

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Formulação de rações versáteis para ajuste da relação N:P:K em sistemas de aquaponia: desempenho e higidez de juvenis de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*), e qualidade e quantidade na produção de biomassa de alface

Stefano Francisco Pereira Duarte

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Ciência Animal e Pastagens

Piracicaba
2023

Stefano Francisco Pereira Duarte
Engenheiro de Biosistemas

Formulação de rações versáteis para ajuste da relação N:P:K em sistemas de aquaponia:
desempenho e higidez de juvenis de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*), e qualidade
e quantidade na produção de biomassa de alface

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **BRUNNO DA SILVA CEROZI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Ciência Animal
e Pastagens

Piracicaba
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Duarte, Stefano Francisco Pereira

Formulação de rações versáteis para ajuste da relação N:P:K em sistemas de aquaponia: desempenho e higidez de juvenis de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*), e qualidade e quantidade na produção de biomassa de alface / Stefano Francisco Pereira Duarte. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

66 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Aquaponia 2. *Lactuca sativa* 3. Potássio 4. Tilápia I. Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Brunno da Silva Cerozi, pela oportunidade e excelente orientação e paciência ao longo do mestrado. Sou grato por todos os ensinamentos e por todas as conversas que tivemos nesse período, sendo elas fundamentais para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À Universidade de São Paulo, em especial à Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' e o Programa de Pós Graduação em Ciência Animal e Pastagens por todo o suporte e infraestrutura disponibilizados para o desenvolvimento profissional.

A todos os professores e pesquisadores pelo suporte, ensinamentos e sugestões, em especial ao Prof. Dr. José Eurico Possebon Cyrino, por toda atenção e encorajamento no projeto.

Aos técnicos do Setor de Piscicultura Ismael Baldessin Junior e Sérgio Vanderlei Pena pelo auxílio na instalação e montagem dos sistemas de aquaponia, além da amizade e dos conselhos ao longo desse ciclo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de Mestrado (Processo 2021/00936-2) e por possibilitar o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os integrantes do grupo de pesquisa do Setor de Piscicultura da ESALQ/USP, por todo apoio e ajuda ao longo do mestrado, em especial o Gustavo, Matheus, Cristiano, Ana, Vitória, Isabela, Leonardo, Raphael, Thais, Laís e Angélica, por todo o auxílio durante o manejo e análises da dissertação.

Às pessoas mais importantes da minha vida, Ana Paula, Francisco, Ana Flávia e Bruna, por sempre acreditarem em mim. Obrigado por todo o suporte, incentivo e por serem meu alicerce.

Stefano Duarte

EPÍGRAFE

“Mesmo desacreditado e ignorado por todos, não posso desistir, pois para mim, vencer é nunca desistir.”.

Albert Einstein

“Alguns homens veem as coisas como são, e dizem ‘Por quê?’ Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo ‘Por que não?’”

George Bernard Shaw

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Aquaponia.....	15
2.2. Rações e as deficiências minerais em sistemas de aquaponia.....	16
2.3. Potássio em sistemas de aquaponia.....	17
2.4. Minerais nas dietas de peixes.....	18
2.5. Nutrientes em sistemas de produção vegetal hidropônico.....	20
2.6. Alface (<i>Lactuca sativa L.</i>) e seu aspecto nutricional.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Área de estudo.....	23
3.2. Sistema de aquaponia experimental.....	23
3.3. Formulação e preparação das dietas experimentais.....	26
3.4. Avaliação da produção de biomassa de alface.....	27
3.5. Tilápia e a avaliação dos seus parâmetros de desempenho.....	28
3.6. Monitoramento da qualidade da água.....	29
3.6.1. Amônia pelo método do fenato.....	27
3.6.2. nitrito pelo método da sulfalinamida.....	29
3.6.3. nitrato pelo método da redução por cloreto de vanádio.....	29
3.6.4. Fósforo pelo método do vanadomolibdato.....	28
3.6.5. Ferro dissolvido pelo método da fenantrolina.....	29
3.7. Análise foliar.....	31
3.8. Análises estatísticas.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1. Desempenho produtivo da tilápia do Nilo.....	33
4.2. Análise foliar.....	37
4.3. Produção de biomassa vegetal.....	42
4.4. Qualidade da água.....	43

5. CONCLUSÃO55
REFERÊNCIAS57

RESUMO

Formulação de rações versáteis para ajuste da relação N:P:K em sistemas de aquaponia: desempenho e higidez de juvenis de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*), e qualidade e quantidade na produção de biomassa de alface

