo vegetal, questão essa que os ensaios subsequentes podem aprofundar.

Em outro ensaio publicado, Sirakov & Velichkova (2018) testaram *Lemna minuta* cultivada em sistema aquapônico na alimentação de carpas também cultivadas em aquaponia. A biomassa da macrófita foi colhida, seca, moída e incorporada a rações peletizadas em níveis de 0%, 10% e 30%. Os autores avaliaram a influência na qualidade da água e desempenho de juvenis de carpas, encontrando concentração de amônia significativamente menor e maior sobrevivência no grupo com 30%, com peso final, taxa de crescimento específico e conversão alimentar semelhantes ao tratamento controle. Apesar de mencionarem a presença da macrófita no sistema, não foi relatado produção de outras culturas, como hortaliças, frutas ou legumes. Todavia se faz necessário não apenas aferir os efeitos da inclusão de *Lemna* sobre os peixes, mas também investigar, em arranjos com cultivo vegetal, como a alimentação e a excreção subsequentes modulam o suprimento de nutrientes às plantas após o fornecimento da lentilha-d'água.

Já no estudo de Velichkova et al. (2020), a macrófita *L. minuta* foi cultivada por um mês no próprio sistema aquapônico, processada, e então incluída na formulação de três dietas isocalóricas e isonitrogenadas para carpa comum *Cyprinus carpio*: controle sem a biomassa vegetal, 5% e 10% de inclusão, substituindo metade e toda a farinha de peixe, respectivamente. Foi avaliado o crescimento, conversão alimentar,

sobrevivência, além de parâmetros fisiológicos. Quanto ao desempenho, 5% de inclusão apresentou maior peso final, maior taxa de crescimento específico e melhor conversão alimentar que o tratamentos controle, enquanto a sobrevivência foi de 100% em todos os grupos. Os autores também monitoraram a influência da alteração nas dietas nos parâmetros de qualidade da água. Os grupos contendo a macrófita reduziram a concentração de amônia, nitrito, nitrato e fosfato da água do cultivo em relação a dieta controle. Essas alterações nos nutrientes da água recirculada inevitavelmente repercutem no módulo vegetal, portanto, é de se esperar efeitos também nas plantas, que precisam ser aprofundados em mais estudos.

Outra abordagem relatada na literatura é de como manejar a produção de *L. minor* dentro do próprio sistema aquapônico. Esse é precisamente o foco de Camargo-Castellanos et al. (2022), um estudo experimental com tilápia *O. niloticus*, que estabelece parâmetros operacionais para o cultivo de *L. minor* em aquaponia. Em três ensaios, os autores testaram tempos de retenção hidráulica e densidades de plantio de macrófita e mostraram que a maior produção de biomassa e crescimento ocorre com alto fluxo e tempo de retenção hidráulica curto (~30 min) em densidade de 300 g m<sup>-2</sup>. Durante esses ensaios não houve mortalidade de peixes nem sinais clínicos relevantes, o que respalda a aplicabilidade do manejo proposto. Avaliando o terceiro ensaio, comparando áreas de plantio de 5, 6 e 7 m<sup>2</sup> por sistema, os autores quantificaram o balanço de matéria seca, nitrogênio e fósforo e verificaram que a *L. minor* reteve cerca de 6–7% do nitrogênio e 7–9% do fósforo inseridos diariamente, mantendo a qualidade da água em faixas adequadas à tilapicultura.

Embora o artigo de Luo et al. (2023) trate a lentilha-d'água como insumo promissor no contexto da aquaponia e faça recomendações operacionais nessa direção, o delineamento do estudo não inclui um sistema aquapônico completo, pois são dois ensaios curtos concebidos como base para aplicações aquapônicas. Na Fase I, os autores cultivaram *L. minor* em recipientes para comparar diferentes fontes de luz (e fotoperíodos e recomendaram o uso de LED branco com 16:8 (luz:escuro). Na Fase II implementaram uma co-cultura em dois aquários interligados (um com tilápia vermelha e outro com cultivo de macrófita), aerados e com recirculação, por 16 dias. As tilápias receberam 0%, 5% ou 10% de *Lemna* em substituição aos pellets de ração, sendo 100%, 95% ou 90% de ração respectivamente (mantendo 5% do peso corporal como taxa de arraçoamento total), e os autores não declaram se o fornecimento da

macrófita ocorre na forma *in natura*. Contudo, os grupos com uso de 5 e 10% de *L. minor* resultaram em maior ganho em peso, maior taxa de crescimento e melhor conversão alimentar em comparação ao tratamento sem macrófita, além de reduções de amônia total, nitrato e nitrogênio total diluídos na água dos sistemas com fornecimento de lentilha-d'água em comparação ao controle.

Outro estudo de produção integrada em aquaponia apresenta a lentilha-d'água como alternativa. Fabula et al. (2023) avaliaram diferentes densidades de tilápia vermelha combinadas à diferentes densidades de camarão *Macrobrachium rosenbergii*. Neste estudo a *Lemna* sp. foi introduzida nos tanques de camarão a  $400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  e manejada como cultura integrada, sua produção foi mensurada e era colhida para controlar a densidade e ofertada apenas como suplemento aos peixes quando sua biomassa excedia a densidade inicial e começava a obstruir o sistema, ou seja, sem nível de inclusão pré-fixado. Em termos de desempenho, a densidade de  $24 \text{ peixes} \cdot \text{m}^{-3}$  com  $12 \text{ camarões} \cdot \text{m}^{-2}$  favoreceu os ganhos dos organismos aquáticos, mas não apresentaram efeitos significativos sobre o crescimento de alface e da macrófita. Ainda, estes autores relatam vantagens do uso da macrófita no sistema aquapônico, como prover sombreamento para os camarões, atuação como filtro biológico adicional e suplemento alimentar aos peixes. Todavia, esses relatam que o cultivo da macrófita demanda manejo e manutenção constante para evitar acúmulo de biomassa e entupimento do fluxo da água, além de apontarem dificuldade para equilibrar as condições de cultivo ideais para todos os componentes produtivos,

Por fim, Alkhamis (2024) testou, em 12 unidades aquapônicas independentes, a inclusão de *L. minor* produzida no próprio sistema como ingrediente de ração para juvenis de tilápia-do-nylo. A macrófita foi produzida e colhida no sistema aquapônico e posteriormente foi moída e incorporada a dietas isoproteicas e isocalóricas nos níveis de 0, 100, 200 e  $300 \text{ g kg}^{-1}$ . O grupo com inclusão de  $200 \text{ g kg}^{-1}$  proporcionou maior ganho de peso, taxa de crescimento específico e apresentou a melhor conversão alimentar, quando comparada aos demais tratamentos. Os níveis crescente de *Lemna* também promoveram melhoria nos índices de qualidade de água, uma vez que elevou o oxigênio dissolvido e reduziu amônia total, nitrito, nitrato e fosfato na água. Na composição corporal dos peixes, observou-se menor lipídio e maior teor de minerais conforme se aumentava a inclusão da farinha de *Lemna* na ração. Além disso, a

análise econômica indicou menor custo por kg produzido e maior eficiência em 200 g kg<sup>-1</sup>.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aquaponia vem recebendo atenção, porém o uso de *Lemna* sp. nesses sistemas permanece pouco explorado, com pouquíssimos estudos experimentais e as primeiras referências de amplo alcance sendo divulgada apenas na última década. Os principais achados dos estudos abordados nesta revisão, indicam que a integração da lentilha-d'água (*Lemna* spp.) em aquaponia pode contribuir para a remoção de nutrientes e participar como alimento no compartimento aquícola. Em geral, níveis moderados de inclusão na dieta mantêm ou melhoram o desempenho dos peixes e contribuem para um perfil de água mais favorável ao sistema. Ainda assim, permanecem lacunas relevantes, tais como a necessidade de quantificar em sistemas aquapônicos completos, como a presença dessa macrófita na alimentação dos peixes altera o perfil de nutrientes que chega aos leitos hidropônicos e, por consequência, sua influência no cultivo das plantas; comparar sistematicamente formas de uso (biomassa fresca versus farinha processada) e níveis de inclusão por espécie e fase de crescimento, abordando diferentes configurações de manejo alimentar; padronizar a forma de relatar base de inclusão, processamento e composição da biomassa para permitir comparabilidade entre estudos; e aprofundar o entendimento do papel da *Lemna* em diferentes arranjos produtivos, seja como cultivo vegetal principal do módulo hidropônico, seja como cultivo intermediário operando em série ou associado com hortaliças (por exemplo, manjericão e alface). Em síntese, a proposta é tecnicamente consistente, mas requer ensaios integrados, de maior escala e com métricas harmonizadas para consolidar diretrizes de uso das macrófitas do gênero *Lemna* em sistemas aquapônicos.

## REFERÊNCIAS

- Ahmmad, M. U., Yeasmin, T., Rahman, M. S., Ali, M. S., & Howlider, M. A. R. (2003). Replacement of sesame oil cake by duckweed (*Lemna minor*) in broiler diet. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 6(16), 1450–1453. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2003.1450.1453>
- Alkhamis, Y. A. (2024). Effect of aquaponically grown duckweed as a sustainable feed on growth indices, water quality, and digestive activities for the Nile tilapia reared in aquaponic culture. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 28(2), 631–646. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2024.350076>
- Baganz, G. F. M., Junge, R., Portella, M. C., Goddek, S., Keesman, K. J., Baganz, D., Staaks, G., Shaw, C., Lohrberg, F., & Kloas, W. (2022). The aquaponic principle—It is all about coupling. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 252–264. <https://doi.org/10.1111/raq.12596>
- Béné, C., Barange, M., Subasinghe, R., Pinstup-Andersen, P., Merino, G., Hemre, G. I., & Williams, M. (2015). Feeding 9 billion by 2050 - Putting fish back on the menu. *Food Security*, 7(2), 261–274. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0427-z>
- Camargo-Castellanos, J. C., Flores-García, L., Herrera-Díaz, I. E., Álvarez-González, C. A., Albertos-Alpuche, P. J., & Martínez-Yáñez, R. (2022). System management of *Lemna minor* in aquaponics. *Aquaculture Research*, 53, 974–988. <https://doi.org/10.1111/are.15637>
- Chakrabarti, R., Clark, W. D., Sharma, J. G., Goswami, R. K., Shrivastav, A. K., & Tocher, D. R. (2018). Mass production of *Lemna minor* and its amino acid and fatty acid profiles. *Frontiers in Chemistry*, 6, 479. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00479>
- Cui, W., & Cheng, J. J. (2014). Growing duckweed for biofuel production: A review. *Plant Biology*, 16(s1), 16–23. <https://doi.org/10.1111/plb.12216>
- Djeke, P. S., Yéo, G. M., Alla, Y. L., Amian, A. R. F., Kouamé, P. K., Yapó, A. F., & Blé, M. C. (2023). Nutritional potential and apparent digestibility of organic matter, protein, and energy of two duckweeds (*Lemna minor* and *Lemna equinoctialis*) in juvenile tilapia *Oreochromis niloticus* (Brazil strain). *Journal of Aquaculture & Fisheries*, 7, 50. <https://doi.org/10.24966/AAF-5523/100050>
- Eck, M., Körner, O., & Jijakli, M. H. (2019). Nutrient cycling in aquaponics systems. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future* (pp. 231–246). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_9)
- El-Shafai, S. A., El-Gohary, F. A., Verreth, J. A. J., Schrama, J. W., & Gijzen, H. J. (2004). Apparent digestibility coefficient of duckweed (*Lemna minor*), fresh and dry for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquaculture Research*, 35(6), 574–586. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01055.x>

- Fabula, J.-R. G., Gavino, H. F., Sace, C. F., Cinense, M. M., Sicat, E. V., & Abucay, J. S. (2023). Growing conditions and system productivity in a closed-loop aquaponic system under varying stocking density. *Journal of Ecological Engineering*, 24(6), 25–39. <https://doi.org/10.12911/22998993/162210>
- FAO. (2017). *Water for sustainable food and agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf>
- FAO. (2024a). *The state of food and agriculture 2024 – Value-driven transformation of agrifood systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd2616en>
- FAO. (2024b). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue transformation in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Filep, R. M., Ilie, M., Patriche, N., Oprea, L., & Docan, A. (2016). Pilot aquaponic growing system of carp (*Cyprinus carpio*) and basil (*Ocimum basilicum*). *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 10, 255–260. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.09.062>
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199–4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Goddek, S., Espinal, C. A., Delaide, B., Jijakli, M. H., Schmutz, Z., Wuertz, S., & Keesman, K. J. (2016). Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach. *Water*, 8(7), 303. <https://doi.org/10.3390/w8070303>
- Hall, S. J., A. Delaporte, M. J. Phillips, M. Beveridge & M. O’Keefe. (2011). *Blue Frontiers: Managing the Environmental Costs of Aquaculture*. The WorldFish Center, Penang, Malaysia. <https://hdl.handle.net/20.500.12348/1145>
- Hillman, W. S. (1961). *The Lemnaceae, or duckweeds: A review of the descriptive and experimental literature*. *The Botanical Review*, 27(2), 221–287. <https://doi.org/10.1007/BF02860090>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). *Contas econômicas ambientais da água: Brasil: 2018–2020* (Contas Nacionais n. 93). IBGE. [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102001\\_informativo.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102001_informativo.pdf)
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Knaus, U., Wenzel, L. C., Appelbaum, S., & Palm, H. W. (2020). Aquaponics (s.l.) production of spearmint (*Mentha spicata*) with African catfish (*Clarias gariepinus*) in Northern Germany. *Sustainability*, 12(20), 8717. <https://doi.org/10.3390/su12208717>
- Leng, R. A., Stambolie, J. H., & Bell, R. (1995). Duckweed - a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish. *Livestock Research for Rural Development*. Volume 7(5). <http://www.lrrd.org/lrrd7/1/3.htm>

Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: The basics. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future* (pp. 113–132). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5)

Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2006). A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquaculture International*, 14(6), 539–550. <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2>;

Linnaeus, C. (1753). *Species plantarum* (Vol. 2). Laurentius Salvius

Luo, J., Chien, Y.-H., Taparhudee, W., Kitikiew, S., & Kantha, P. (2023). The effect of light-emitting diodes (LEDs) on the development of duckweed (*Lemna minor*) in co-culture with red tilapia (*Oreochromis* spp.). *Journal of Fisheries and Environment*, 47(2), 99–115. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/JFE/article/view/257433>

Martínez-Yáñez, R., Albertos-Alpuche, P. J., Guzmán-Mendoza, R., Robaina-Robaina, L. E., Álvarez-González, A., & Díaz-Plascencia, D. (2018). Production and chemical composition of hydrophytes cultivated in aquaponics. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 247–257. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1447>

Miltko, R., Majewska, M. P., Wojtak, W., Białek, M., Kowalik, B., & Czauderna, M. (2024). Comparing the chemical composition of lesser duckweed (*Lemna minor* L.) grown in natural and laboratory settings. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 33(3), 357–367. <https://doi.org/10.22358/jafs/189963/2024>

Nascimento, E. T. S., Pereira Junior, R. F., Reis, V. S., Gomes, B. d. J. F., Owatari, M. S., Luz, R. K., Melo, N. F. A. C., Santos, M. L. S., Palheta, G. D. A., & Sterzelecki, F. C. (2023). Production of late seedlings of açai (*Euterpe oleracea*) in an aquaponic system with tambaqui (*Colossoma macropomum*). *Agriculture*, 13(8), 1581. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081581>

Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., Little, D. C., Lubchenco, J., Shumway, S. E., & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591(7851), 551–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>

Opiyo, M. A., Mbogo, K., Abwao, J., Kyule, D., Amahwa, C., Nyonje, B. M., & Munguti, J. (2024). Fishmeal partial replacement using duckweed (*Lemna minor*) enhances growth performance and body composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Sustainable Aquatic Research*, 3(3), 127–136. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14555064>

Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Strauch, S. M., & Kotzen, B. (2019). Coupled aquaponics systems. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future* (pp. 163–199). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_7)

- Pinho, S. M., David, L. H. C., Goddek, S., Emerenciano, M. G. C., & Portella, M. C. (2021). Integrated production of Nile tilapia juveniles and lettuce using biofloc technology. *Aquaculture International*, 29, 37-56. <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00608-y>
- Popa, R., Moga, I. C., Rissdorfer, M. L. G., Ilis, M. L. G., Petrescu, G., Craciun, N., Matache, M. G., Covaliu, C. I., & Stoian, G. (2017). Duckweed utilization for fresh water conservation (management) in recirculated aquaculture systems. *International Journal of Conservation Science*, 8(4), 715–722. [https://ijcs.ro/public/IJCS-17-68\\_Popa.pdf](https://ijcs.ro/public/IJCS-17-68_Popa.pdf)
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics—Integrating fish and plant culture* (SRAC Publication No. 454). Southern Regional Aquaculture Center. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/recirculating-aquaculture-tank-production-systems-aquaponics-integrating-fish-and-plant-culture.html>
- Regni, L., Del Buono, D., Miras-Moreno, B., Senizza, B., Lucini, L., Trevisan, M., Morelli Venturi, D., Costantino, F., & Proietti, P. (2021). Biostimulant effects of an aqueous extract of duckweed (*Lemna minor* L.) on physiological and biochemical traits in the olive tree. *Agriculture*, 11(12), 1299. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121299>
- Rockström, J., Edenhofer, O., Gärtner, J., & DeClerck, F. (2020). Planet-proofing the global food system. *Nature Food*, 1(1), 3–5. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0010-4>
- Sandan, S., Yadav, A., Sharma, J., Sikarwar, A. S., & Chakrabarti, R. (2024). Potential of macrophytes as alternative fish feed ingredients for sustainable aquaculture. *African Journal of Biomedical Research*, 27(4s), 14767–14774. <https://doi.org/10.53555/AJBR.v27i4S.7405>
- Siddik, M. A. B., Francis, P., Rohani, M. F., Azam, M. S., Mock, T. S., & Francis, D. S. (2023). Seaweed and seaweed-based functional metabolites as potential modulators of growth, immune and antioxidant responses, and gut microbiota in fish. *Antioxidants*, 12(12), 2066. <https://doi.org/10.3390/antiox12122066>
- Sirakov, I., & Velichkova, K. (2018). The influence of aquaponically grown duckweed (*Lemna minuta* Kunth) used for composition of sustainable diets on hydrochemical and technological parameters in carp (*Cyprinus carpio* L.). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 18(9), 1037–1044. [https://doi.org/10.4194/1303-2712-v18\\_9\\_03](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v18_9_03)
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i4021e>
- Sumaila, U. R., & Tai, T. C. (2020). End overfishing and increase the resilience of the ocean to climate change. *Frontiers in Marine Science*, 7, 523. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00523>