A aquaponia é um sistema que integra a produção de peixes e plantas em um regime fechado de recirculação de água, em que os resíduos da produção de peixes são biodisponibilizados para as plantas, que absorvem esses nutrientes melhorando assim a qualidade da água para os peixes. Em sistemas de produção de aquaponia, o potássio é o nutriente que geralmente apresenta maiores limitações, visto que as rações fornecidas aos peixes são formuladas para atender à sua exigência nutricional e não para a liberação de nutrientes que atendam às exigências das plantas. Nesse aspecto, os objetivos desse trabalho foram determinar a eficácia da formulação de rações versáteis para aquaponia contendo níveis de inclusão de fosfato de potássio em uma dieta para peixes sobre a quantidade e qualidade da biomassa produzida de alface e determinar os efeitos no desempenho e alterações no quadro hematológico de juvenis de tilápia. Os ensaios relativos a cada nível de inclusão de fosfato de potássio foram conduzidos e analisados em um delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos e três repetições cada ($n=3$) em nove sistemas de aquaponia independentes. Os tanques foram povoados com juvenis de tilápia, que foram alimentados duas vezes ao dia a uma taxa de 3% do peso vivo, com três dietas experimentais formuladas para atender as exigências nutricionais das tilápias, contendo a inclusão de 0 (T1), 50 (T2), e 100% (T3) de fosfato de potássio em substituição ao fosfato bicálcico. Os valores de ganho de peso, índice de conversão alimentar e taxa de crescimento específico apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, sendo T2 e T3 com melhor desempenho dos juvenis de tilápia. Para as plantas, T3 apresentou a maior produção de biomassa fresca. Os tratamentos T2 e T3 apresentaram maiores valores comparativamente ao T1 em relação à absorção de K e P pelas plantas. Os dados de temperatura e OD da água foram similares entre os tratamentos. T1 apresentou diferença significativa do pH da solução aquapônica em relação a T3. T2 e T3 apresentaram valores superiores de condutividade elétrica ao longo do experimento. A concentração de P e K na água foi maior para o T2 e T3. T3 apresentou relação N:P 12,5 e 2,5 vezes superior a T1 e T2, respectivamente. A relação N:K teve T3 com a maior relação (1:1,61). Já a relação K:P apresentou T1 com a maior relação (1:11,29), sendo T2 e T3 apresentaram valores 5,40 e 7,19 vezes menor. Não foram observadas diferenças significativas no perfil hematológico dos peixes alimentados com os diferentes tratamentos. As rações versáteis apresentaram resultados promissores, melhorando a produção de biomassa de tilápia e alface através do ajuste da relação N:P:K em sistemas de aquaponia.

Palavras-chave: Aquaponia, *Lactuca sativa*, Potássio, Tilápia

ABSTRACT

Formulation of versatile feeds to adjust the N:P:K ratio in aquaponics systems: performance and health of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), and quality and quantity in lettuce biomass production

Aquaponics is a system that integrates fish and plant production in a closed recirculating system, in which fish production wastes become bioavailable nutrients for plants that have a high nutrient removal capacity and thus water quality enhancement for fish. In aquaponic production systems, potassium is the nutrient that generally presents the greatest limitations, since the feeds supplied to the fish are formulated to meet their nutritional requirements and not to release nutrients that meet plant requirements. The objectives of this work were to determine the effectiveness of formulating versatile feeds for aquaponics containing increasing levels of potassium phosphate in a diet for fish on the quantity and quality of vegetable biomass produced from lettuce and to determine the effects on growth performance and changes in the hematological status of tilapia juveniles. were used. The trials for each potassium phosphate inclusion level were conducted and analyzed in a completely randomized design, with three treatments and three replications each (n=3) nine independent aquaponics systems. The tanks were populated with tilapia juveniles, which were fed twice a day at a rate of 3% of live weight, with three experimental diets formulated to meet the nutritional requirements of tilapia, containing the inclusion of 0 (T1), 50 (T2), and 100% (T3) of potassium phosphate replacing dicalcium phosphate. The results of weight gain, feed conversion rate and specific growth rate showed significant differences among treatments, with T2 and T3 showing the best fish growth. For plants, T3 showed the highest production of fresh biomass. Treatments T2 and T3 showed higher values compared to T1 in terms of K and P uptake by plants. Water temperature and OD data were similar among all treatments. T1 showed a significant difference in the pH of the aquaponic solution compared to T3. T2 and T3 showed higher values of electrical conductivity throughout the experiment. The concentration of P and K in the water was higher for T2 and T3. T3 showed a N:P ratio 12.5 and 2.5 times higher than T1 and T2, respectively. The N:K ratio had T3 with the highest ratio (1.0:1.61). The K:P ratio presented T1 with the highest ratio (1.0:11.29), with T2 and T3 presenting values 5.40 and 7.19 times lower. No significant differences were observed in the hematological profile of fish fed with the different treatments. The versatile feeds showed promising results, improving the production of tilapia and lettuce biomass by adjusting the N:P:K ratio in aquaponics systems.

Keywords: Aquaponics, *Lactuca sativa*, Potassium, Tilapia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes biológicos de um sistema de aquaponia	15
Figura 2. (A) Estufa agrícola e (B) Croqui da estufa comercial com a área experimental em destaque vermelho.	23
Figura 3. Componentes do sistema experimental aquapônico	24
Figura 4. Componentes do tanque experimental aquapônico sendo (A) Instalação da bomba com sistema de reator biológico acoplada dentro do tanque de fundo cônico e no sistema hidráulico; (B) Bomba com sistema de filtragem biológica submersos em ddh2o em funcionamento no sistema aquapônico; (C) Tanque de fundo cônico capacidade de 26l com a válvula para limpeza de resíduos decantados no tanque.	25
Figura 5. Sistema aquapônico experimental	25
Figura 6. Processos para produção das rações experimentais extrudadas para tilápias do nilo sendo (A) Moinho de ingredientes; (B) Misturador de ingredientes; (C) Processo de extrusão da ração; (D) Ração armazenada em bandejas metálicas para secagem e pronta para alimentação dos peixes.	26
Figura 7. Processo de plantio e de transplântio das alfaces para o sistema hidropônico. (A) Embalagem com sementes psiquê (Sakata ®); (B) Plantio das sementes de alface em substrato em bandeja de 140 células; (C) Emergência das plântulas; (D) Visão do substrato com a planta; (E) Transplântio das mudas para os perfis hidropônicos.	27
Figura 8. Processos para avaliação da produção das alfaces. (A) Alfaces no dia da colheita; (B) Pesagem massa fresca total alface sem a raiz; (C) Pesagem de fitomassa úmida de 6 folhas de alface; (D) Massa úmida identificada em sacos de papel kraft, e levadas para secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C, até secagem completa; (E) Fitomassa seca de 6 folhas de alface.	28
Figura 9. Teores de macronutrientes das folhas secas das plantas da alface psiquê determinados ao final do período experimental no sistema aquapônico com as respectivas faixas recomendadas de nutrientes, sendo: média – valores médios dos respectivos nutrientes em cada tratamento; LS e LI – limite superior e inferior recomendados por Silva (2009) para cada macronutriente.	38
Figura 10. Teores de micronutrientes das folhas das plantas da alface psiquê determinados ao final do período experimental no sistema aquapônico com as respectivas faixas recomendadas de nutrientes, sendo: média – valores médios dos respectivos nutrientes em cada tratamento; LS e LI – limite superior e inferior recomendados por Silva (2009) para cada micronutriente. fonte: próprio autor	39
Figura 11. Produtividade média da alface psiquê determinada ao final do período experimental no sistema aquapônico em cada tratamento.	42
Figura 12. Valores médios semanais de temperatura e oxigênio dissolvido do sistema de aquaponia, contendo plantas de alface (Psiquê) e tilápias do Nilo, sendo: (A) Temperatura da água sistema de aquaponia no período da manhã (9:00h); (B) Temperatura da água sistema de aquaponia no período da tarde (16:00h); (C) Oxigênio dissolvido na água sistema de aquaponia no período da manhã (9:00h); (D) Oxigênio dissolvido na água sistema de aquaponia no período da tarde (16:00h).	44
Figura 13. Valores médios semanais do pH e condutividade elétrica na água do sistema de aquaponia, contendo plantas de alface (Psiquê) e tilápias do Nilo.	46