Tacon, A. G. J., Hasan, M. R., & Metian, M. (2011). *Demand and supply of feed ingredients for farmed fish and crustaceans: Trends and prospects* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 564). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/ba0002e/ba0002e.pdf>

Tanuwiria, U. H., & Mushawwir, A. (2020). Hematological and antioxidants responses of dairy cow fed with a combination of feed and duckweed (*Lemna minor*) as a mixture for improving milk biosynthesis. *Biodiversitas*, 21(10), 4741–4746. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211038>

Tyson, R. V., Simonne, E. H., Treadwell, D. D., White, J. M., & Simonne, A. (2008). Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. *HortScience*, 43(3), 719–724. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.719>

Ullah, H., Gul, B., Khan, H., Akhtar, N., Rehman, K. U., & Zeb, U. (2022). Effect of growth medium nitrogen and phosphorus on nutritional composition of *Lemna minor* (an alternative fish and poultry feed). *BMC Plant Biology*, 22, 214. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03600-1>

Velichkova, K., Sirakov, I., & Veleva, P. (2020). Use of *Lemna minuta* Kunth for composition of sustainable diets and influence on hydrochemical, technological and blood biochemical parameters in common carp (*Cyprinus carpio* L.) cultivated in aquaponics recirculation systems. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 26(3), 674–679. [https://journal.agrojournal.org/page/en/details.php?article\\_id=2913](https://journal.agrojournal.org/page/en/details.php?article_id=2913)

Xu, J., Cui, W., Cheng, J. J., & Stomp, A.-M. (2011). Production of high-starch duckweed and its conversion to bioethanol. *Biosystems Engineering*, 110(2), 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.007>

Yildiz, H. Y., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces—A review. *Water*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.3390/w9010013>

Yilmaz, E., Akyurt, İ., & Günal, G. (2004). Use of duckweed, *Lemna minor*, as a protein feedstuff in practical diets for common carp, *Cyprinus carpio*, fry. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 4, 105–109.

Zhou, Y., Stepanenko, A., Kishchenko, O., Xu, J., & Borisjuk, N. (2023). Duckweeds for phytoremediation of polluted water. *Plants*, 12(3), 589. <https://doi.org/10.3390/plants12030589>

## **CAPÍTULO II.**

**Redução da taxa de arraçoamento associada à suplementação com lentilha-d'água (*Lemna aequinoctialis*) para juvenis de tilápia-do-nylo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico acoplado com produção de manjerição (*Ocimum basilicum*)**

**Jaboticabal, São Paulo**

**2025**

## RESUMO

Este estudo avaliou a suplementação com lentilha-d'água (*Lemna aequinoctialis*) *in natura*, associada à redução da taxa de arraçoamento, em juvenis de tilápia-do-nylo cultivados em sistema aquapônico acoplado com produção de manjerição sobre o desempenho zootécnico e parâmetros morfo-fisiológicos dos peixes, desempenho fitotécnico do manjerição, composição centesimal dos peixes e macrófita, custo de produção, e coeficiente de digestibilidade aparente de proteína bruta e energia da *L. aequinoctialis* e da ração comercial. Quatro tratamentos foram testados: Controle com taxa de arraçoamento diária de 5% do peso vivo (ração 100%), sem macrófita (R100) e taxas de arraçoamento correspondendo a 85%, 70% e 55% do tratamento controle (ou 4,25%, 3,5% e 2,75% do peso vivo por dia), denominados tratamentos R85, R70 e R55, respectivamente. Os tratamentos com restrição receberam lentilha-d'água até a saciedade aparente. O ensaio de digestibilidade da *L. aequinoctialis* resultou em coeficientes de 86,79% para proteína bruta e 72,22% para energia. Ao passo que, no ensaio de desempenho o tratamento R85 assegurou o crescimento dos peixes equivalente ao controle, melhorou a conversão alimentar, elevou a produtividade vegetal e reduziu o custo de produção. A partir de 3,5% de taxa de arraçoamento (R70), observou-se comprometimento do crescimento dos peixes, enquanto a produção de manjerição permaneceu elevada em R85 e R70, declinando em R55. Os menores rendimentos vegetais foram registrados em R100 e R55. A *L. aequinoctialis* apresentou 37,5% de proteína bruta, perfil favorável de aminoácidos essenciais (lisina, valina e leucina), além de concentrações expressivas de minerais como potássio, ferro, manganês e zinco. As carcaças dos peixes mantiveram teores semelhantes de proteína, com maior extrato etéreo no grupo controle. Os indicadores fisiológicos variaram entre os tratamentos; no intestino, houve diferenças na largura das vilosidades, sem alteração da altura; alterações histológicas hepáticas foram mais evidentes nos grupos com menor restrição de ração. Conclui-se que a inclusão de *L. aequinoctialis* fresca na alimentação dos peixes teve efeito positivo no compartimento vegetal e, associada à taxa de arraçoamento de 4,25% (R85), resultou no melhor desempenho zootécnico, maior produtividade vegetal e o menor custo de produção no ciclo completo.

**Palavras-chave:** aquicultura; aquaponia; manejo alimentar; sistemas integrados; macrófita.

## ABSTRACT

This study evaluated the supplementation of fresh duckweed (*Lemna aequinoctialis*), combined with reduced feeding rates, for Nile tilapia juveniles reared in a coupled aquaponic system with basil production, assessing effects on fish zootechnical performance and morphophysiological parameters, basil crop performance, proximate composition of fish and macrophyte, and production cost. In addition, the apparent digestibility coefficients (ADC) of crude protein and energy were determined for *L. aequinoctialis* and for the commercial feed. Four treatments were tested: a Control with a daily feeding rate of 5% of body weight (100% diet), without macrophyte (R100), and feeding rates corresponding to 85%, 70%, and 55% of the control (4.25%, 3.5%, and 2.75% of body weight per day), named R85, R70, and R55, respectively. The restricted-feeding treatments received duckweed to apparent satiety. The *L. aequinoctialis* digestibility assay yielded ADCs of 86.79% for crude protein and 72.22% for energy. In the performance trial, treatment R85 sustained fish growth equivalent to the control, improved feed conversion, increased plant productivity, and reduced production cost. From a feeding rate of 3.5% (R70) onward, fish growth was compromised, whereas basil production remained high in R85 and R70 and declined in R55. The lowest plant yields were recorded in R100 and R55. *L. aequinoctialis* contained 37.5% crude protein, a favorable essential amino acid profile (lysine, valine, and leucine), and notable concentrations of minerals such as potassium, iron, manganese, and zinc. Fish carcasses maintained similar protein levels, with higher ether extract in the control group. Physiological indicators varied among treatments; in the intestine, villus width differed without changes in villus height; hepatic histological alterations were more evident in groups with lower feed restriction. We conclude that including fresh *L. aequinoctialis* in the fish diet had a positive effect on the plant compartment and, when associated with a 4.25% feeding rate (R85), resulted in the best zootechnical performance, higher plant productivity, and the lowest production cost over the full production cycle.

**Keywords:** aquaculture; aquaponics; feeding management; integrated systems; macrophyte

## INTRODUÇÃO

A aquaponia é um sistema recirculante de água que integra piscicultura, hidroponia e sistemas de filtração com presença de microrganismo que permite converter resíduos dos peixes em nutrientes assimiláveis pelas plantas (Palm et al., 2018). Para esses sistemas, diferentes arranjos de acoplamento são descritos, incluindo sistemas permanentemente acoplados, nos quais a água circula continuamente entre os compartimentos aquícola e hidropônico, e sistemas acoplados sob-demanda, que permitem otimizar separadamente as condições e a gestão de nutrientes de cada módulo (Baganz et al., 2022). Do ponto de vista do manejo, a ração é a principal via de entrada de nutrientes no sistema; por isso, a taxa de arraçoamento determina a carga de amônia ao biofiltro e a nitrificação, modulando a disponibilidade de nutrientes às plantas. Além disso, resíduos sólidos oriundos da alimentação podem ser mineralizados para ampliar o suprimento às culturas (Tyson et al., 2011; Bittsanszky et al., 2016), conectando diretamente as decisões de alimentação ao balanço de nutrientes e ao desempenho do cultivo vegetal.

O manjericão (*Ocimum basilicum*) é uma espécie de reconhecida importância econômica e medicinal, amplamente utilizada na gastronomia, na perfumaria e na fitoterapia, cujos óleos essenciais e extratos apresentam propriedades antimicrobianas e antioxidantes relevantes (Azizah et al., 2023). De acordo com FAO et al.(2022), trata-se de uma hortaliça de crescimento rápido, com alta eficiência produtiva e ampla aceitação no mercado, o que a torna especialmente atrativa para a agricultura urbana e periurbana. Essa hortaliça apresenta boa adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, facilidade de manejo e potencial de produção em áreas com restrição hídrica (Pereira & Moreira, 2011), o que a torna adequada para sistemas com recirculação de água. É uma planta herbácea aromática amplamente valorizada por seus usos culinários, medicinais e industriais, apresentando folhas ricas em compostos bioativos como linalol, eugenol e metil chavicol, responsáveis por seu aroma característico e propriedades funcionais de interesse em diversos segmentos (Carović-Stanko et al., 2010; Vieira & Simon, 2000).

Além da sua relevância econômica, o manjericão *O. basilicum* apresenta crescimento rápido e bom aproveitamento dos nutrientes provenientes do efluente de peixes, características que favorecem seu cultivo em sistemas aquapônicos. Em razão de sua

adaptabilidade e valorização comercial, o manjeriço tem sido amplamente utilizado como espécie vegetal em pesquisas voltadas ao aprimoramento de sistemas de produção sustentáveis, como a aquaponia (Rakocy et al., 2006). Estudos recentes demonstram que essa hortaliça apresenta crescimento vigoroso, boa qualidade comercial e eficiência no uso de recursos quando cultivada em diferentes arranjos aquapônicos. Mourantian et al. (2023) observaram que o manjeriço cultivado em sistema aquapônico desacoplado apresentou crescimento e desempenho fotossintético comparáveis ou superiores à hidroponia, destacando-se como uma alternativa promissora para sistemas sustentáveis. Resultados semelhantes foram reportados por Heo et al. (2024), que verificaram um aumento de 60 % a 70 % no rendimento foliar do manjeriço em aquaponia comparado à hidroponia convencional. Esses achados reforçam o potencial da espécie como cultura adequada para sistemas integrados.

A tilápia-do-nylo (*Oreochromis niloticus*) é amplamente adotada como espécie de referência em aquaponia. Essa espécie reúne atributos de interesse produtivo tais como a plasticidade alimentar, rápido crescimento, ampla tolerância a variações de qualidade de água e boa adaptação a sistemas intensivos, que facilitam o manejo integrado com plantas e a operação em recirculação (El-Sayed, 2006). Em levantamentos internacionais, a tilápia desponta consistentemente como a espécie mais utilizada pois, 55% dos entrevistados praticantes de aquaponia criavam tilápia (Love et al., 2014), e, em amostras focadas em operações comerciais, a participação atingiu cerca de 69% (Love et al., 2015), refletindo a popularidade da espécie. No Brasil, além da ampla disponibilidade tecnológica e de mercado, a relevância econômica é notória. A tilápia respondeu por 65,3% da produção de peixes cultivados em 2023 (Peixe BR, 2024), reforçando seu papel estratégico como espécie âncora em arranjos integrados como a aquaponia. Além disso, o uso de alimentos não convencionais, como as fontes vegetais, tem se mostrado uma alternativa promissora para tilápias, pois em muitos casos mantém ou até melhora o desempenho produtivo dessa, ao mesmo tempo em que reduz a dependência de insumos tradicionais e fortalece a sustentabilidade do setor (Zuluaga-Hernández et al., 2023).

A lentilha-d'água *Lemna minor* é uma macrófita flutuante de crescimento muito rápido, apontada como uma das angiospermas de crescimento mais veloz, com alta capacidade de absorver nutrientes de efluentes aquícolas (Acosta et al., 2021). Além

disso, há décadas essa macrófita é apontada como alimento para organismos aquáticos e outros animais, com relatos de consumo por diferentes espécies de peixes (Hillman, 1961). Seu uso na alimentação pode ocorrer tanto *in natura* (Cipriani, et al., 2021) como na forma de farinha incluída na ração (Goswami et al., 2022; Opiyo et al., 2024). A forma de farinha é a mais recorrente em formulações experimentais, e também há relatos de seu uso fermentado (Herawati et al., 2020).

No estudo de Cipriani et al. (2021) foi relatado que a ingestão de *L. minor* fresca pode fornecer nutrientes às tilápias, configurando-se como uma estratégia complementar de alimentação em sistemas aquícolas com potencial para contribuir à sustentabilidade produtiva. Estes pesquisadores avaliaram o fornecimento direto de *L. minor* para juvenis de tilápia em sistemas de recirculação, observando aceitação imediata e consumo regular da planta. Em outro estudo avaliando um modelo de co-cultura orientado à aquaponia, Luo et al. (2023) testaram a substituição parcial da ração peletizada por biomassa de *L. minor* na alimentação da tilápia vermelha (0%, 5% ou 10% da oferta diária, em peso) e registraram maior ganho em peso, maior taxa de crescimento e melhor conversão alimentar nos grupos com lentilha. Com base nesses achados, os autores recomendam a inclusão de pelo menos 5% de *Lemna* na dieta. Ainda, El-Shafai et al. (2004) avaliaram a digestibilidade desse alimento e verificaram que a inclusão de até 20% da macrófita fresca na alimentação não comprometeu a taxa de crescimento específica e a conversão alimentar em comparação ao tratamento controle.

O uso de ingredientes de origem vegetal demanda uma avaliação ponderada quanto à sua viabilidade nutricional e tecnológica. Além disso, custos com alimentação representam uma das maiores parcelas das despesas na produção aquícola, sendo determinante para sustentabilidade econômica e ambiental do setor (Kause et al., 2022). A avaliação econômica é apontada como um dos principais desafios para o avanço da aquaponia comercial, já que a maior parte das pesquisas até o momento concentrou-se em aspectos técnicos e ainda há escassez de estudos quantitativos que comprovem sua viabilidade financeira. Estudos como o de Goddek et al. (2015) destacam que análises de custo são fundamentais para validar a competitividade do sistema frente a modelos convencionais de produção e apoiar sua expansão em larga escala. Nesse cenário, a aquicultura tem se apoiado na adaptação de metodologias originalmente desenvolvidas para a agricultura, como as propostas por Matsunaga et

al. (1976) e sistematizadas por Martin et al. (1998), que permitem organizar os custos em categorias operacionais e calcular indicadores como o custo por unidade produzida. Essa base metodológica tem sido amplamente empregada e adaptada em estudos de piscicultura e aquaponia, fornecendo instrumentos consistentes para avaliar a viabilidade econômica de diferentes estratégias produtivas, como a escolha das espécies produzidas.

Nesse estudo, destacamos a alternativa do uso da lentilha-d'água na forma fresca como suplemento ou complemento alimentar, aliado à ração comercial. Essa alternativa, evita as etapas de processamento, secagem e armazenamento da biomassa, que são logisticamente complexas e pouco eficientes quando se trabalha com grandes volumes de material com alto teor de umidade (Santhoshkumar et al., 2023). A maioria dos estudos disponibilizados na literatura realiza o processamento da *Lemna* na formulação das dietas, embora a planta também possa ser administrada *in natura*, o que representa uma alternativa viável em sistemas integrados, com potencial para redução de custos e simplificação do manejo. Todavia, não há estudos conclusivos sobre como a associação desse complemento alimentar em sistemas aquapônicos influencia o desenvolvimento de peixes e plantas. Diante disso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar, em aquaponia permanentemente acoplada, como a suplementação com *Lemna aequinoctialis* e a redução da taxa de arraçoamento impactam o desempenho e indicadores morfo-fisiológicos das tilápias e a resposta do manjerição, assim como determinar a composição centesimal da macrófita e das carcaças dos peixes, realizar avaliação fisiológica dos peixes e os custos de produção de cada tratamento.