Figura 14. Concentrações de elementos na solução aquapônica referente ao comportamento da (A) amônia (N-NH₄⁺); (B) nitrito (N-NO₂⁻), (C) Nitrato (N-NO₃⁻), (D) fósforo (P-PO₄³⁻) e (E) potássio ao longo do período experimental.51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição dos principais fertilizantes utilizados no preparo de soluções nutritivas para o cultivo de plantas hidropônicas	21
Tabela 2. Composição das dietas experimentais dos juvenis de tilápia nos tratamentos com substituição de 0, 50 e 100% da fonte fosfatada (1%) de fosfato bicálcico por fosfato de potássio	26
Tabela 3. Desempenho zootécnico das tilápias (<i>Oreochromis niloticus</i>), cultivadas em sistema de aquaponia. ..	33
Tabela 4. Perfil hematológico das tilápias (<i>Oreochromis niloticus</i>), cultivadas em sistema de aquaponia ao final do período experimental.	35
Tabela 5. Produção de biomassa fresca média de alface cultivada em sistema de aquaponia ao final do período experimental.	42
Tabela 6. Valores do teste de comparação de médias (Tukey) para os dados médios de pH e CE.	46
Tabela 7. Valores médios das relações N:P, N:K e K:P das soluções aquapônicas experimentais comparadas com valores encontrados na literatura.	52

1. INTRODUÇÃO

A produção de peixes é muito importante para a alimentação humana, sendo a aquicultura um dos setores de produção animal que mais crescem no mundo. Os dados da pesquisa da pecuária municipal 2020, mostram que o setor vem apresentando crescimento anual desde o início da série histórica em 2013, e isso se deve pela maior modernização e profissionalização dos empreendimentos piscícolas (IBGE, 2020). A produção de peixes gera resíduos que podem afetar negativamente o ambiente e a sua produção (ABASS et al., 2016). Minimizar o consumo de água e aproveitar melhor os nutrientes residuais, se tornaram uma demanda cada vez mais presente nas pautas produtivas do setor, abrindo assim um importante espaço para o sistema de produção aquapônico (HUNDLEY; NAVARRO, 2013).

A aquaponia é um sistema que integra a produção animal (piscicultura) e vegetal (hidroponia) através do aproveitamento dos resíduos dos sistemas produtivos piscícolas, em que as sobras da alimentação dos peixes e suas excretas passam por um tratamento biológico, sendo que as bactérias convertem os resíduos em nutrientes e as plantas removem os nutrientes e melhoram a qualidade da água para os organismos aquáticos (ARAÚJO, 2015; LOVE et al., 2014; RAKOCY, 2012). Uma das principais vantagens na utilização de sistemas de aquaponia é que produzem alimentos, tanto vegetal quanto animal, e aproveitam os resíduos do sistema, sendo uma alternativa produtiva que ajuda a diminuir os impactos ambientais que gerariam a produção de peixes e hortaliças isoladamente (ADLER et al., 2000; TYSON; TREADWELL; SIMONNE, 2011). No entanto, a deficiência de nutrientes é um dos principais desafios para os produtores de aquaponia, em particular, a deficiência de potássio (K), que pode ter um impacto significativo na produção de plantas (GODDEK et al., 2015). Uma das características mais importantes do sistema é que não necessita de um substrato para o desenvolvimento das plantas, ou seja, em um espaço pequeno, em um sistema aquapônico simplificado, é possível produzir uma grande quantidade de vegetais (CASTELLANE; ARAÚJO, 1995).

A tilápia (*Oreochromis Niloticus*) é a espécie de peixe mais produzida no Brasil, representando 61,1% da produção nacional, alcançando mais de 323 mil toneladas em 2019, mostrando um crescimento real de 3,35% em relação ao ano de 2018 (IBGE, 2020). A tilápia em função da sua rusticidade, adaptabilidade à criação em sistemas fechados, alta tolerância às flutuações nos parâmetros de qualidade da água e por ser um peixe bastante resistente com boa conversão alimentar, além de tolerar altas densidades de estocagem e ter boa aceitação no mercado, é o peixe mais usado em sistemas aquapônicos em todo o mundo (LOVE et al., 2015).

A produção de vegetais é totalmente depende dos resíduos produzidos pelos peixes em sistemas aquapônicos. A densidade de estocagem de peixes e o tipo de ração fornecida a eles determinam a carga de nutrientes disponíveis no sistema, sendo que os parâmetros de qualidade da água, da ração e fatores ambientais influenciam diretamente na excreção (LENNARD, 2012). De acordo com Nelson (2007), a produção de 1 kg de peixe em sistema confinado, geram efluentes que podem produzir até 7 kg de biomassa vegetal. A alface é uma planta que apresenta um ciclo de crescimento rápido que possui elevada capacidade de assimilar nitrogênio e fósforo através da solução nutritiva (RESH, 2016). Isso torna a alface uma boa cultura-alvo para integração em sistemas de recirculação de alta densidade de produção de peixes que apresentam alta acumulação de nutrientes.