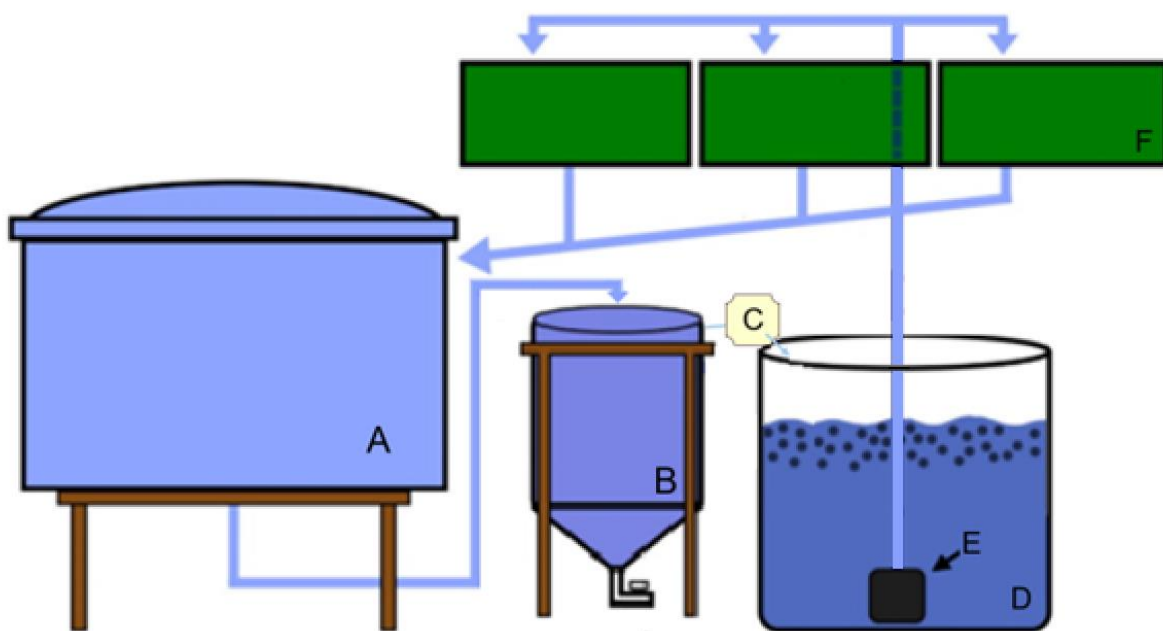
## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização e estrutura

O estudo foi conduzido no *CityFood Living Lab*, uma estufa de aquaponia de 100 m<sup>2</sup>, localizada no Centro de Aquicultura da Universidade Estadual Paulista (CAUNESP), em Jaboticabal - São Paulo, Brasil, durante a estação da primavera. A pesquisa foi realizada sob autorização do Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA – Protocolo nº 3474/2024).

A estufa possuía cobertura plástica e tela de sombreamento (sombrite) laterais e sob o teto da estufa, que reduzia a incidência luminosa em 40%. Tanto a cobertura plástica lateral quanto a tela superior eram móveis, permitindo ajustes conforme as condições ambientais. O plástico lateral era utilizado integralmente apenas durante a noite ou em situações de queda de temperatura. A água utilizada para o abastecimento inicial dos tanques e reposição das perdas por evapotranspiração das plantas foi proveniente de um poço artesiano. A aeração dos tanques de peixes, leito de plantas e biofiltros foi realizada por meio de compressor radial (soprador), com distribuição do ar por tubulação de PVC, mangueiras convencionais e microporosadas.

A estufa possuía 16 unidades experimentais de aquaponia em configuração permanentemente acoplada e operavam como um sistema de recirculação (RAS), integrando os compartimentos de aquaponia e de hidroponia a partir do fluxo de água por gravidade e motobomba submersa (Sarlo Better® SB1000c) com vazão de 1000 L h<sup>-1</sup>. Cada unidade consistia em um tanque de peixes (380 litros), um tanque de sedimentação (100 litros), um tanque de biofiltro com mídias flutuantes (180 litros) e três leitos de cultivo de plantas (60 litros cada) (Figura 1).



**Figura 1.** Desenho ilustrativo do sistema de aquaponia permanentemente acoplado de cada unidade experimental. A - tanque de peixes; B - tanque de sedimentação; C – filtro mecânico (bag); D - biofiltro; E – bomba submersa; F – leitos hidropônicos.

### **Digestibilidade aparente da ração comercial e da *Lemna aequinoctialis***

Anterior ao ensaio com desempenho, foi determinado os coeficientes de digestibilidade aparente (CDA) da proteína bruta (DAPB) e da energia bruta (DAEB) da ração comercial e da biomassa de *L. aequinoctialis* utilizadas neste estudo. Foi empregado o método de coleta indireta de fezes com marcador inerte conforme descrito pelo protocolo do laboratório de Guelph. Para isso, foram testadas duas dietas: uma contendo 100% de ração comercial extrusada (grânulos de 3–4 mm, 36% de proteína bruta – SUPRA®), e uma dieta experimental composta por 70% dessa mesma ração comercial e 30% de biomassas de macrófita. A biomassa de lentilha-d'água foi previamente triada para remoção de impurezas grosseiras (como folhas e galhos), seca em estufa ventilada a 40 °C até peso constante, moída e peneirada até obtenção de farinha homogênea. A ração comercial também foi moída para padronização granulométrica. Em seguida, as dietas foram formuladas com adição de óxido de cromo ( $Cr_2O_3$ ) a 0,5% como marcador inerte. A mistura dos ingredientes foi realizada manualmente, com adição de água (50% do peso total), e a massa foi

processada em moedor de carne para formação dos pellets. Os pellets foram secos em estufa a 40 °C e armazenados sob refrigeração até o uso.

Foram utilizados 56 juvenis de tilápia-do-nylo (*O. niloticus*) com peso médio inicial de 144,6 ± 10,47 g, distribuídos em 8 tanques de 100 litros (volume útil), com sete peixes por unidade experimental. As duas dietas foram testadas em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições por tratamento. Os peixes foram alimentados três vezes ao dia até a saciedade aparente durante sete dias consecutivos (período de adaptação). No oitavo dia, após a alimentação matinal e um período de 30 minutos, os animais foram transferidos para tanques de fundo cônico para coleta de fezes, as quais foram retiradas com sifão a cada 30 minutos, congeladas e posteriormente liofilizadas para análise bromatológica.

A digestibilidade aparente (DA) da proteína e energia bruta nas dietas foi calculada com base no uso de óxido de cromo (Furukawa & Tsukahara, 1966) como marcador inerte, utilizando a seguinte expressão (Nose, 1966):

$$DA (\%) = 100 \times \left[ 1 - \left( \frac{Cr_{\{dieta\}}}{Cr_{\{fezes\}}} \right) \times \left( \frac{Nutriente_{\{fezes\}}}{Nutriente_{\{dieta\}}} \right) \right]$$

Onde:

- $Cr_{\{dieta\}}$  = concentração de óxido de cromo na dieta (%),
- $Cr_{\{fezes\}}$  = concentração de óxido de cromo nas fezes (%),
- $Nutriente_{\{dieta\}}$  = teor de proteína bruta ou energia bruta na dieta (% ou kcal/kg),
- $Nutriente_{\{fezes\}}$  = teor correspondente nas fezes.

Para estimar especificamente a digestibilidade aparente da *L. aequinoctialis*, utilizou-se o método de substituição descrito por Bureau et al. (1999), adaptado de Sugiura et al. (1998):

$$DA_{\{ing\}} = DA_{\{teste\}} + \frac{(1 - s) D_{\{ref\}}}{s D_{\{ing\}}} (DA_{\{teste\}} - DA_{\{ref\}})$$

Onde:

- $DA\{ing\}$  = digestibilidade aparente do ingrediente
- $DA\{teste\}$  = digestibilidade do nutriente na dieta-teste (70% ração + 30% macrófita),
- $DA\{ref\}$  = digestibilidade aparente do nutriente da dieta-referência (100% ração),
- $s$  = fração do ingrediente teste na dieta
- $D\{ref\}$  = teor do nutriente na dieta-referência
- $D\{ing\}$  = teor do nutriente no ingrediente teste

### **Delineamento Experimental**

O experimento foi conduzido em um sistema aquapônico do tipo *deep-water culture* (DWC), permanentemente acoplado, no qual o manjeriço foi cultivado em três leitos hidropônicos dispostos em linha. Cada leito apresentava área superficial de 0,42 m<sup>2</sup>, totalizando 1,26 m<sup>2</sup> de área de cultivo por unidade experimental. Na mesma estrutura, os peixes foram mantidos em tanques com capacidade total de 500 litros e volume útil de 380 litros (0,38 m<sup>3</sup>).

Foram utilizadas dezesseis unidades experimentais independentes, distribuídas aleatoriamente em quatro tratamentos, com quatro repetições cada. Os tratamentos foram estabelecidos com base em níveis decrescentes de taxa de arraçoamento, de acordo com a biomassa total de peixes, com fornecimento complementar de lentilha-d'água fresca até a saciedade aparente, exceto no grupo controle em que os peixes recebiam apenas ração. A taxa de arraçoamento do tratamento controle foi definida conforme as recomendações do fabricante da ração utilizada (Supra® Tilápia 36% PB, 3 mm). A composição dos tratamentos foi a seguinte:

#### ➤ **Tratamento Controle (R100):**

Oferta exclusiva de ração comercial (100% ração), na taxa de 5,0% da biomassa total dos peixes;

Ausência de fornecimento de lentilha-d'água.

➤ **Tratamento R85:**

Taxa de arraçoamento de 85% do controle, correspondendo a 4,25% da biomassa total dos peixes;

Suplementação com *L. aequinoctialis* fresca até a saciedade aparente.

➤ **Tratamento R70:**

Taxa de arraçoamento de 70% do controle, correspondendo a 3,5% da biomassa total dos peixes;

Suplementação com *L. aequinoctialis* fresca até a saciedade aparente.

➤ **Tratamento R55:**

Taxa de arraçoamento de 55% do controle, correspondendo a 2,75% da biomassa total dos peixes;

Suplementação com *L. aequinoctialis* fresca até a saciedade aparente.

A ração foi fornecida diariamente, com ajuste semanal da quantidade com base na biomassa estimada dos peixes em cada unidade experimental, obtida a partir da pesagem de aproximadamente 20% dos animais presentes.

### **Cultivo e parâmetros de crescimento do manjeriço**

Foram utilizadas 144 mudas de manjeriço (*Ocimum basilicum*), adquiridas de produtor idôneo na região de Jaboticabal – SP. As mudas, com aproximadamente 30 dias, apresentavam peso médio inicial de  $9,84 \pm 1,02$  g e altura média de  $17,09 \pm 1,44$  cm. Após sete dias da instalação dos peixes nas unidades experimentais, as plantas foram transferidas para blocos flutuantes de poliestireno, com três mudas por leito, totalizando nove mudas por unidade experimental e uma densidade de plantio de 7,2 mudas  $m^{-2}$ . O ciclo de cultivo teve duração de 51 dias, com uma poda realizada aos 27 dias após o transplante, visando estimular o crescimento vegetativo. Todas as plantas foram podadas a 15 cm da base, e a biomassa removida foi coletada, pesada e registrada. O controle fitossanitário foi realizado com aplicação semanal de óleo de neem, e todos os sistemas aquapônicos receberam  $2 \text{ mg L}^{-1}$  de fertilizante

hidropônico de quelato de ferro (SQM®), aplicado no início do cultivo e reaplicado após 25 dias.

Ao final do experimento, as plantas foram colhidas no início da manhã e transportadas ao laboratório para pesagem e medições morfológicas. Os parâmetros de crescimento avaliados incluíram: comprimento radicular, altura da parte aérea, peso fresco da raiz e da parte aérea e peso seco total. O peso seco foi determinado após secagem das amostras em estufa de ventilação forçada a 60 °C, até peso constante. A produtividade foi estimada com base na biomassa total fresca acumulada ao longo do ciclo de cultivo, considerando-se a área efetivamente ocupada pelas plantas.

### **Animais e manejo alimentar**

Após as devidas autorizações, 1120 juvenis de tilápia foram adquiridos do Laboratório de Tilapicultura do CAUNESP, localizado em Jaboticabal – SP. Os animais foram transportados ao laboratório e deixados em aclimatação por sete dias. Durante esse período, os peixes foram alimentados três vezes ao dia até saciedade aparente. A partir dos registros de consumo deste período, foi confirmada a adequação da taxa de arraçoamento sugerida no estudo. Ao início do período experimental, os juvenis foram sedados utilizando eugenol na concentração de 30 mg L<sup>-1</sup>, pesados e distribuídos nos tanques da estufa com densidade de estocagem inicial de 184,2 peixes m<sup>-3</sup>, sendo 70 peixes por unidade. Cada tanque de peixe recebeu em média 0,72 ± 0,03 quilogramas de biomassa total e com peso médio individual de 10,29 ± 0,05 gramas. Os peixes foram alimentados três vezes ao dia, nos horários de 8h30, 12h30 e 16h30. No horário das 12h30, os peixes que recebiam lentilha-d'água eram alimentados até a saciedade aparente, enquanto a ração era fornecida em duas porções: 50% no início do dia e o restante no final. Já no tratamento controle (R100), os peixes recebiam apenas ração, distribuída igualmente entre as três refeições diárias. Após 20 dias de experimento, 15 peixes de cada unidade experimental foram removidos, reduzindo a densidade para 144,7 peixes m<sup>-3</sup>

Ao fim do período experimental os peixes foram despescados dos tanques para biometria e coleta de amostras. Todos os peixes foram pesados para mensurar a biomassa total e uma amostra de seis peixes por tanque foi coletada para pesagem individual e mensuração do comprimento total e padrão.

## Desempenho zootécnico

Para a avaliação do desempenho zootécnico dos juvenis de tilápia-do-nylo, foram consideradas as seguintes variáveis zootécnicas, com suas respectivas fórmulas de cálculo:

- **Taxa de sobrevivência (%):**

$$S (\%) = 100 \times (\text{número final de peixes} \div \text{número inicial de peixes})$$

- **Ganho em peso (GP, g):**

$$GP = P_f - P_i$$

- **Taxa de crescimento específico (TCE, % dia<sup>-1</sup>):**

$$TCE = [(\ln P_f - \ln P_i) \div \text{número de dias}] \times 100$$

- **Conversão alimentar aparente (CAA):**

$$CAA = RC \div GP$$

- **Produtividade (kg m<sup>-3</sup>):**

$$\text{Produtividade} = \text{Biomassa final} \div \text{Volume útil do tanque}$$

Onde:

$P_i$  = peso inicial (g);

$Pf$  = peso final (g);

$RC$  = ração consumida (g);

$GP$  = ganho em peso (g);

### **Cultivo e manejo de *Lemna aequinoctialis***

Uma amostra de *Lemna* utilizada neste estudo foi encaminhada para identificação taxonômica no Herbário JABU (UNESP/Jaboticabal), onde foi identificada morfológicamente como *Lemna aequinoctialis* Welw. O material testemunho foi tombado em forma de exsicata na coleção do Herbário JABU.

A biomassa de lentilha-d'água foi cultivada em quatro tanques circulares de concreto (manilhas) com aproximadamente 800 litros de volume útil. Os tanques eram localizados fora da estufa experimental, expostos às condições ambientais. Eram cobertos com malha de sombreamento, preenchidos com a mesma água de abastecimento da estufa experimental e fertilizados semanalmente com 400 gramas de fertilizante inorgânico (NPK 4-14-8). Momentos antes da alimentação dos peixes, as lentilhas eram colhidas com puçá de malha fina e levemente prensadas manualmente para remoção do excesso de água. Em seguida, a biomassa era transferida para um balde, lavada com água corrente, enquanto partículas de sujeira e galhos eram removidos. Após essa etapa, a biomassa era homogeneizada para pesagem e posterior porcionamento.

Todos os tratamentos, com exceção do controle, recebiam alimentação de *L. aequinoctialis ad libitum* uma vez ao dia. Para isso, uma quantidade previamente determinada, era pesada e distribuída em bandejas plásticas. Os animais eram alimentados até a saciedade aparente e a quantia fornecida era registrada. Durante o período experimental, parte do material foi submetida à secagem em estufa a 55 °C e armazenada sob refrigeração para posterior análise de composição centesimal.

### **Parâmetros físico-químicos da água**

Os parâmetros de qualidade da água foram monitorados ao longo do experimento utilizando sondas multiparamétricas (modelos HI98193 e HI98195 Hanna®) e

métodos químicos específicos. O oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ), a temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ), o pH e a condutividade elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) foram mensurados diariamente por sonda, no período da manhã e da tarde. As concentrações de amônia total, nitrito, nitrato e ortofosfato ( $\text{mg L}^{-1}$ ) foram aferidos semanalmente. As determinações de nitrito e ortofosfato foram realizadas conforme metodologias adaptadas de Golterman (1978), enquanto para determinação de amônia e nitrato se utilizou medidor de bancada com eletrodos de íon específico (modelo HI5521-02 Hanna®).

### **Análises bromatológicas**

As análises bromatológicas foram realizadas com o objetivo de determinar a composição centesimal da *L. aequinoctialis*, da ração comercial utilizada, das dietas e fezes do ensaio de digestibilidade e da carcaça dos peixes. As amostras foram analisadas no Laboratório de Análises Nutricionais do CAUNESP (LANCAU), seguindo os protocolos descritos pela AOAC (2000). A matéria seca foi determinada por meio da secagem das amostras em estufa a  $40^{\circ}\text{C}$  até peso constante. A proteína bruta foi quantificada pelo método de Kjeldahl, a partir da destilação do nitrogênio, enquanto o teor de gordura bruta foi determinado por extração em aparelho de Soxhlet, utilizando éter de petróleo como solvente. A concentração de cinzas foi determinada pelo método gravimétrico, incinerando as amostras em forno mufla a  $600^{\circ}\text{C}$ . A fibra bruta foi quantificada conforme metodologia descrita por Silva e Queiroz (2009). Além disso, o valor energético dos ingredientes foi obtido por meio de bomba calorimétrica adiabática, permitindo estimar o conteúdo de energia bruta ( $\text{kcal g}^{-1}$ ) das amostras.

Também foram realizadas análises de perfil de aminoácidos e a quantificação de macro e microminerais. O aminograma total, com exceção do triptofano, foi determinado por cromatografia líquida (HPLC) após hidrólise ácida das amostras e derivatização dos aminoácidos. A análise de minerais foi conduzida por espectrometria, abrangendo os macrominerais cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg), enxofre (S), potássio (K) e nitrogênio total (N), bem como os microminerais ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e manganês (Mn). A ração utilizada no estudo também foi analisada pelos mesmos métodos.

## **Avaliações fisiológicas**

Três peixes por unidade experimental foram amostrados e levados à mesa de dissecação para mensurações morfossomáticas e coleta de tecidos. Cada animal foi pesado individualmente (peso corporal total, g). Em seguida, fígado e gordura visceral foram removidos e pesados em balança de precisão. Com esses dados, calcularam-se o índice hepatossomático (IHS =  $[\text{peso do fígado}/\text{peso corporal total}] \times 100$ ) e o índice lipossomático (ILS =  $[\text{peso da gordura visceral}/\text{peso corporal total}] \times 100$ ), ambos expressos em % do peso corporal.

Para histologia, fragmentos de fígado e da porção média do intestino foram fixados em formol tamponado a 10% por 24 h e transferidos para álcool 70%. O intestino foi seccionado em anéis transversais e em cortes longitudinais abertos. Os tecidos foram processados por rotina histológica (desidratação em etanol crescente, diafanização em xilol e inclusão em parafina), seccionados a  $\sim 5 \mu\text{m}$  em micrótomo rotativo, montados em lâminas e corados com hematoxilina e eosina. As lâminas foram analisadas e fotografadas em microscópio óptico (objetivas 10× e 40×).

Três peixes por repetição (total de 12 por tratamento) foram amostrados para bioquímica sanguínea. Avaliaram-se glicose, colesterol, triglicerídeos, proteína total e albumina. O sangue foi coletado por punção da veia caudal com seringas esterilizadas. As amostras em *ependorfs* foram centrifugadas a 3000 rpm por 10 min para separação do soro, coletado cuidadosamente e mantido sob refrigeração até as análises. As determinações foram realizadas com kits comerciais Labtest®, conforme instruções do fabricante, e as leituras efetuadas em espectrofotômetro nos comprimentos de onda específicos de cada parâmetro.

## **Análise de custo**

Com o objetivo de complementar a avaliação técnica do experimento, foi realizada uma análise de custo de produção dos tratamentos. A estruturação dos custos seguiu metodologias previamente aplicadas em estudos de viabilidade econômica em aquicultura (Castilho-Barros et al., 2020; Nogueira & Henriques, 2020; Henriques et al., 2022). Foram consideradas duas categorias principais: o custo operacional efetivo (COE), que incluiu todas as despesas diretamente relacionadas à produção (insumos,

energia elétrica e mão de obra), e o custo operacional total (COT) que acresce os encargos sociais aplicados com base na folha de pagamentos dos funcionários registrados (Funcionários fixos). Neste estudo, não foram consideradas as depreciações das estruturas ou dos equipamentos.

Para tanto, foram avaliadas duas condições:

- Fase A: Correspondente ao primeiro terço do experimento (20 dias), período em que foi realizada a remoção de parte dos peixes para ajuste da densidade de estocagem. Para fins de contextualização, utilizou-se como referência a comercialização de milheiro de juvenis de 30 g, conforme prática comum na aquicultura. Embora o cultivo do manjericão já tivesse sido iniciado nesse período, a colheita ainda não havia ocorrido, de modo que foram contabilizados apenas os custos relacionados ao plantio das mudas.
- Fase B: Contemplou todo o ciclo experimental, incluindo o crescimento completo dos peixes e do manjericão. Nessa condição, a produção aquícola foi considerada com base na biomassa final da tilápia, expressa em quilogramas, enquanto a produção vegetal foi contabilizada a partir da massa fresca de manjericão colhida ao final do ciclo

Além disso, para a análise econômica do sistema aquapônico, conforme ilustrado na Tabela 1, adotou-se a estratégia de alocação proporcional dos custos operacionais entre os componentes aquícola e hidropônico, esse método foi adaptado de estudos econômicos de aquaponia que distinguem custos exclusivos de cada subsistema daqueles compartilhados e recomendam transparência na estrutura de custos (Rupasinghe & Kennedy, 2010; Tokunaga et al., 2015). Assim, itens exclusivos como mudas e juvenis foram atribuídos 100% ao respectivo módulo, enquanto itens compartilhados foram rateados por função e intensidade de uso observada no sistema.

**Tabela 1.** Alocação proporcional dos custos operacionais entre os componentes hidropônico e aquícola em sistema aquapônico.

Item/Despesa	Hidroponia (%)	Piscicultura (%)
Mão de Obra Fixa	30	70
Mão de Obra Temporária	30	70
Juvenis de Tilápia	0	100
Ração	20	80
Outros Insumos	40	60
Mudas	100	0
Energia Elétrica	50	50

Cabe salientar que uma das repetições do tratamento R70 foi desconsiderada por inconsistências verificadas durante a biometria final, o que poderia comprometer a representatividade dos dados. A partir dessas informações, foram calculados o custo por quilo de peixe e o custo por quilo de manjerição fresco

### **Análise Estatística**

As análises estatísticas foram conduzidas utilizando a linguagem *Python*, com o apoio de bibliotecas específicas para organização, modelagem e análise dos dados. A biblioteca *pandas* foi utilizada para estruturação e manipulação das bases de dados, enquanto *statsmodels* foi empregada para o ajuste de modelos lineares e realização das análises de variância (ANOVA). Para os dados de desempenho zootécnico e qualidade da água, a normalidade foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk, e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Para os dados de crescimento vegetal, os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias foram avaliados, respectivamente, pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett. Quando ambos os pressupostos foram atendidos, os dados foram submetidos à ANOVA, seguida pelo teste de Tukey para comparação de médias. O nível de significância adotado em todas as análises foi de 5% ( $p < 0,05$ ).

## RESULTADOS

### **Digestibilidade aparente da ração comercial e da *Lemna aequinoctialis***

A dieta controle, composta exclusivamente por ração comercial, apresentou DAPB de 76,86% e DAEB de 70,94%. A outra dieta formulada contendo 70% da ração comercial e o restante de biomassa de *L. aequinoctialis*, apresentou variações nos coeficientes de digestibilidade observados, mantendo valores ligeiramente superiores à dieta controle (DAPB de 79,72% e DAEB de 71,31%). Adicionalmente, foi utilizada a metodologia descrita por Bureau et al. (1999) adaptada de Sugiura et al. (1988) para estimar a digestibilidade aparente individual da macrófita *L. aequinoctialis*. Foram verificados valores elevados de digestibilidade, com DAPB de 86,79% e DAEB de 72,22%.

### **Parâmetros de crescimento do manjeriço**

Os parâmetros de crescimento do manjeriço ao final do experimento são apresentados na Tabela 2. De modo geral, os tratamentos R70 e R85 apresentaram os melhores resultados, com valores significativamente superiores de peso de raiz, peso aéreo, peso total úmido, peso total seco e produtividade por área, quando comparados aos demais grupos. Em contraste, os tratamentos R55 e R100 apresentaram os menores valores, com diferença significativa em relação a R85 para quase todos os parâmetros analisados. O comprimento de raiz e o comprimento aéreo, por outro lado, não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos.

**Tabela 2.** Índices de produção vegetal de manjeriço (média  $\pm$  desvio-padrão) após 59 dias de cultivo em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com *Lemna aequinoctialis in natura*.

Parâmetro	R100	R85	R70	R55
Peso raiz (g)	68,49 $\pm$ 5,79 <sup>b</sup>	105,29 $\pm$ 16,29 <sup>a</sup>	91,04 $\pm$ 4,40 <sup>ab</sup>	65,11 $\pm$ 17,40 <sup>b</sup>
Peso aéreo (g)	207,07 $\pm$ 25,89 <sup>b</sup>	374,47 $\pm$ 29,87 <sup>a</sup>	307,10 $\pm$ 41,46 <sup>ab</sup>	203,19 $\pm$ 49,62 <sup>b</sup>
Comprimento de raiz (cm)	47,75 $\pm$ 6,24	51,86 $\pm$ 2,93	49,92 $\pm$ 2,66	47,65 $\pm$ 4,94
Comprimento aéreo (cm)	48,50 $\pm$ 8,17	52,50 $\pm$ 5,96	52,80 $\pm$ 1,22	52,51 $\pm$ 4,73
Peso total úmido (g)	275,56 $\pm$ 28,09 <sup>b</sup>	479,75 $\pm$ 46,06 <sup>a</sup>	398,14 $\pm$ 42,79 <sup>ab</sup>	268,30 $\pm$ 66,85 <sup>b</sup>
Peso total seco (g)	33,35 $\pm$ 2,70 <sup>b</sup>	51,28 $\pm$ 8,83 <sup>a</sup>	45,02 $\pm$ 8,06 <sup>ab</sup>	40,37 $\pm$ 3,67 <sup>ab</sup>
Produtividade kg m <sup>-2</sup>	0,22 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>	0,38 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	0,32 $\pm$ 0,03 <sup>ab</sup>	0,21 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>

Letras distintas indicam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey a 5% ( $p < 0,05$ ).

Na Tabela 3, são apresentados os valores médios de peso e comprimento dos ramos podados das plantas de manjeriço aos 27 dias após o transplante, representando a biomassa removida na primeira poda sem diferenças significativas entre os tratamentos.

**Tabela 3.** Peso e comprimento médio dos ramos de manjeriço removidos na poda realizada aos 27 dias após o transplante

	R100	R85	R70	R55
Peso (g)	9,46 $\pm$ 0,91	12,09 $\pm$ 0,64	10,83 $\pm$ 0,78	9,53 $\pm$ 1,53
Comprimento (cm)	21,94 $\pm$ 3,24	21,42 $\pm$ 2,33	22,91 $\pm$ 3,52	22,94 $\pm$ 1,49

### Parâmetros físico-químicos da água

Os valores médios dos parâmetros de qualidade da água medidos nos períodos da manhã (8h00) e da tarde (17h00) estão apresentados na Tabela 4. De maneira geral, os dados indicam que o sistema se manteve estável ao longo do experimento e não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, com exceção do pH no período vespertino. Os parâmetros mensurados se mantiveram dentro da faixa adequada para o cultivo de tilápias.

**Tabela 4.** Parâmetros de qualidade da água (média  $\pm$  desvio-padrão) coletados diariamente pela manhã e tarde em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com *Lemna aequinoctialis in natura*.

Parâmetro	R100	R85	R70	R55
<b>MANHÃ</b>				
Temperatura (°C)	24,71 $\pm$ 0,19	24,81 $\pm$ 0,13	24,74 $\pm$ 0,13	24,71 $\pm$ 0,17
Oxigênio Dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	5,86 $\pm$ 0,08	5,84 $\pm$ 0,09	6,00 $\pm$ 0,32	6,14 $\pm$ 0,09
pH	6,94 $\pm$ 0,02	6,98 $\pm$ 0,07	6,99 $\pm$ 0,03	7,01 $\pm$ 0,01
Condutividade Elétrica (mS cm <sup>-1</sup> )	0,563 $\pm$ 0,06	0,497 $\pm$ 0,10	0,423 $\pm$ 0,03	0,513 $\pm$ 0,09
<b>TARDE</b>				
Temperatura (°C)	27,94 $\pm$ 0,09	28,19 $\pm$ 0,23	28,16 $\pm$ 0,37	28,03 $\pm$ 0,17
Oxigênio Dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	5,28 $\pm$ 0,10	5,25 $\pm$ 0,09	5,47 $\pm$ 0,43	5,58 $\pm$ 0,13
pH	6,80 $\pm$ 0,03 <sup>ab</sup>	6,77 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>	6,73 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	6,85 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>
Condutividade Elétrica (mS cm <sup>-1</sup> )	0,567 $\pm$ 0,06	0,502 $\pm$ 0,08	0,424 $\pm$ 0,04	0,488 $\pm$ 0,08

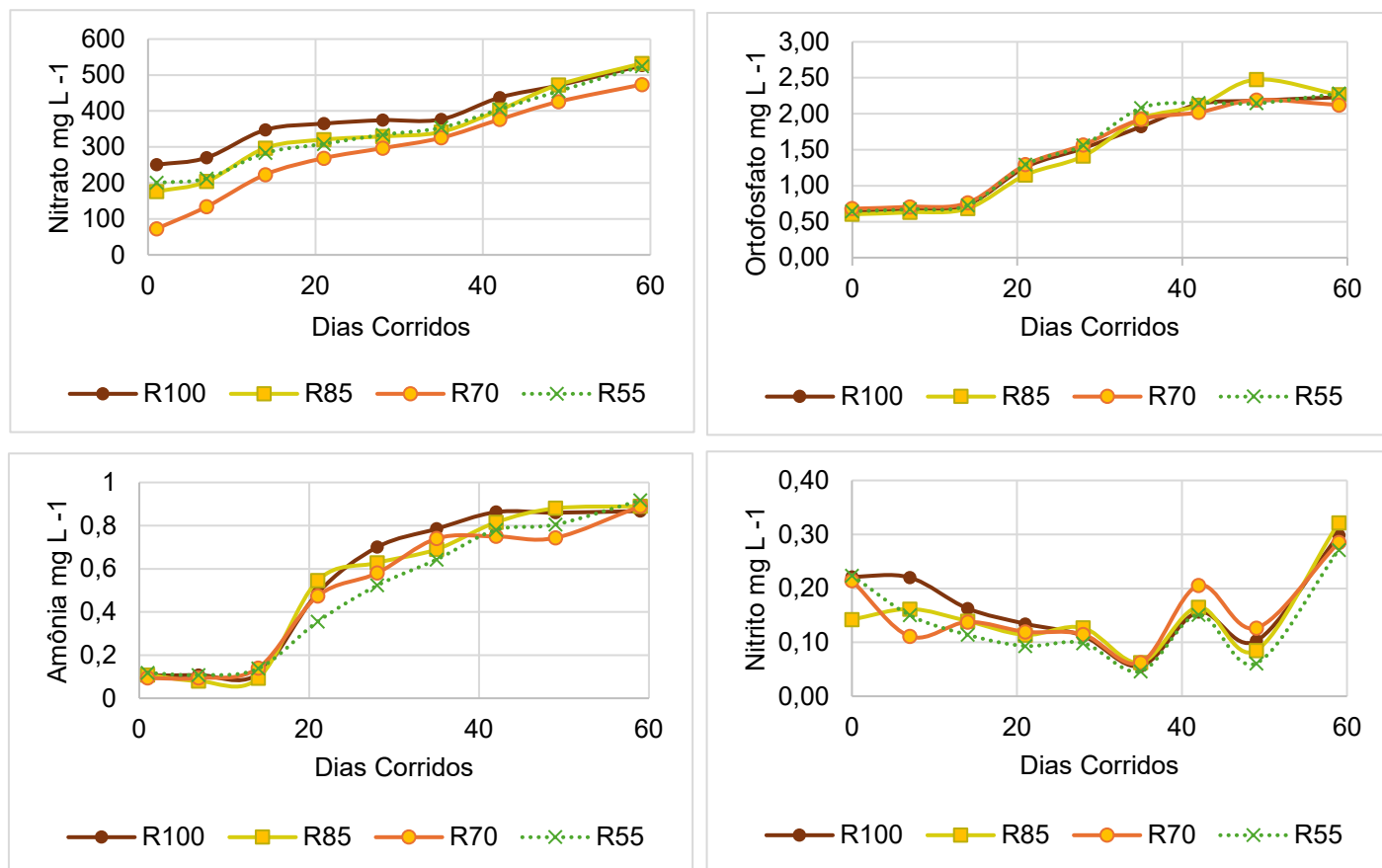
Letras distintas indicam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey a 5% ( $p < 0,05$ ).

As concentrações de compostos nitrogenados (amônia total, nitrito e nitrato) e de ortofosfato dissolvido, aferidas semanalmente, são apresentadas na Tabela 5. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos para nenhum dos parâmetros avaliados ( $p > 0,05$ ), indicando que os diferentes níveis de arraçoamento e a presença da lentilha na alimentação dos animais, não influenciaram a concentração desses compostos na água do sistema quando comparados ao tratamento controle.

**Tabela 5.** Concentrações de compostos nitrogenados e ortofosfato (média  $\pm$  desvio-padrão) aferidos semanalmente em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com *Lemna aequinoctialis in natura*.

Parâmetro (mg L <sup>-1</sup> )	R100	R85	R70	R55
Amônia Total	0,49 $\pm$ 0,02	0,53 $\pm$ 0,07	0,50 $\pm$ 0,01	0,49 $\pm$ 0,02
Nitrito	0,16 $\pm$ 0,02	0,15 $\pm$ 0,04	0,15 $\pm$ 0,03	0,13 $\pm$ 0,01
Nitrato	379,99 $\pm$ 39,11	341,88 $\pm$ 48,35	288,54 $\pm$ 16,48	341,83 $\pm$ 44,65
Ortofosfato	1,47 $\pm$ 0,06	1,47 $\pm$ 0,07	1,47 $\pm$ 0,08	1,51 $\pm$ 0,21

As variações semanais das concentrações desses compostos podem ser visualizadas nos gráficos apresentados na Figura 2, os quais ilustram a dinâmica dos parâmetros ao longo de 59 dias. Durante o período experimental, observou-se uma tendência de acúmulo gradual dos compostos nitrogenados e do ortofosfato, com os valores mais elevados sendo registrados próximo ao final do experimento.



**Figura 2.** Variação semanal das concentrações de amônia total, nitrito, nitrato e ortofosfato (mg L<sup>-1</sup>) nos diferentes tratamentos ao longo do período experimental.