Nesse contexto, a aquaponia vem se mostrando uma excelente alternativa de produção sustentável e integrada dos cultivos, através da redução do consumo de água e melhor utilização de nutrientes. Entretanto, os sistemas aquapônicos devem ser mais estudados, de maneira a se otimizar sua produção e corrigir os desafios encontrados por ele, como a melhora da eficiência e o equilíbrio entre os nutrientes requeridos pelos peixes e vegetais na aquaponia através do fornecimento de rações de alta qualidade, sem a necessidade de suplementação mineral, e com o melhor ajuste da relação N:P:K para o uso dos peixes e plantas. Os conhecimentos obtidos poderão ser aplicados na

produção otimizada de peixes e hortaliças. Assim, os principais objetivos deste trabalho foram determinar a eficácia da formulação de rações versáteis para aquaponia contendo níveis de inclusão de fosfato de potássio em dietas de peixe sobre a quantidade e qualidade da biomassa produzida de alface e determinar os efeitos no desempenho e alterações no quadro hematológicos de juvenis de tilápia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aquaponia

A aquaponia é um sistema de produção que integra a criação de peixes e o cultivo de vegetais hidropônicos que tem recebido grande atenção devido à sua capacidade de integrar a produção de alimentos e diminuir significativamente os impactos ambientais gerados por tais sistemas produtivos, de forma a minimizar o consumo de água e reaproveitar os nutrientes do sistema de maneira eficiente e sustentável, através de um sistema fechado de recirculação e tratamento da água (DANAHER et al., 2013; SHETE et al., 2016; THOMAS et al., 2019).

A aquaponia é um sistema integrado de produção de alimentos com baixo consumo de água e alto aproveitamento do resíduo gerado (TYSON; TREADWEL; SIMONNE, 2011). O uso de efluentes de pisciculturas para a produção de plantas reduz a utilização de fertilizantes químicos e fornece tratamento e destinação correta aos efluentes, ricos em minerais (KHATER et al., 2015). A aquaponia é baseada em processos biológicos naturais em que o efluente é tratado através de reatores biológicos que disponibilizam os minerais através de nitrificação, assim, as plantas conseguem absorver os nutrientes (Figura 1), devolvendo a água para os tanques de piscicultura parcialmente desmineralizada (NUWANSI et al., 2019, 2021).

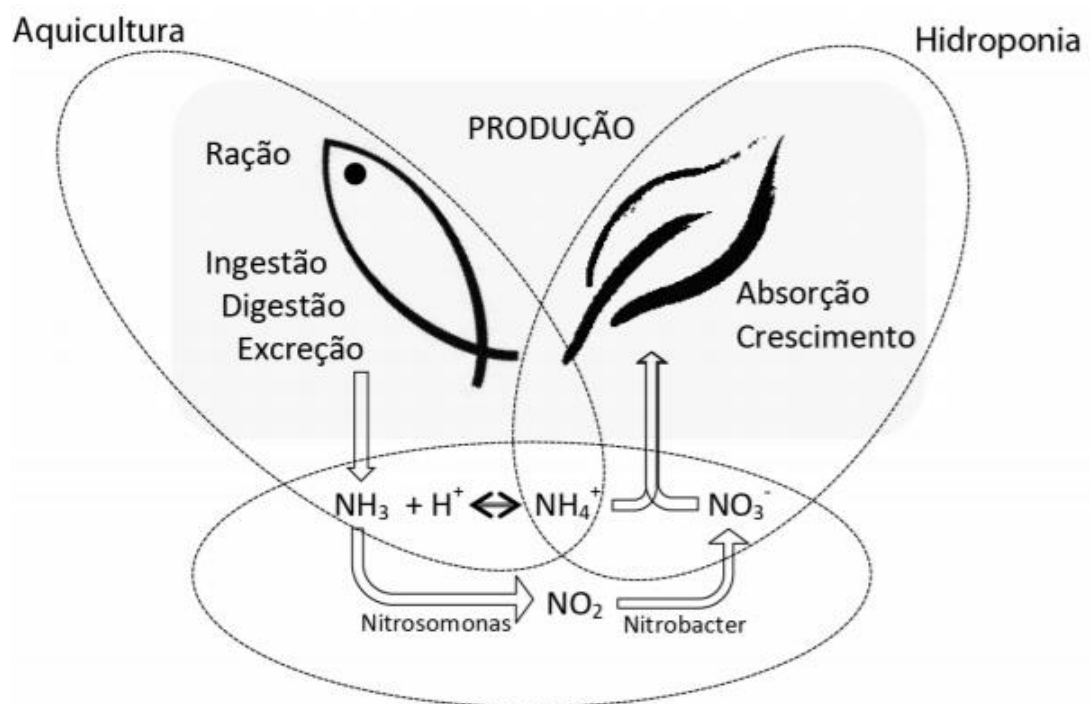


Figura 1. Componentes biológicos de um sistema de aquaponia

Fonte: Paulo César Falanghe Carneiro (2015)