### Parâmetros de desempenho zootécnico

Os parâmetros de desempenho zootécnico dos juvenis de tilápia ao final do experimento são apresentados na Tabela 6. Os peixes dos tratamentos R100 e R85 se destacaram com os maiores valores de peso final, ganho em peso e taxa de crescimento específica (TCE), diferindo significativamente daqueles dos tratamentos R55 e R70. O comprimento total e o comprimento padrão seguiram tendência semelhante, com peixes dos tratamentos R85 e R100 sendo significativamente maiores que os do grupo R55. Quanto à conversão alimentar aparente (CAA), o menor valor foi observado em R55, indicando melhor eficiência de uso da dieta, enquanto

R100 apresentou a pior conversão, significativamente superior aos demais tratamentos. A produtividade não diferiu estatisticamente entre os grupos, porém com maior rendimento no tratamento R85 e menor no R55. A taxa de sobrevivência manteve-se elevada em todos os tratamentos, sem diferenças significativas, indicando que os níveis de arraçoamento e a substituição parcial por lentilha-d'água não afetaram negativamente a viabilidade do cultivo dos peixes.

**Tabela 6.** Parâmetros de desempenho zootécnico (média  $\pm$  desvio-padrão) de juvenis de tilápia cultivados durante 59 dias de experimento, em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com *Lemna aequinoctialis in natura*.

Parâmetro	R100	R85	R70	R55
Peso final (g)	111,09 $\pm$ 5,42 <sup>a</sup>	115,29 $\pm$ 4,43 <sup>a</sup>	96,51 $\pm$ 2,99 <sup>b</sup>	95,21 $\pm$ 5,46 <sup>b</sup>
Ganho em peso (g)	100,83 $\pm$ 5,40 <sup>a</sup>	105,00 $\pm$ 4,42 <sup>a</sup>	86,24 $\pm$ 2,95 <sup>b</sup>	84,90 $\pm$ 5,43 <sup>b</sup>
TCE (% g dia)	4,04 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup>	4,09 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup>	3,80 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>	3,77 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup>
Produtividade (kg m <sup>-3</sup> )	14,68 $\pm$ 0,61	15,87 $\pm$ 0,62	13,48 $\pm$ 0,20	12,84 $\pm$ 0,44
Comprimento Total (cm)	17,87 $\pm$ 0,26 <sup>a</sup>	18,66 $\pm$ 0,44 <sup>a</sup>	17,37 $\pm$ 0,45 <sup>ab</sup>	16,70 $\pm$ 0,55 <sup>b</sup>
Comprimento Padrão (cm)	15,17 $\pm$ 0,18 <sup>a</sup>	15,73 $\pm$ 0,43 <sup>a</sup>	14,66 $\pm$ 0,46 <sup>ab</sup>	13,99 $\pm$ 0,30 <sup>b</sup>
Conversão Alimentar	1,18 $\pm$ 0,02 <sup>c</sup>	0,95 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>	0,98 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>	0,83 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>
Sobrevivência (%)	91,36 $\pm$ 6,86	95,00 $\pm$ 4,03	96,36 $\pm$ 1,82	93,18 $\pm$ 5,22

Legenda: TCE – Taxa de crescimento específica

Letras distintas indicam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey a 5% ( $p < 0,05$ ).

O consumo total médio de *L. aequinoctialis* fresca foi semelhante entre os tratamentos, com valores de 3177,21  $\pm$  174,01 gramas no tratamento R55, 3168,12  $\pm$  189,63 gramas no R70 e 3006,36  $\pm$  135,89 gramas no tratamento R85, sem diferenças estatísticas significativas

### Análises bromatológicas

A Tabela 7 apresenta a composição centesimal da *L. aequinoctialis* e da ração comercial utilizadas neste estudo, expressas com base na matéria seca. A macrófita apresentou energia bruta de 4405,89 kcal kg<sup>-1</sup>, teor de proteína bruta de 37,53%, 5,27% de extrato etéreo e fibra bruta de 14,72%. As frações menos digestíveis, como a celulose e a lignina, foram 12,92% e 2,88% respectivamente, indicando a presença

de estruturas vegetais mais resistentes à digestão enzimática. No que se refere aos minerais, foram verificados teores de potássio (3,42%), zinco (0,047%) e manganês (0,033%), superiores aos encontrados na ração comercial. Esses dados revelam uma composição diversificada, com concentração relevante de proteína bruta e macro e microminerais.

A Tabela 8 apresenta o perfil de aminoácidos da *L. aequinoctialis* e ração comercial, expresso em porcentagem da matéria seca. Dentre os aminoácidos essenciais, a biomassa. apresentou teores expressivos de lisina (1,40%), valina (1,63%), isoleucina (1,31%) e treonina (1,18%), demonstrando potencial para contribuir nutricionalmente em formulações alimentares. Alguns aminoácidos, como leucina, isoleucina e treonina, foram encontrados em maior concentração na *L. aequinoctialis* do que na ração comercial utilizada no estudo. Por outro lado, taurina e hidroxiprolina não foram detectadas na *L. aequinoctialis*, apresentando teores abaixo do limite de quantificação (<0,01%), embora estejam presentes na ração.

**Tabela 7.** Composição centesimal média da farinha de *Lemna aequinoctialis* e ração comercial expressos na matéria seca.

<b>Componente (%)</b>	<b>Ração Comercial</b>	<b>Farinha de <i>L. aequinoctialis</i></b>
Matéria seca	92,33	93,08
Energia bruta (kcal kg <sup>-1</sup> )	4844,58	4405,89
Proteína bruta	41,97	37,53
Extrato etéreo	6,12	5,27
Fibra bruta	5,57	14,72
Lignina	3,07	2,88
Celulose	1,66	12,92
Hemicelulose	11,08	9,29
FDN	15,81	25,1
FDA	4,73	15,81
Matéria mineral (cinzas)	11,91	15,53
Fósforo	2,23	1,62
Potássio	0,63	3,42
Cálcio	3,4	1,44
Magnésio	0,22	0,35
Enxofre	0,1	0,36
Ferro	0,04	0,058
Cobre	0	0,002
Zinco	0,01	0,047
Manganês	0,004	0,033

Legenda: FDN – Fibra em detergente neutro; FDA – Fibra em detergente ácido.

**Tabela 8.** Perfil de aminoácidos da *Lemna aequinoctialis* cultivada e ração comercial utilizadas na alimentação de juvenis de tilápia-do-nylo.

<b>Aminoácido (%)</b>	<b><i>L. aequinoctialis</i></b>	<b>Ração Comercial</b>
Ácido Aspártico	1,87	2,12
Ácido Glutâmico	2,85	4,69
Serina	1,12	1,62
Glicina	1,43	2,88
Histidina	0,56	1
Taurina	<0,01 (LQ)	<0,01 (LQ)
Arginina	1,74	1,99
Treonina	1,18	1,12
Alanina	1,84	2,51
Prolina	1,19	2,67
Tirosina	0,87	1,11
Valina	1,63	1,8
Metionina	0,62	0,84
Cistina	0,13	1,82
Isoleucina	1,31	<0,01 (LQ)
Leucina	2,41	1,18
Fenilalanina	1,38	3,29
Lisina	1,4	1,61
Hidroxiprolina	<0,01 (LQ)	0,92

Legenda: Limite de Quantificação.

Ainda, a composição centesimal da carcaça dos peixes, expressa na base da matéria natural, é apresentada na Tabela 9 . Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos para os teores de umidade, proteína bruta e cinzas. No entanto, o teor de extrato etéreo foi significativamente superior no grupo controle (R100) em comparação aos demais tratamentos, indicando maior acúmulo de gordura corporal nos peixes alimentados exclusivamente com ração comercial.

**Tabela 9.** Composição centesimal da carcaça (média  $\pm$  desvio-padrão) de juvenis de tilápia-do-nylo expressa na matéria natural, após 59 dias de cultivo em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com *Lemna aequinoctialis in natura*.

(%)	R100	R85	R70	R55
Umidade	73,01 $\pm$ 0,62	73,23 $\pm$ 0,48	72,35 $\pm$ 0,15	72,33 $\pm$ 0,50
Proteína bruta	13,43 $\pm$ 0,82	14,66 $\pm$ 0,65	14,29 $\pm$ 0,48	14,52 $\pm$ 0,18
Extrato etéreo	12,04 $\pm$ 0,58 <sup>b</sup>	9,60 $\pm$ 0,43 <sup>a</sup>	9,94 $\pm$ 0,24 <sup>a</sup>	9,32 $\pm$ 0,38 <sup>a</sup>
Cinzas	3,50 $\pm$ 0,34	3,40 $\pm$ 0,19	3,71 $\pm$ 0,06	3,74 $\pm$ 0,63

Letras distintas indicam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey a 5% ( $p < 0,05$ ).

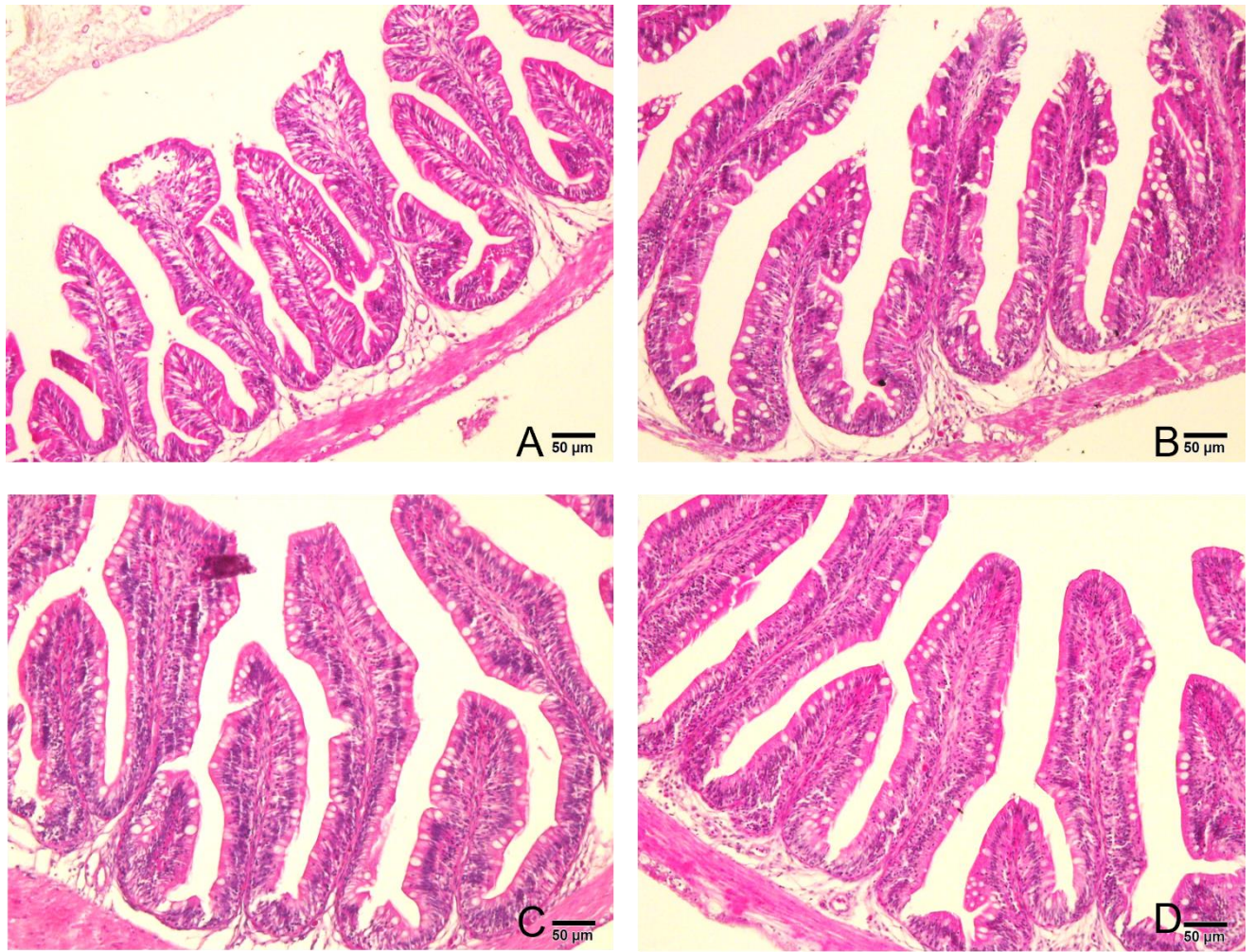
### Avaliações morfo-fisiológicas

As medidas histomorfométricas das vilosidades intestinais dos juvenis de tilápia-do-nylo variaram entre os tratamentos (Tabela 10). A altura das vilosidades não diferiu significativamente ( $p > 0,05$ ), com médias entre 312,91  $\pm$  50,69  $\mu\text{m}$  (R85) e 335,54  $\pm$  43,27  $\mu\text{m}$  (R55). Em contraste, a largura das vilosidades foi afetada pelas dietas ( $p < 0,05$ ) sendo que os peixes do tratamento R55 apresentaram os menores valores (89,55  $\pm$  10,22  $\mu\text{m}$ ), enquanto os dos tratamentos R85 e R100 exibiram valores maiores (125,65  $\pm$  25,62  $\mu\text{m}$  e 115,87  $\pm$  15,92  $\mu\text{m}$ , respectivamente). Foi verificado que peixes do tratamento R55 diferiram de R100, ao passo que os do R70 e R85 apresentaram valores intermediários e não diferiram significativamente dos demais. As imagens histológicas representativas dos cortes intestinais estão na Figura 3.

**Tabela 10.** Medidas de altura e largura das vilosidades intestinais (média  $\pm$  desvio-padrão) de juvenis de tilápia-do-nylo após 59 dias de cultivo em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com *Lemna aequinoctialis in natura*.

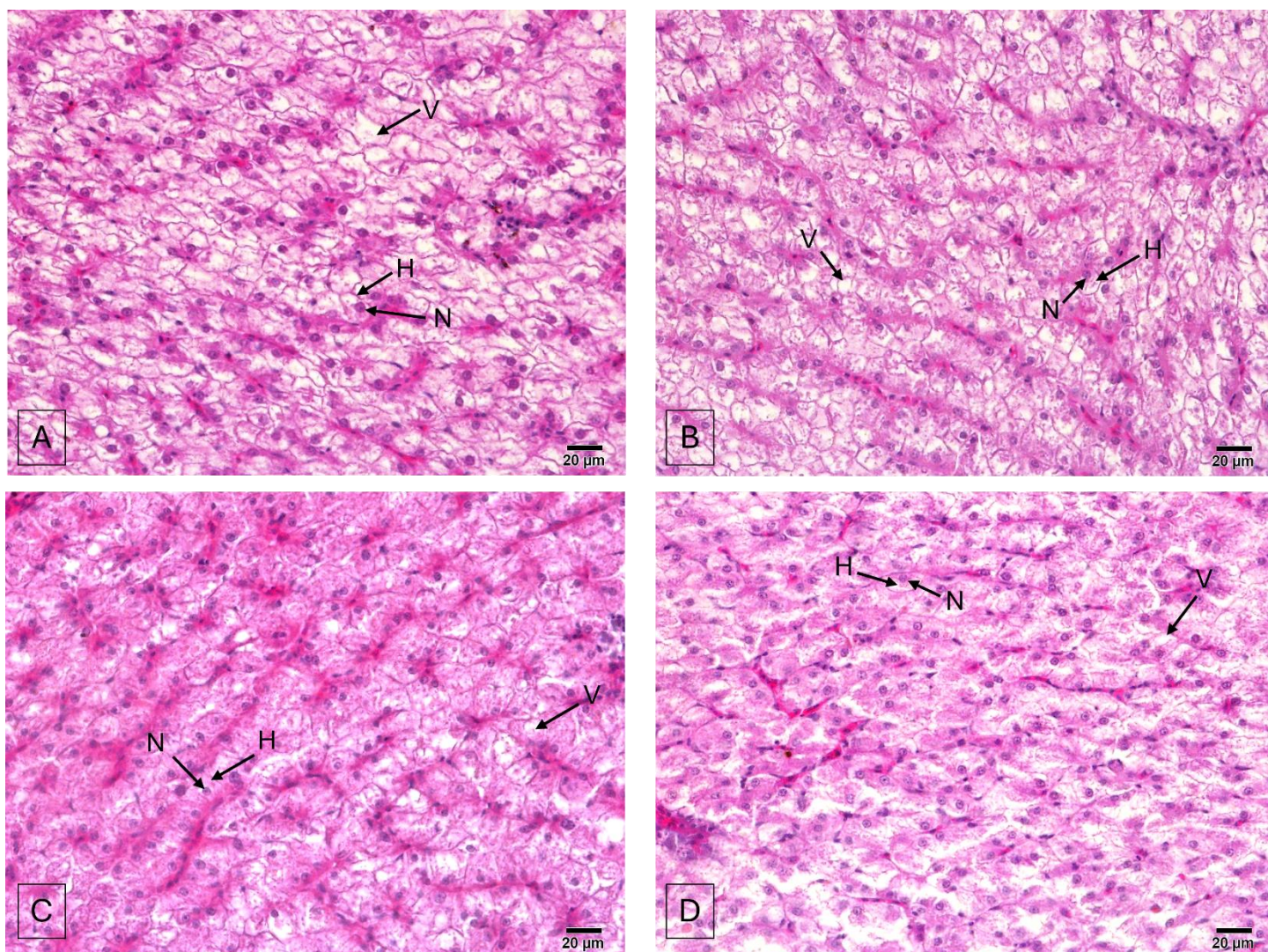
Variável	R100	R85	R70	R55
Altura das Vilosidades ( $\mu\text{m}$ )	328,31 $\pm$ 58,17	312,91 $\pm$ 50,69	313,75 $\pm$ 52,16	335,54 $\pm$ 43,27
Largura das Vilosidades ( $\mu\text{m}$ )	115,87 $\pm$ 15,92 <sup>a</sup>	125,65 $\pm$ 25,62 <sup>ab</sup>	111,65 $\pm$ 8,04 <sup>ab</sup>	89,55 $\pm$ 10,22 <sup>b</sup>

Letras distintas indicam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey a 5% ( $p < 0,05$ ).



**Figura 3.** Cortes histológicos das vilosidades intestinais de juvenis de tilápia-do-nylo *O. niloticus* submetidos aos tratamentos experimentais: (A) R100, (B) R85, (C) R70 e (D) R55.

A análise histológica do fígado dos peixes evidenciou diferenças morfológicas notáveis entre os tratamentos e as micrografias representativas dos fígados dos peixes submetidos às quatro dietas experimentais estão apresentadas na Figura 4.



**Figura 4.** Micrografias do fígado de juvenis de tilápia nos tratamentos R100 (A), R85 (B), R70 (C) e R55 (D). Observam-se os hepatócitos (H), seus núcleos (N) e vacuolização citoplasmática (V). Coloração: hematoxilina-eosina (HE). Escala: 20 µm.

Foi possível perceber variações morfológicas entre os tratamentos, com destaque para a intensidade da vacuolização citoplasmática. No tratamento R100 observou-se vacuolização citoplasmática acentuada e difusa, com núcleos por vezes deslocados da posição central e leve desorganização na disposição dos cordões hepáticos. De forma semelhante, o tratamento R85 também apresentou vacuolização evidente, embora com maior definição dos contornos celulares e dos núcleos.

No tratamento R70 a vacuolização foi menos pronunciada e distribuída de forma heterogênea. Os hepatócitos apresentaram morfologia celular mais definida e núcleos centrais bem evidenciados. Já no tratamento R55 a vacuolização foi discretamente observada e os cordões hepáticos exibiram organização mais regular.

Os índices hepatossomático (IHS) e lipossomático (ILS), bem como os parâmetros bioquímicos sanguíneos, estão apresentados na Tabela 11 (médias  $\pm$  desvio-padrão). Não houve diferenças significativas para o IHS. Já o ILS variou entre os tratamentos, uma vez que peixes dos tratamentos R85 e R100 apresentaram valores mais altos que os do R55, enquanto aqueles do R70 foram intermediários. Quanto aos parâmetros bioquímicos, a glicose foi mais elevada em R85, diferindo de R100, já os grupos R55 e R70 apresentaram valores intermediários, sem diferenças em relação aos demais. Os triglicerídeos foram maiores em R85 e menores em R55, com R70 e R100 em níveis intermediários. Para albumina, R85 e R70 superaram R55, que por sua vez foi maior que R100. Proteínas totais e colesterol não diferiram entre os tratamentos.

**Tabela 11.** Parâmetros bioquímicos sanguíneos e índices hepatossomático e lipossomático (média  $\pm$  desvio-padrão) de juvenis de tilápia-do-nilo após 59 dias de cultivo em sistema aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com *Lemna aquinoctialis in natura*.

	R100	R85	R70	R55
Glicose (g dL <sup>-1</sup> )	47,65 $\pm$ 3,38 <sup>bc</sup>	72,87 $\pm$ 8,79 <sup>a</sup>	60,95 $\pm$ 16,41 <sup>ab</sup>	60,18 $\pm$ 10,70 <sup>ab</sup>
Triglicerídeos (g dL <sup>-1</sup> )	158,13 $\pm$ 9,09 <sup>ab</sup>	203,21 $\pm$ 4,87 <sup>a</sup>	168,88 $\pm$ 6,98 <sup>ab</sup>	145,62 $\pm$ 13,95 <sup>b</sup>
Proteínas totais (g dL <sup>-1</sup> )	2,95 $\pm$ 0,42	3,03 $\pm$ 0,32	2,73 $\pm$ 0,27	2,50 $\pm$ 0,17
Albumina (g dL <sup>-1</sup> )	0,35 $\pm$ 0,04 <sup>c</sup>	0,68 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup>	0,62 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup>	0,48 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>
Colesterol (g dL <sup>-1</sup> )	107,98 $\pm$ 8,36	107,82 $\pm$ 12,29	88,55 $\pm$ 7,57	93,12 $\pm$ 9,19
IHS (%)	2,48 $\pm$ 0,31	2,29 $\pm$ 0,11	2,33 $\pm$ 0,13	2,20 $\pm$ 0,37
ILS (%)	18,05 $\pm$ 4,25 <sup>a</sup>	16,61 $\pm$ 3,63 <sup>a</sup>	13,71 $\pm$ 3,07 <sup>ab</sup>	8,76 $\pm$ 2,55 <sup>b</sup>

Letras distintas indicam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey a 5% ( $p < 0,05$ ).

### Análise de Custo de Produção

Para essa avaliação foi definido a alocação de tempo e os custos correspondentes às rotinas operacionais dos referidos funcionários, as atividades foram atribuídas a um funcionário fixo (R\$ 5,00 h<sup>-1</sup>) e a um funcionário temporário (R\$ 100,00 diária<sup>-1</sup>), com base na carga de trabalho exigida em cada fase. A Tabela 12 apresenta esse rateio utilizado para mensurar e comparar o impacto econômico entre as duas condições de manejo.

**Tabela 12.** Alocação de tempo e custo de mão de obra para tarefas operacionais em duas fases do cultivo aquapônico com diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com *Lemna aequinoctialis in natura*.

	Fase A		Fase B	
	Funcionário Fixo (h)	Funcionário Temporário (Diária)	Funcionário Fixo (h)	Funcionário Temporário (Diária)
Povoamento	1,0	1,0	1,0	1,0
Biometria	1,5	2,0	7,5	1,0
Despesca	1,0	1,0	3,0	1,0
Manutenção Piscicultura	2,5		12,5	
Manutenção Hidroponia	2,5		12,5	
Arraçoamento	15,0		75,0	
Plantio	0,5	0,5	0,5	0,5
Colheita			4,0	5,0
Manejo de Macrófita	10,0		50,0	
<b>Total (horas ou diárias)</b>	<b>34,0</b>	<b>4,5</b>	<b>166,0</b>	<b>8,5</b>
<b>Custo Total<sup>1</sup></b>	<b>R\$ 170,00</b>	<b>R\$ 450,00</b>	<b>R\$ 830,00</b>	<b>R\$ 50,00</b>

1 – Valor da diária: R\$ 100,00; Valor da hora R\$ 5,00

Cotação referencial do dólar: US\$ 1,00  $\cong$  R\$ 5,58 (Banco Central do Brasil, junho de 2025).

Os resultados da análise de custo para os quatro tratamentos experimentais estão apresentados na Tabela 13. Na Fase A, correspondente aos 20 dias iniciais de cultivo, o custo operacional total (COT) por ciclo foi de R\$ 107,68 para o tratamento R100, R\$ 104,45 para o R85, R\$ 96,69 para o R70 e R\$ 97,40 para o R55. Nessa fase inicial, os custos com ração e mão de obra representaram a maior parcela do COT, enquanto energia elétrica, mudas e outros insumos permaneceram constantes entre os tratamentos. Na Fase B, que abrange todo o ciclo produtivo, o COT total foi de R\$ 272,22 no tratamento R100, R\$ 258,05 no R85, R\$ 221,51 no R70 e R\$ 226,25 no R55. A redução da taxa de arraçoamento esteve associada à diminuição progressiva dos custos operacionais totais.

A Tabela 14 apresenta os valores médios de produção e os custos operacionais para tilápias e manjeriço nas duas condições avaliadas. Para as tilápias, o menor custo por unidade na Fase A foi observado no tratamento R55 (R\$ 3,20  $\text{unid.}^{-1}$ ), enquanto

na Fase B o menor custo por quilograma de tilápia produzido foi registrado no tratamento R85 (R\$ 18,64 kg<sup>-1</sup>). No caso do manjeriço, o menor custo por quilograma também foi observado no tratamento R85 (R\$ 17,66 kg<sup>-1</sup>).

**Tabela 13.** Estimativa do custo operacional efetivo (COE) e custo operacional total (COT) para quatro tratamentos experimentais com diferentes taxas de arraçoamento e suplementação com *Lemna aequinoctialis in natura*, nas condições A (20 dias iniciais) e B (ciclo completo).

Variável	Unidade	Fase A			Fase B		
		COE	Encargos Sociais	COT	COE	Encargos Sociais	COT
1. Mão de Obra Fixa	R\$ hora <sup>-1</sup>	3,78	1,51	5,29	18,44	7,38	25,82
2. Mão de Obra Temporária	Diária	30,00		30,00	56,67		56,67
3. Juvenis de Tilápia	Un. Milheiro <sup>-1</sup>	14,00		14,00	14,00		14,00
4.1 Ração R100 / 1	R\$ kg <sup>-1</sup>	5,85		5,85	29,74		29,74
4.2 Ração R100 / 2	R\$ kg <sup>-1</sup>	5,85		5,85	29,58		29,58
4.3 Ração R100 / 3	R\$ kg <sup>-1</sup>	5,85		5,85	27,32		27,32
4.4 Ração R100 / 4	R\$ kg <sup>-1</sup>	5,85		5,85	29,08		29,08
5.1 Ração R85 / 1	R\$ kg <sup>-1</sup>	5,04		5,04	26,51		26,51
5.2 Ração R85 / 2	R\$ kg <sup>-1</sup>	5,04		5,04	25,15		25,15
5.3 Ração R85 / 3	R\$ kg <sup>-1</sup>	5,04		5,04	24,44		24,44
5.4 Ração R85 / 4	R\$ kg <sup>-1</sup>	5,04		5,04	25,45		25,45
6.1 Ração R70 / 1	R\$ kg <sup>-1</sup>	4,13		4,13	21,77		21,77
6.2 Ração R70 / 2	R\$ kg <sup>-1</sup>	4,13		4,13	21,87		21,87
6.3 Ração R70 / 3	R\$ kg <sup>-1</sup>	4,13		4,13	21,37		21,37
7.1 Ração R55 / 1	R\$ kg <sup>-1</sup>	3,28		3,28	17,39		17,39
7.2 Ração R55 / 2	R\$ kg <sup>-1</sup>	3,28		3,28	17,44		17,44
7.3 Ração R55 / 3	R\$ kg <sup>-1</sup>	3,28		3,28	17,44		17,44
7.4 Ração R55 / 4	R\$ kg <sup>-1</sup>	3,28		3,28	17,49		17,49
8. Outros Insumos	Diversos	5,00		5,00	15,00		15,00
9. Mudas	Un.	22,50		22,50	22,50		22,50
10. Energia Elétrica	R\$	7,50		7,50	22,51		22,51
11. Total por Ciclo R100 <sup>1</sup>	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	106,17		107,68	264,84		272,22
11.1 Atribuição Planta	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	43,06		43,52	85,43		87,64
11.2 Atribuição Peixe	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	63,10		64,16	179,41		184,57
12. Total por Ciclo R85 <sup>2</sup>	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	102,94		104,45	250,67		258,05
12.1 Atribuição Planta	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	42,42		42,87	82,60		84,81
12.2 Atribuição Peixe	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	60,52		61,58	168,08		173,24
13. Total por Ciclo R70 <sup>3</sup>	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	95,18		96,69	214,14		221,51
13.1 Atribuição Planta	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	40,86		41,32	75,30		77,50
13.2 Atribuição Peixe	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	54,31		55,37	138,84		144,01
14. Total por Ciclo R55 <sup>4</sup>	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	95,88		97,40	218,87		226,25
14. Atribuição Planta	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	41,01		41,46	76,24		78,45
14.2 Atribuição Peixe	R\$ Ciclo <sup>-1</sup>	54,88		55,94	142,63		147,80

<sup>1</sup>: 11 = (1+2+3+4.1+4.2+4.3+4.4+8+9+10); <sup>2</sup>: 12 = (1+2+3+5.1+5.2+5.3+5.4+8+9+10);

<sup>3</sup>: 13 = (1+2+3+6.1+6.2+6.3+6.4+8+9+10); <sup>4</sup>: 14 = (1+2+3+7.1+7.2+7.3+7.4+8+9+10)

Cotação referencial do dólar: US\$ 1,00 ≅ R\$ 5,58 (Banco Central do Brasil, junho de 2025).

5

6 **Tabela 14.** Valores médios e desvio padrão de produção e custos de produção (média  $\pm$  desvio-padrão) de tilápias e manjericões cultivados em sistema com  
7 diferentes níveis de arraçoamento e suplementação com *Lemna aequinoctialis in natura* nas fases A e B

		Fase A			Fase B				
Tratamento	Produção (un.)	COE (R\$)	COT (R\$)	COT/PRODUÇÃO	Produção (kg)	COE (R\$)	COT (R\$)	COT/PRODUÇÃO	
Tilápia	<b>R100</b>	60	49,07 $\pm$ 0	50,13 $\pm$ 0	3,34 $\pm$ 0	5,58 $\pm$ 0,23	109,98 $\pm$ 0,89	115,14 $\pm$ 0,89	20,66 $\pm$ 0,72
	<b>R85</b>	60	48,43 $\pm$ 0	49,49 $\pm$ 0	3,30 $\pm$ 0	6,03 $\pm$ 0,23	107,14 $\pm$ 0,69	112,31 $\pm$ 0,69	18,64 $\pm$ 0,64
	<b>R70</b>	45	47,70 $\pm$ 0	48,76 $\pm$ 0	3,25 $\pm$ 0	5,12 $\pm$ 0,07	104,17 $\pm$ 0,21	109,33 $\pm$ 0,21	21,34 $\pm$ 0,33
	<b>R55</b>	60	47,02 $\pm$ 0	48,07 $\pm$ 0	3,20 $\pm$ 0	4,88 $\pm$ 0,17	100,78 $\pm$ 0,03	105,95 $\pm$ 0,03	21,73 $\pm$ 0,75
Manjericão	<b>R100</b>		39,55 $\pm$ 0	40,01 $\pm$ 0		2,44 $\pm$ 0,29	68,07 $\pm$ 0,22	70,29 $\pm$ 0,22	29,16 $\pm$ 3,76
	<b>R85</b>		39,39 $\pm$ 0	39,85 $\pm$ 0		3,97 $\pm$ 0,39	67,37 $\pm$ 0,17	69,58 $\pm$ 0,17	17,66 $\pm$ 1,68
	<b>R70</b>		39,21 $\pm$ 0	39,66 $\pm$ 0		3,31 $\pm$ 0,41	66,62 $\pm$ 0,05	68,84 $\pm$ 0,05	21,01 $\pm$ 2,83
	<b>R55</b>		39,04 $\pm$ 0	39,49 $\pm$ 0		2,15 $\pm$ 0,75	65,77 $\pm$ 0,01	67,99 $\pm$ 0,01	34,23 $\pm$ 10,02

8 Cotação referencial do dólar: US\$ 1,00  $\cong$  R\$ 5,58 (Banco Central do Brasil, junho de 2025).

9

## DISCUSSÃO

Os coeficientes de digestibilidade aparente (CDA) da ração comercial (R100) foram de 76,86% para proteína bruta e 70,94% para energia, valores considerados adequados para juvenis de *O. niloticus* e próximos ao padrão de referência de boa biodisponibilidade descrito pelo NRC (2011). Já a dieta contendo 30% da *L. aequinoctialis*, cultivada sob condições controladas, apresentou CDA superiores para ambos os parâmetros, com 79,72% para proteína e 71,31% para energia. É possível observar que a digestibilidade da ração comercial não foi prejudicada pela inclusão de 30% de farinha de *Lemna*. Na verdade, a associação de ração comercial a *L. aequinoctialis* processada em farinha, promoveu maiores índices de CDA da proteína bruta e energia, o que reforça a viabilidade de sua aplicação como ingrediente complementar em dietas para tilápias. Ainda que a forma processada usada nos testes de digestibilidade não corresponda exatamente à biomassa fresca fornecida no experimento zootécnico, os dados obtidos são valiosos para estimar o potencial de aproveitamento nutricional da macrófita pelos peixes. Os valores de digestibilidade calculado para *L. aequinoctialis* (86,79% DAPB; 72,22% DAEB) figuram como os maiores entre os valores obtidos, indicando alto potencial de aproveitamento nutricional da macrófita.

A inclusão da lentilha-d'água *L. aequinoctialis* na dieta de juvenis de tilápia-do-nilo *O. niloticus* promoveu efeitos positivos tanto no desempenho zootécnico dos peixes quanto na produtividade do manjeriço *O. basilicum* cultivado em sistema aquapônico acoplado. O tratamento R85, que combinou ração comercial com suplementação de lentilha-d'água *L. aequinoctialis* e redução da taxa de arraçoamento em 15% em relação ao controle, destacou-se como o mais eficiente em termos de crescimento dos peixes e desenvolvimento vegetal. Esse desempenho sugere que a macrófita pode ter desempenhado um papel multifuncional no sistema, atuando não apenas como fonte alimentar complementar, mas também influenciando indiretamente a qualidade dos excretas e, conseqüentemente, a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Do ponto de vista agrônômico, o manjeriço respondeu positivamente à inclusão de lentilha-d'água *L. aequinoctialis* na alimentação da tilápia-do-nilo, apresentando maiores índices de crescimento vegetal, especialmente em R85 e R70. Ainda assim,

o uso de macrófitas do gênero *Lemna* como fertilizante no contexto de aquaponia permanece pouco discutido. Em cultivos em solo, Baldi et al., (2025) mostraram que a biomassa seca de *L. minor* incorporada ao solo 28 dias antes do transplante, elevou o crescimento da alface em comparação a um tratamento com ureia e outro com fertilizante orgânico comercial. Também já foram reportados efeitos bioestimulantes de extrato aquoso de *L. minor* aplicado em oliveiras cultivadas em hidroponia (Regni et al., 2021). Contudo, o efeito no presente estudo ocorreu de forma indireta, por intermédio dos peixes, via ingestão da macrófita e subsequente excreção no sistema aquapônico.