A ração oferecida aos peixes é o insumo mais importante para o fornecimento de nutrientes em um sistema aquapônico. A ração fornecida aos animais contém geralmente um alto teor de proteína, sendo assim, o principal metabólico excretado pelos peixes, através das brânquias e fezes, é o nitrogenado, principalmente na forma de amônia não ionizada (CARNEIRO et al., 2015). A amônia pode ser também o produto da decomposição bacteriana de resíduos de alimentos não consumidos e algas mortas (ROOSTA; HAMIDPOUR, 2011), e seu acúmulo pode ser tóxico para

os peixes. A ação de bactérias nitrificantes (*Nitrosomonas* e *Nitrobacter*) (SALAM; ASADUJJAMAN; RAHMAN, 2013) converte a amônia em nitrito (NO_2) e depois a nitrato (NO_3). O nitrato pode ser usado como fertilizante para o crescimento das plantas (GODDEK et al., 2015).

Esse sistema produtivo é uma alternativa sustentável de produção de alimentos, pois permite altas densidades de estocagem nos tanques de peixes e elevada produção de plantas, podendo ser realizadas em pequenas áreas, através do aproveitamento quase que integral da ração como nutriente para os sistemas de produção animal e vegetal, gerando alimentos com características saudáveis (orgânicas), e apresentando grande potencial de diversificação de produção vegetal (hortaliças) através do cultivo hidropônico e menor impacto ao meio ambiente (HUNDLEY; NAVARRO, 2013; LOVE et al., 2014).

Entre as vantagens da aquaponia tem-se a eficiência hídrica do sistema — visto que as perdas de água para o ambiente ocorrem apenas pela evapotranspiração do vegetal e pela evaporação da água do reservatório onde ficam alojados os peixes e o reator (THOMAS et al., 2019), o uso de pequenas áreas e mais próximas aos centros urbanos, alta produtividade, possibilidade de produzir um produto de boa qualidade durante todo o ano, o aproveitamento total de água e ração, produção de um produto de alta qualidade e livre de agrotóxicos e antibióticos, diversificação e aumento da renda e menor investimento em fertilizantes para o cultivo das plantas (CARNEIRO et al., 2015).

Entretanto, o sistema aquapônico apresenta como desvantagens produtivas a dependência de energia elétrica para o funcionamento do sistema, falta de tecnologias e treinamentos para controle dos parâmetros produtivos e de qualidade, limitações quanto ao controle de doenças (uso de agrotóxicos e antibióticos), falta de conhecimento técnico e qualificação dos profissionais, demora na interpretação dos parâmetros de qualidade da água, falta de integração de conhecimento dos sistemas de produção e o dimensionamento errôneo de sistemas (CARNEIRO et al., 2015; SÁTIRO; NETO; DELPRETE, 2018).

2.2. Rações e as deficiências minerais em sistemas de aquaponia

Sistemas de aquaponia são baseados no uso de nutrientes resultantes do metabolismo dos peixes para a produção de plantas, em que são necessários significativamente menos fertilizantes para o cultivo eficiente de plantas em comparação com a hidroponia convencional baseada em fertilizantes inorgânicos. A alimentação dos peixes fornece a maioria dos nutrientes essenciais para o crescimento ideal das plantas, exceto cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e ferro (Fe) que geralmente são insuficientes e devem ser suplementados em sistemas aquapônicos (RAKOCY, 2012). As rações são combinações de ingredientes que devem atender as necessidades nutricionais dos animais de maneira a fornecer todos os nutrientes para o seu desenvolvimento nas diferentes fases de criação (CARDINAL; COSTA; RIBEIRO, 2019).

De acordo com Yep e Zheng (2019), os peixes necessitam de baixas concentrações de diversos íons, como Fe, Cu, Mg e Mn, e baixas demandas de K. Devido à baixa demanda por esses nutrientes pelos peixes, os efluentes desses sistemas de produção apresentam concentrações baixas deles, causando assim deficiências nutricionais relatadas em sistemas de aquaponia, principalmente no módulo de produção de hortaliças. Portanto, os nutrientes como K, Fe e Mg precisam ser suplementados diretamente na água por não estarem disponíveis em quantidades suficientes para o desenvolvimento dos vegetais (CARNEIRO et al., 2015). Ressalta-se que as rações comerciais são formuladas e balanceadas para suprir a demanda única e exclusivamente dos peixes, não se importando com as necessidades nutricionais das plantas do sistema (SOMERVILLE et al., 2014).