Nos sistemas aquapônicos, a alimentação dos peixes é a principal via de entrada de nutrientes, e tanto o regime de fornecimento quanto a natureza dos ingredientes podem modular os nutrientes que chegam às plantas. Em ensaio com aquaponia em DWC, ajustes no manejo alimentar dos peixes melhoraram a qualidade da água e desempenho de diferentes hortaliças e ervas (Yang & Kim, 2019). Além disso, em um estudo avaliando dietas para aquaponia, foi verificado aumento da liberação de potássio, magnésio e boro na água com dietas utilizando fontes de proteína vegetal, enquanto na dieta com maior participação de proteínas de origem animal, constatou maior teor de fósforo e cálcio (Shaw et al., 2024).

Em sistemas hidropônicos/aquapônicos, o nitrato é a principal forma de nitrogênio disponibilizada às raízes, o balanço entre a geração desse nutriente no biofiltro e a assimilação pelas plantas condiciona a recuperação de N e o desempenho das culturas (Wongkiew et al., 2017; Hu et al., 2015). Além disso, é essencial monitorar o ortofosfato na água como indicador operacional da fração prontamente disponível às plantas. Todavia, no presente estudo, as análises físico-químicas da água mostraram nitrato e ortofosfato elevados em todos os tratamentos, indicando que nitrogênio e fósforo estavam disponíveis na água de todas as condições testadas.

Com base na composição bromatológica da *L. aequinoctialis* e da ração comercial, foi verificado que a macrófita apresentou maiores concentrações de potássio e micronutrientes como o magnésio, enxofre, zinco, manganês e ferro. Em contrapartida, cálcio e fósforo estavam mais abundantes na ração. Esse deslocamento para potássio e os demais microminerais, sugere que a inclusão de lentilha-d'água na dieta dos peixes enriqueceu os excretas e os sólidos com esses

elementos e possivelmente elevou a disponibilidade desses para as plantas no circuito aquapônico. Essa condição é consistente com Rodgers et al. (2022), que testaram manjeriço em aquaponia desacoplada e mostraram que complementar cálcio, magnésio, ferro, boro e manganês na água efluente do tanque de piscicultura, elevou biomassa, altura das plantas e índice SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) em comparação ao tratamento com a água do cultivo de peixes sem o complemento mineral.

O desempenho superior do cultivo vegetal nos tratamentos R85 e R70 contrasta com o crescimento limitado observado no R55, o que pode estar relacionado à menor disponibilidade de nutrientes fornecidos pela ração comercial e que não foram supridos pelo fornecimento da macrófita, possivelmente o cálcio. Em sistemas aquapônicos, a deficiência de cálcio pode comprometer o desenvolvimento das plantas e pode ser associada a distúrbios fisiológicos. A adição de cálcio proveniente de pó de casca de ovo aumentou significativamente a produtividade de tomate em sistema aquapônico, evidenciando a relevância desse nutriente para o adequado crescimento vegetal (Zahan et al., 2018).

A introdução de macrófita fresca na dieta da tilápia-do-nilo promoveu desempenho zootécnico adequado mesmo sob restrição moderada de ração, ao passo que também estimulou a produtividade vegetal no tratamento R85. Entretanto, reduções mais severas na taxa de arraçoamento, como nos grupos R70 (3,5%) e R55 (2,75%), embora tenham resultado em economia de ração, impactaram negativamente o crescimento dos peixes. Taxas de arraçoamento semelhantes foram testadas por Wang et al. (2020) com juvenis de tilápia em sistema de recirculação. O tratamento testando 5% do peso vivo por dia resultou em maior peso final, maior ganho em peso e maior taxa de crescimento específica quando comparado ao grupo que foi alimentado com 3%. Portanto ainda se fazem necessárias mais investigações para determinar taxa de arraçoamento adequada quando associada à alimentação com lentilha-d'água *in natura* para juvenis de tilápia.

Também é importante ressaltar que esses resultados podem estar relacionados ao hábito alimentar da tilápia-do-nilo, a qual é descrita como predominantemente herbívora e detritívora, alimentando-se de algas (fitoplâncton e perifíton), macrófitas, detritos e microrganismos associados, embora possa incluir invertebrados em menor

proporção (Bowen, 1982). Esse espectro alimentar possibilitou que a *L. aequinoctialis* ofertada fosse prontamente aceita e consumida pelos juvenis no experimento, complementando a dieta. Considerando o consumo da macrófita pelos juvenis e o efeito fertilizante para o cultivo de manjeriço, torna-se fundamental caracterizar sua composição proximal, que fornece a base para entender sua contribuição no sistema.

A composição centesimal da *L. aequinoctialis* cultivada neste estudo revelou um teor expressivo de proteína bruta (37,5% na base seca), o que a classifica, sob a ótica zootécnica, como um concentrado proteico, uma vez que excede 20% de proteína bruta na matéria seca (Salman et al., 2010). Em comparação com a literatura recente, Miltko et al. (2024) avaliaram *L. minor* e encontraram 12,1–13,0% de proteína em suas amostras, obtidas sob condições interpretadas pelos autores como de baixa disponibilidade de nutrientes. Tais variações evidenciam a sensibilidade da composição bromatológica da planta às condições ambientais e ao manejo. Ainda, a análise do perfil de aminoácidos da *L. aequinoctialis* utilizada neste experimento revelou níveis relevantes de aminoácidos essenciais como lisina, valina e leucina, embora com menores concentrações de metionina e cistina. Esse aspecto está de acordo com Rusoff et al. (1980), que identificaram metionina como limitante e cisteína não detectável em concentrados de *Lemnaceae*. Esses resultados evidenciam o perfil aminoacídico da *L. aequinoctialis*, com destaque para a presença de aminoácidos essenciais, ainda que alguns compostos ausentes possam limitar seu uso como única fonte proteica.

A análise da composição centesimal (umidade, proteína, lipídios e cinzas) de carcaça, é amplamente utilizada para estimar o valor energético e caracterizar a relevância nutricional do pescado, com aplicação tanto em estudos de nutrição aquícola quanto na avaliação do produto para consumo humano (Ahmed et al., 2022). No presente estudo, foi verificado o maior acúmulo de gordura corporal nos peixes alimentados exclusivamente com ração comercial (R100), em comparação aos demais tratamentos suplementados com *L. aequinoctialis* fresca. Esse aumento significativo no teor de extrato etéreo sugere que alimentação apenas com ração convencional, promoveu uma deposição lipídica mais acentuada nos tecidos. Conforme discutido por Sinha et al. (2011) o aumento de fibra na alimentação pode reduzir a utilização e a absorção de lipídios, relatando efeitos como a maior viscosidade da digesta e interferência com sais biliares, resultando inclusive em menores níveis de colesterol sanguíneo. Por

outro lado, não foram observadas diferenças significativas nos teores de proteína bruta na carcaça entre os tratamentos, indicando que mesmo com redução da taxa de arraçoamento, não comprometeu a proporção de proteína nos tecidos corporais. No entanto, os peixes dos grupos R70 e R55, que receberam menos ração, apresentaram menor crescimento em peso corporal em comparação ao grupo controle (R100).

De maneira geral, o uso da macrófita como complemento alimentar não refletiu em alterações consideráveis nas medidas histológicas avaliadas, uma vez que os valores de altura e largura das vilosidades permaneceram próximos aos observados no grupo controle, com exceção para o tratamento R55, possivelmente em decorrência da menor oferta de ração. Em estudo com tilápias-do-nylo alimentadas com a macrófita *Azolla pinnata* fresca, Refaey et al. (2023) relataram encurtamento e estreitamento das vilosidades intestinais, além de maior espessura da mucosa e da submucosa em comparação ao controle sem oferta de *Azolla*. No presente estudo, os efeitos histológicos observados nos cortes de intestino foram similares entre os tratamentos, sugerindo uma possível adaptação morfofisiológica dos peixes à presença da *L. aequinoctialis in natura* na dieta. Esse resultado indica que, mesmo com a fração fibrosa da planta, a mucosa intestinal manteve sua integridade, o que é coerente com o hábito alimentar e a reconhecida capacidade da tilápia de aceitar ingredientes vegetais (El-Sayed, 1999; Moyo & Rapatsa-Malatji, 2023).

A análise das micrografias hepáticas evidenciou vacuolização difusa e, por vezes, deslocamento periférico do núcleo no grupo R100 e R85, um padrão compatível com alterações morfofuncionais do fígado. Entretanto, em H&E (hematoxilina-eosina) não é possível definir se o vacúolo é lipídico ou glicogênico, pois a confirmação requer técnicas específicas como Sudan Black B ou Oil Red O (corantes lipofílicos aplicados em cortes congelados) e PAS (ácido periódico de Schiff) com diástase para evidenciar glicogênio (Kiernan, 2015; Suvarna et al., 2019). Todavia, a convergência entre essas alterações histológicas e os maiores níveis de triglicerídeos, colesterol sérico, extrato etéreo na carcaça e índices lipossomáticos sugere um perfil metabólico lipogênico e possível sobrecarga hepática no tratamento controle. Em tilápias, dietas ricas em lipídios podem ocasionar esteatose hepática e elevação no teor de triglicerídeos e colesterol no fígado (Tao et al., 2018). Além disso, o tipo de macronutriente direciona o acúmulo, ou seja mais carboidrato eleva o glicogênio hepático, enquanto mais lipídio aumenta os triglicerídeos hepáticos e a adiposidade (Ning et al., 2023). Nos

tratamentos R70 e R55 observou-se atenuação das alterações histológicas hepáticas em relação a R85 e R100, com citoplasma mais compacto, núcleos centralizados e cordões celulares organizados.

Em relação aos parâmetros bioquímicos do sangue avaliados, observou-se que a glicose sérica foi mais alta nos peixes do tratamento R85 e menor em R100, enquanto os triglicerídeos atingiram o pico em R85 e o menor valor em R55. A albumina foi superior nos peixes do tratamento R70 e R85 e inferior em R100. Proteínas totais e colesterol não diferiram entre os tratamentos. Essas alterações demonstrando marcadores mais elevados sob maior oferta relativa de alimento é coerente com Cadorin et al. (2022), que relataram glicose e triglicerídeos plasmáticos mais altos em tilápias alimentadas à saciedade do que sob restrição; no presente estudo, o pico ocorreu no grupo R85. Entre os índices somáticos, o IHS não diferiu entre grupos, ao passo que o ILS foi significativamente menor nos peixes do R55 e maior em R85 e R100, sugerindo menor deposição de gordura visceral no tratamento com maior restrição e uso de *L. aequinoctialis in natura*, padrão coerente com ensaio em tilápias nos quais a restrição alimentar reduziu o índice viscerossomático e a gordura mesentérica, sem diferença significativa em IHS (Afram et al., 2021).

Do ponto de vista produtivo-econômico, ajustar a taxa de arraçoamento e, quando aplicável, empregar fontes vegetais alternativas na dieta pode melhorar a eficiência de custo por unidade de produto, desde que calibrado ao sistema e fase de cultivo. Em juvenis de tilápia criados em bioflocos, alimentar entre 4,3 e 6,1% do peso vivo·dia<sup>-1</sup> maximizou rentabilidade e crescimento, e taxas mais altas pioraram a eficiência alimentar (Oliveira et al., 2021). No âmbito comercial, o arraçoamento deve ser calibrado considerando o retorno econômico do ciclo. Em tilapiculturas egípcias a implementação de boas práticas de manejo, aperfeiçoando o manejo alimentar, diminuiu os custos e aumentou o lucro (Dickson et al., 2016). Apesar da literatura não exibir estudos com avaliação econômica de macrófita fresca na alimentação de espécies cultivadas em aquaponia, Alkhamis (2024) aborda o uso da macrófita processada na dieta de tilápias cultivadas em sistema aquapônico. A inclusão de 20% de *L. minor* foi a opção economicamente mais vantajosa, conferindo menor custo e maior eficiência, ao mesmo tempo que contribuiu para maiores índices de crescimento do peixe em comparação aos demais tratamentos.

No presente estudo, a redução gradual da taxa de arraçoamento, com suplementação de *L. aequinoctialis in natura*, reduziu o custo de produção em relação ao tratamento sem oferta de macrófita e com maior taxa de arraçoamento. Na Fase A que considerou a produção de juvenis que foram removidos do sistema durante o ciclo, o grupo R55 apresentou o menor custo de produção e o tratamento controle o maior. Essa Fase A deve ser considerada com cautela, uma vez que o sistema foi dimensionado para o ciclo completo e, nessa fase inicial, operou subutilizado. A produção de juvenis foi pequena frente à infraestrutura e aos custos o que distorce o custo unitário (R\$ kg<sup>-1</sup>) frente aos valores praticados e o torna desproporcional ao desempenho econômico real. Na avaliação do ciclo completo (Fase B), o custo unitário de produção (R\$/kg) foi menor no tratamento R85 para ambas as culturas. Para a produção de tilápias reduziu de R\$ 20,66 (Controle) para R\$ 18,64 (R85), uma economia de 9,8%, ao passo que, nos grupos R70 e R55 elevaram o custo para R\$ 21,34 (+3,3%) e R\$ 21,73 (+5,2%), respectivamente. No cultivo de manjeriço o custo de produção reduziu de R\$ 29,16 (R100) para R\$ 17,66 (R85), economia de 39,4%, R70 diminuiu 27,9% enquanto R55 aumentou o custo em comparação ao grupo controle (+17,4%). Assim, o R85 apresentou o melhor desempenho econômico do ciclo completo, ao reduzir simultaneamente o custo por kg de peixe e de hortaliça.

Embora os achados deste estudo sugiram benefícios produtivos e agrônômicos decorrentes da inclusão da macrófita, ainda são necessários experimentos adicionais que avaliem aspectos como a digestibilidade da macrófita e aprofundar estudos com minerais presentes na lentilha-d'água e sua possível correlação com o crescimento do manjeriço. Além disso, deve-se considerar a avaliação de outras macrófitas aquáticas de interesse zootécnico e ecológico, a fim de comparar seu valor nutricional e funcional em sistemas aquapônicos. Outro aspecto pouco explorado é a influência indireta da dieta dos peixes sobre a composição química e fitoquímica das plantas cultivadas, uma vez que a modulação da alimentação pode alterar qualitativamente os nutrientes dessas.

A utilização de macrófitas frescas como insumo alimentar representa uma abordagem tecnicamente viável, de baixo custo e com elevado potencial de aplicação em sistemas integrados, especialmente para pequenos e médios produtores, promovendo sinergia entre os compartimentos aquícola e vegetal e contribuindo para práticas mais sustentáveis na aquicultura. A utilização de *L. aequinoctialis* se faz

interessante devido sua fácil propagação, alta taxa de crescimento e composição nutricional promissora, tornando essa estratégia particularmente atrativa para a aquicultura familiar, reforçando os princípios da circularidade, sustentabilidade e eficiência dos sistemas produtivos. O avanço dessas abordagens poderá contribuir significativamente para o desenvolvimento de uma aquicultura mais acessível, autônoma e ambientalmente responsável.

## CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam que a inclusão de *L. aequinoctialis in natura* aliada à redução moderada da taxa de arraçoamento integrou positivamente o desempenho dos peixes e a produção vegetal em sistema aquapônico acoplado. O tratamento R85, correspondente a 4,25 do peso vivo dia<sup>-1</sup> e suplemento de lentilha-d'água à vontade, se destacou como o melhor elo entre crescimento de tilápias e manjeriço, evidenciando a sinergia entre os compartimentos do sistema e o papel multifuncional da macrófita na aquaponia. A redução da oferta de ração abaixo de 4,25% do peso vivo dia<sup>-1</sup> comprometeu o crescimento dos peixes. Ainda assim, o manjeriço manteve crescimento elevado em R70, enquanto os piores desempenhos vegetais ocorreram nos grupos Controle (R100, sem fornecimento de macrófita) e em R55 (maior restrição de ração), indicando a necessidade de um nível mínimo de arraçoamento e da suplementação com *Lemna* para sustentar a produtividade integrada obtida nesse estudo.

Na avaliação dos peixes, observaram-se respostas favoráveis compatíveis com a estratégia alimentar testada, incluindo menor acúmulo lipídico corporal, alterações hepáticas dentro de padrões adaptativos e manutenção da integridade intestinal nos tratamentos com *L. aequinoctialis*, sugerindo adequação fisiológica à inclusão da macrófita e ao ajuste da oferta de ração. Do ponto de vista nutricional, a *L. aequinoctialis* apresentou alto teor de proteína bruta, aminoácidos essenciais e minerais, reforçando sua compatibilidade com as exigências da tilápia e seu potencial como insumo para estratégias circulares de alimentação. Do ponto de vista econômico, a análise de custo unitário de produção (R\$/kg) no ciclo completo (Fase B) corroborou a superioridade do tratamento R85, entregando menores custos para o quilo do manjeriço e da tilápia produzida. Complementarmente, o ensaio de digestibilidade realizado neste estudo indicou alto aproveitamento da *L. aequinoctialis* (CDA 86,79% para proteína e 72,22% para energia), reforçando a sua viabilidade como alimento para tilápias.

Em síntese, o uso da lentilha-d'água *L. aequinoctialis* na aquaponia emerge como estratégia tecnicamente viável e operacionalmente robusta para maximizar a eficiência integrada peixe-planta. Recomenda-se, para estudos futuros, refinar frequência e quantidade de oferta dessa macrófita *in natura*, comparar modos de

fornecimento (*in natura* vs. processada) e aprofundar estudos com marcadores digestivos, hepáticos e microbiológicos, visando elucidar mecanismos e ampliar a aplicabilidade em diferentes escalas produtivas.