A produção aquapônica demanda um equilíbrio das concentrações de nutrientes e pH para o crescimento ideal de plantas, peixes e bactérias nitrificantes. A densidade de estocagem é um fator chave para fornecer uma quantidade adequada de nutrientes aos peixes e plantas em aquaponia, em detrimento da qualidade e quantidade de alimentos fornecidos aos animais (NUWANSI et al., 2021). Na literatura, encontram-se os efeitos da falta de nutrientes, principalmente K e Fe para plantas cultivadas em aquaponia, o que causa a redução de seus índices produtivos. No entanto, em um sistema multitrófico como a aquaponia em que a ênfase é dada à sustentabilidade e biossegurança dos produtos, a produção de vegetais e peixes não devem ser o único critério, sendo considerados as respostas funcionais das plantas e o bem-estar dos peixes (STATHOPOULOU et al., 2021).

Para minimizar os impactos gerados pelo fornecimento de rações que atendem apenas as necessidades dos peixes, deve-se fornecer rações de melhor qualidade com maior disponibilidade de nutrientes. Outra maneira seria realizar a suplementação mineral, que deve ser realizada de acordo com o estágio de desenvolvimento dos componentes do sistema, sendo necessário observar os parâmetros de qualidade água e as necessidades nutricionais dos peixes e plantas, tomando cuidado para não fornecer nutrientes em excesso, o que pode fazer com que o sistema se torne economicamente inviável (CARNEIRO et al., 2015; SOMERVILLE et al., 2014).

Um sistema aquapônico deve ser dimensionado baseado na quantidade ração adicionada ao sistema diariamente, sendo que a alimentação dos peixes afeta diretamente o desempenho das plantas em sistemas de aquaponia (ENDUT et al., 2010). A solução nutritiva é composta pelos resíduos alimentares dos peixes e por suas excretas que são quase que em sua totalidade nitrogenadas (LOVE et al., 2014). O sistema não apresenta deficiências de nitrogênio, visto que possui boa disponibilização dos mesmos (excretas nitrogenadas e resíduos alimentares) através do processo de nitrificação que ocorre no reator biológico (WONGKIEW et al., 2017). O sistema aquapônico de maneira geral apresenta boa recuperação dos nutrientes, mas necessita de disponibilização em quantidades suficientes pelas rações, ou por meios externos (suplementos) para o seu bom funcionamento.

2.3. Potássio em sistemas de aquaponia

Em sistemas de produção de aquaponia, o potássio é o nutriente que geralmente apresenta maiores limitações, visto que as rações fornecidas aos peixes são formuladas para atender à sua exigência nutricional e não para a liberação de nutrientes que atendam às exigências das plantas (YEP; ZHENG, 2019). Sistemas aquapônicos apresentam menor disponibilidade de K para as plantas do que sistemas hidropônicos, sendo relatadas diferenças de 45 vezes a concentração do elemento entre sistemas (GRABER; JUNGE, 2009). A sua deficiência é a principal causa do baixo desenvolvimento e qualidade das culturas vegetais, sendo necessário sua complementação para o melhor aproveitamento das plantas (JOHN et al., 2022).

A deficiência de potássio prejudica o desenvolvimento e desempenho das plantas, afetando o transporte de nutrientes, principalmente íons de Fe e NH_4^+ , o equilíbrio celular osmótico e a ativação de enzimas (GAJDANOWICZ et al., 2011). Além disso em concentrações abaixo do recomendado para as culturas, podem causar alterações nos metabólitos secundários, resultando em aumentos de polifenóis, alcaloides e glucosinolatos nas plantas (HAFSI et al., 2017; SON et al., 2021). Para evitar que a deficiência de K cause danos às culturas, é recomendado a disponibilidade de 7 mg de K na solução para cada 1 mg de K absorvido pelos vegetais (TSUKAGOSHI et al., 2021).