## REFERÊNCIAS

- AOAC International. (2000). *Official methods of analysis of AOAC International* (17th ed.). AOAC International.
- Afram, F., Agbo, N. W., Adjei-Boateng, D., & Egna, H. (2021). Effects of feeding strategies on growth performance and economic returns on the production of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in fertilized ponds. *Aquaculture Studies*, 21(2), 63–73. [https://doi.org/10.4194/2618-6381-v21\\_2\\_03](https://doi.org/10.4194/2618-6381-v21_2_03)
- Ahmed, I., Jan, K., Fatma, S., & Dawood, M. A. O. (2022). Muscle proximate composition of various food fish species and their nutritional significance: A review. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 106(3), 690–719. <https://doi.org/10.1111/jpn.13711>
- Alkhamis, Y. A. (2024). Effect of aquaponically grown duckweed as a sustainable feed on growth indices, water quality, and digestive activities for the Nile tilapia reared in aquaponic culture. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 28(2), 631–646. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2024.350076>
- Associação Brasileira da Piscicultura (Peixe BR). (2024). *Anuário Peixe BR da Piscicultura 2024* (8ª ed.). Peixe BR. Disponível em <https://www.peixebr.com.br/Anuario2024/AnuarioPeixeBR2024.pdf>
- Azizah, N. S., Irawan, B., Kusmoro, J., Safriansyah, W., Farabi, K., Oktavia, D., Doni, F., & Miranti, M. (2023). Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.)—A review of its botany, phytochemistry, pharmacological activities, and biotechnological development. *Plants*, 12(24), 4148. <https://doi.org/10.3390/plants12244148>
- Baganz, G. F. M., Junge, R., Portella, M. C., Goddek, S., Keesman, K. J., Baganz, D., Staaks, G., Shaw, C., Lohrberg, F., & Kloas, W. (2022). The aquaponic principle—It is all about coupling. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 252–264. <https://doi.org/10.1111/raq.12596>
- Baldi, A., Verdi, L., Piacenti, L., & Lenzi, A. (2025). From waste to resource: Use of *Lemna minor* L. as unconventional fertilizer for lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Horticulturae*, 11(1), 20. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010020>
- Bittsanszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., Villarroel, M., Kotzen, B., & Komives, T. (2016). Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles*, 2(2), 17–20. <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57>
- Bowen, S. H. (1982). Feeding, digestion and growth - qualitative considerations. In R. Pullin, S. V. R & Lowe-McConnell, R. H. (Eds.), *The biology and culture of tilapias* (pp. 141–156). International Center for Living Aquatic Resources Management (ICLARM). <https://core.ac.uk/download/pdf/6514805.pdf>
- Bureau, D. P., Harris, A. M., & Cho, C. Y. (1999). Apparent digestibility of rendered animal protein ingredients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 180(3–4), 345–358. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00210-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00210-0)

- Cadorin, D. I., da Silva, M. F. O., Masagounder, K., & Fracalossi, D. M. (2022). *Interaction of feeding frequency and feeding rate on growth, nutrient utilization, and plasma metabolites of juvenile genetically improved farmed Nile tilapia, Oreochromis niloticus*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 53(2), 500–515. <https://doi.org/10.1111/jwas.12833>
- Carović-Stanko, K., Orlić, S., Politeo, O., Strikić, F., Kolak, I., Milos, M., & Satovic, Z. (2010). Composition and antibacterial activities of essential oils of seven *Ocimum taxa*. *Food Chemistry*, 119(1), 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.010>
- Castilho-Barros, L., Owatari, M. S., Mouriño, J. L. P., Silva, B. C., & Seiffert, W. Q. (2020). *Economic feasibility of tilapia culture in southern Brazil: A small-scale farm model*. *Aquaculture*, 515, 734551. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734551>
- Cipriani, L. A., Ha, N., de Oliveira, N. S., & Fabregat, T. E. H. P. (2021). Does ingestion of duckweed (*Lemna minor*) improve the growth and productive performance of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) given formulated feeds in a recirculation system? *Aquaculture International*, 29(5), 2197–2205. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00743-0>
- Dickson, M., Nasr-Allah, A., Kenawy, D., & Kruijssen, F. (2016). Increasing fish farm profitability through aquaculture best management practice training in Egypt. *Aquaculture*, 465, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.015>
- El-Sayed, A. F. M. (1999). Alternative dietary protein sources for farmed tilapia, *Oreochromis spp.* *Aquaculture*, 179(1–4), 149–168. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00159-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00159-3) ScienceDirect
- El-Sayed, A.-F. M. (2006). *Tilapia culture*. CABI. <https://doi.org/10.1079/9780851990149.0000>
- El-Shafai, S. A., El-Gohary, F. A., Verreth, J. A. J., Schrama, J. W., & Gijzen, H. J. (2004). Apparent digestibility coefficient of duckweed (*Lemna minor*), fresh and dry for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquaculture Research*, 35(6), 574–586. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01055.x>
- FAO, Rikolto, & RUAFA. (2022). *Urban and peri-urban agriculture sourcebook – From production to food systems*. Rome: FAO and Rikolto. <https://doi.org/10.4060/cb9722en>
- Furukawa, A., & Tsukahara, H. (1966). On the acid digestion method for the determination of chromic oxide as an index substance in the study of digestibility of fish feed. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 32(6), 502–506. <https://doi.org/10.2331/suisan.32.502>
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199–4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Goswami, R. K., Sharma, J. G., Shrivastav, A. K., Kumar, G., Glencross, B. D., Tocher, D. R., & Chakrabarti, R. (2022). Effect of *Lemna minor* supplemented diets on growth, digestive physiology and expression of fatty acids biosynthesis genes of *Cyprinus carpio*. *Scientific Reports*, 12, 3711. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07743-x>

Henriques, M. B., de Araújo Nunes, F. A., de Souza, M. R., Castilho-Barros, L., & Barbieri, E. (2022). Live bait or artificial bait? Efficiency in recreational fishing for sea bass (*Centropomus parallelus*). *Ocean & Coastal Management*, 216, 105976. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105976>

Heo, J., Baek, J., Subah, Z., & Ryu, J. H. (2024). Evaluating crop growth between hydroponics and aquaponics with different light inputs. *Frontiers in Horticulture*, 3, 1413224. <https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1413224>

Herawati, V. E., Pinandoyo, Darmanto, Y. S., Rismaningsih, N., Windarto, S., & Radjasa, O. K. (2020). The effect of fermented duckweed (*Lemna minor*) in feed on growth and nutritional quality of tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Biodiversitas*, 21, 3350–3358. <https://doi.org/10.13057/BIODIV/D210759>

Hillman, W. S. (1961). *The Lemnaceae, or duckweeds: A review of the descriptive and experimental literature*. *The Botanical Review*, 27(2), 221–287. <https://doi.org/10.1007/BF02860090>

Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A. C., & Khanal, S. K. (2015). Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology*, 188, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013>

Kause, A., Nousiainen, A., & Koskinen, H. (2022). Improvement in feed efficiency and reduction in nutrient loading from rainbow trout farms: The role of selective breeding. *Journal of Animal Science*, 100(8), skac214. <https://doi.org/10.1093/jas/skac214>

Kiernan, J. A. (2015). *Histological and histochemical methods: Theory and practice* (5th ed.). Scion Publishing.

Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens, K. (2014). An international survey of aquaponics practitioners. *PLOS ONE*, 9(7), e102662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>

Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023>

Luo, J., Chien, Y.-H., Taparhudee, W., Kitikiew, S., & Kantha, P. (2023). The effect of light-emitting diodes (LEDs) on the development of duckweed (*Lemna minor*) in co-culture with red tilapia (*Oreochromis spp.*). *Journal of Fisheries and Environment*, 47(2), 99–115. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/JFE/article/view/257433>

Matsunaga, M., Bemelmans, P. F., Toledo, P. E. N., Dullely, R. D., Okawa, H., & Pedrosa, I. A. (1976). Metodologia de custo de produção utilizada pelo IEA. *Agricultura em São Paulo*, 23(1), 123–139

Martin, N. B., Serra, R., Oliveira, M. D. M., Ângelo, J. A., & Okawa, H. (1998). Sistema integrado de custos agropecuários: CUSTAGRI. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola. 25 p. (IEA, Informações Econômicas, v. 28, n. 1)

- Miltko, R., Majewska, M. P., Wojtak, W., Białek, M., Kowalik, B., & Czauderna, M. (2024). Comparing the chemical composition of lesser duckweed (*Lemna minor* L.) grown in natural and laboratory settings. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 33(3), 357–367. <https://doi.org/10.22358/jafs/189963/2024>
- Mourantian, A., Aslanidou, M., Mente, E., Katsoulas, N., & Levizou, E. (2023). Basil functional and growth responses when cultivated via different aquaponic and hydroponics systems. *PeerJ*, 11, e15664. <https://doi.org/10.7717/peerj.15664>
- Moyo, N. A. G., & Rapatsa-Malatji, M. M. (2023). A review and meta-analysis of selected plant protein sources as a replacement of fishmeal in the diet of tilapias. *Annals of Animal Science*, 23(3), 681–690. <https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0084>
- National Research Council. (2011). *Nutrient requirements of fish and shrimp*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13039>
- Ning, L., Zhang, H., Chen, X., Zhen, J., Chen, S., Guang, J., Xu, C., & Li, Y. (2023). A comparative study on the tolerance of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to high carbohydrate and high lipid diets. *Animal Nutrition*, 13, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.01.007>
- Nogueira, M. C. F., & Henriques, M. B. (2020). Large-scale versus family-sized system production: Economic feasibility of cultivating *Kappaphycus alvarezii* along the southeastern coast of Brazil. *Journal of Applied Phycology*. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02107-2>
- Nose, T. (1966). Recent advances in the study of fish digestion in Japan. In: Proceedings of the Symposium on Finfish Nutrition and Fish Feed Technology. EIFAC/FAO, Belgrade. 15p.
- Oliveira, L. K., Pilz, L., Furtado, P. S., Ballester, E. L. C., & Bicudo, A. J. de A. (2021). Growth, nutritional efficiency, and profitability of juvenile GIFT strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared in a biofloc system on graded feeding rates. *Aquaculture*, 541, 736830. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736830>
- Opiyo, M. A., Mbogo, K., Abwao, J., Kyule, D., Amahwa, C., Nyonje, B. M., & Munguti, J. (2024). Fishmeal partial replacement using duckweed (*Lemna minor*) enhances growth performance and body composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Sustainable Aquatic Research*, 3(3), 127–136. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14555064>
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., Jijakli, M. H., & Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: A review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International*, 26(3), 813–842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>
- Pereira, R. de C. A., & Moreira, A. L. M. (2011). *Manjeriço: cultivo e utilização* (Documentos / Embrapa Agroindústria Tropical, 136). Embrapa Agroindústria Tropical.

Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics—Integrating fish and plant culture* (SRAC Publication No. 454). Southern Regional Aquaculture Center. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/recirculating-aquaculture-tank-production-systems-aquaponics-integrating-fish-and-plant-culture.html>

Refaey, M. M., Mehrim, A. I., Zenhom, O. A., Areda, H. A., Ragaza, J. A., & Hassaan, M. S. (2023). Fresh Azolla, *Azolla pinnata* as a complementary feed for *Oreochromis niloticus*: Growth, digestive enzymes, intestinal morphology, physiological responses, and flesh quality. *Aquaculture Nutrition*, 2023(1), 1403704. <https://doi.org/10.1155/2023/1403704>

Regni, L., Del Buono, D., Miras-Moreno, B., Senizza, B., Lucini, L., Trevisan, M., Morelli Venturi, D., Costantino, F., & Proietti, P. (2021). Biostimulant effects of an aqueous extract of duckweed (*Lemna minor* L.) on physiological and biochemical traits in the olive tree. *Agriculture*, 11(12), 1299. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121299>

Rodgers, D., Won, E., Timmons, M. B., & Mattson, N. (2022). Complementary nutrients in decoupled aquaponics enhance basil performance. *Horticulturae*, 8(2), 111. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020111>

Rupasinghe, J. W., & Kennedy, J. O. S. (2010). Economic benefits of integrating a hydroponic-lettuce system into a barramundi fish production system. *Aquaculture Economics & Management*, 14(2), 81–96. <https://doi.org/10.1080/13657301003776631>

Rusoff, L. L., Blakeney, E. W., Jr., & Culley, D. D., Jr. (1980). Duckweeds (Lemnaceae family): A potential source of protein and amino acids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 28(4), 848–850. <https://doi.org/10.1021/jf60230a040>

Salman, A. K. D., Ferreira, A. C. D., Soares, J. P. G., & de Souza, J. P. (2010). *Metodologias para avaliação de alimentos para ruminantes domésticos* (Documentos, 136). Embrapa Rondônia. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/884369/1/doc136alimentacaod eruminantes.pdf>

Santhoshkumar, P., Yoha, K. S., & Moses, J. A. (2023). Drying of seaweed: Approaches, challenges and research needs. *Trends in Food Science & Technology*, 138, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.008>

Shaw, C., Knopf, K., Roy, K., Ulrichs, C., & Kloas, W. (2024). Animal versus plant protein sources in marine ingredient-free aquaponic diets: A case study on nutrient release, and retention of African catfish (*Clarias gariepinus*) reared in RAS. *Aquaculture*, 584, 740641. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740641>

Silva, D. J., & Queiroz, A. C. (2009). *Análise de alimentos: Métodos químicos e biológicos* (3ª ed.). Editora UFV.

Sinha, A. K., Kumar, V., Makkar, H. P. S., De Boeck, G., & Becker, K. (2011). Non-starch polysaccharides and their role in fish nutrition – A review. *Food Chemistry*, 127(4), 1409–1426. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.042>

- Sugiura, S. H., Dong, F. M., Rathbone, C. K., & Hardy, R. W. (1998). Apparent protein digestibility and mineral availabilities in various feed ingredients for salmonid feeds. *Aquaculture*, 159(3–4), 177–202. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00177-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00177-4)
- Suvarna, K. S., Layton, C., & Bancroft, J. D. (Eds.). (2019). *Bancroft's theory and practice of histological techniques* (8th ed.). Elsevier.
- Tao, Y.-F., Qiang, J., Bao, J.-W., Chen, D.-J., Yin, G.-J., Xu, P., & Zhu, H.-J. (2018). Changes in physiological parameters, lipid metabolism, and expression of microRNAs in genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) with fatty liver induced by a high-fat diet. *Frontiers in Physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01521>
- Tyson, R. V., Treadwell, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1), 6–13.
- Tokunaga, K., Tamaru, C. S., Ako, H., & Leung, P.-S. (2015). Economics of small-scale commercial aquaponics in Hawai'i. *Journal of the World Aquaculture Society*, 46(1), 20–32. <https://doi.org/10.1111/jwas.12173>
- Vieira, R. F., & Simon, J. E. (2000). Chemical characterization of basil (*Ocimum* spp.) found in the markets and used in traditional medicine in Brazil. *Economic Botany*, 54(2), 207–216. <https://doi.org/10.1007/BF02907824>
- Wang, Y., Xu, P., Nie, Z., Li, Q., Shao, N., Gao, J., & Xu, G. (2020). Effects of feeding rates on growth, digestive enzyme activity, serum biochemical parameters, and body composition of juvenile, genetically improved, farmed Nile tilapia reared in an in-pond raceway recirculating culture system. *North American Journal of Aquaculture*, 82(1), 75–83. <https://doi.org/10.1002/naaq.1012>
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W., & Khanal, S. K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering*, 76, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>
- Yang, T., & Kim, H.-J. (2019). Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. *Scientia Horticulturae*, 256, 108619. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108619>
- Zahan, S., Rana, K. M. S., Islam, M. K., Afrin, R., Islam, T., & Salam, M. A. (2018). Impact of calcium supplement through egg shell on tomato (*Solanum lycopersicum*) production in aquaponic system. *International Journal of Applied Research*, 4(3), 134–139.
- Zuluaga-Hernández, C. D., Hincapié, C. A., & Osorio, M. (2023). Non-conventional ingredients for tilapia (*Oreochromis* spp.) feed: A systematic review. *Fishes*, 8(11), 556. <https://doi.org/10.3390/fishes8110556>

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa tese investigou o papel de lentilha-d'água do gênero *Lemna* como componente funcional em aquaponia, articulando uma revisão crítica sobre aplicações e lacunas de pesquisa e um ensaio experimental em sistema acoplado com tilápia-do-nilo e manjeriço. Em conjunto, os resultados sustentam que a macrófita pode simultaneamente contribuir para a circularidade de nutrientes, apoiar o manejo alimentar dos peixes e elevar a produtividade vegetal, desde que respeitados limites operacionais e zootécnicos do sistema. À luz dos achados e lacunas mapeadas, recomenda-se, para pesquisas futuras: (1) incentivos para a ampliação de estudos com macrófitas em aquaponia; (2) comparação sistemática no uso de macrófita fresca vs. processada (farinha), incluindo estabilidade composicional, custo de preparo e impactos sobre o sistema; (3) avaliação de diferentes estratégias manejo alimentar dos peixes associado ao uso de macrófitas (taxas de arraçoamento, frequência alimentar, níveis de inclusão/substituição, fornecimento controlado versus *ad libitum*); (4) padronização de métricas e protocolos (inclusão em base de matéria seca, caracterização bromatológica e fatores antinutricionais) para permitir comparabilidade entre estudos; (5) análises de viabilidade econômica e risco operacional em condições comerciais; e (6) estratégias de cultivo e manejo da biomassa da macrófita (colheita, contenção, prevenção de escapes). Este trabalho, portanto, contribui com evidências experimentais e um enquadramento crítico que aproximam a macrófita do uso prático em aquaponia, ao mesmo tempo em que delineiam a trilha de pesquisa necessária para consolidar recomendações de manejo reprodutíveis em diferentes contextos produtivos.