O potássio é um nutriente fundamental para os animais e desempenha funções importantes para o desenvolvimento de peixes, sendo essencial para diversos processos fisiológicos, entre eles o equilíbrio ácido-base, a osmorregulação, o equilíbrio iônico e processos de excitação muscular e nervosa (LALL; KAUSHIK, 2021). Em

peixes, os íons de potássio são responsáveis pelo relaxamento dos músculos e são usados em reações enzimáticas, e em excesso, podem prejudicar a absorção de magnésio (LIM; WEBSTER, 2015). Os peixes dificilmente apresentam sintomas de deficiência desse nutriente, visto que as suas demandas são sempre atendidas pela sua disponibilidade na ração e na água (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2011).

Ao investigarem dietas com diferentes níveis de potássio na alimentação de *Heteropneustes fossilis*, Zafar e Khan (2019) recomendaram a inclusão de 5,44 g kg⁻¹ de potássio nas rações da espécie, de maneira que essa inclusão melhorou circunstancialmente o crescimento e o consumo de ração dos peixes, além de auxiliar na atividade de Na⁺-K⁺-ATPase. Ao realizarem um ensaio de alimentação com a finalidade de determinar as exigências dietéticas de K para tilápias híbridas (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*), Shiau e Hsieh (2001) recomendaram uma concentração de 2-3 g kg⁻¹ de potássio nas dietas, visto que nessas concentrações obtiveram otimização dos índices produtivos. Em estudo sobre a dinâmica de liberação de nutrientes em sistemas de aquaponia, Cerozi et al. (2022) utilizaram rações para alimentar tilápias que apresentavam teores de potássio de 8,10 g kg⁻¹, e observaram que o K foi o segundo nutriente de maior liberação no sistema. De acordo com os autores os níveis de potássio possivelmente estavam em maiores concentrações do que as exigências das tilápias, porém não há estudos que comprovem tais exigências do nutriente.

Em estudo, John et al. (2022) mostraram que a suplementação de potássio em sistemas produtivos aquapônicos não apresentaram efeitos negativos no desempenho de *P. hypophthalmus*, recomendando assim a aplicação do potássio de até 150 mg L⁻¹ nesse tipo de sistema de produção. Já Stathopoulou et al. (2021), ao suplementarem o sistema de aquaponia com 5 mg L⁻¹ de Fe e 120 mg L⁻¹ de K, chegaram à conclusão de que essa complementação mineral não afetou o crescimento, desempenho e sobrevivência das tilápias, apesar de ter ocorrido uma maior concentração de K nas brânquias dos peixes. Ambos os autores sugerem que a complementação de K não compromete a segurança alimentar dos produtos do sistema de produção aquapônico.

A disponibilização de potássio pode gerar impactos positivos em sistema de aquaponia, em que pode otimizar a produção e rendimento das plantas sem prejudicar o desenvolvimento dos peixes (JOHN et al., 2022). Sua oferta junto às dietas otimiza o manejo de sistemas aquapônicos, reduzindo a necessidades de outras formas de suplementação do mineral no sistema. Além disso, trata-se de um nutriente essencial para o desenvolvimento animal e vegetal do sistema, participando ativamente de diversas funções, sendo elas estruturais ou metabólicas, sendo um determinante produtivo para o sucesso da produção integrada de vegetais e peixes (MEENA et al., 2022).

2.4. Minerais nas dietas de peixes

Os animais aquáticos necessitam de minerais para manter seu pleno desenvolvimento, sendo esses, substâncias inorgânicas importantes para manutenção de reações do metabolismo, constituição de tecidos e manutenção de processos vitais (LALL; KAUSHIK, 2021; MORAES; DE ALMEIDA, 2020). Os minerais são subdivididos em macrominerais (Cálcio (Ca), Fósforo (P), Sódio (Na), Potássio (K), Cloro (Cl), Magnésio (Mg)) e microminerais (Manganês (Mn), Zinco (Zn), Ferro (Fe), Cobre (Cu), Selênio (Se), Iodo (I)) (GATLIN III, 2010). Os macrominerais são importantes para o crescimento e estrutura dos tecidos dos peixes, para as rotas metabólicas e no controle de pH e da regulação da homeostase animal. Os microminerais, são cofatores de uma grande variedade de enzimas, além de serem componentes de hormônios e enzimas. A maioria dos minerais absorvidos pelos peixes vem da própria água, e são absorvidos pelo mecanismo de filtração das brânquias (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2011).

Devido a essa absorção de minerais da água através das brânquias e da pele, a formulação da quantidade de minerais nas dietas dos peixes se torna uma prática mais complicada, pois muitos minerais são exigidos em pequenas quantidades (LALL, 2002). Os valores das concentrações dos minerais exigidos pelos peixes variam de acordo com a espécie, disponibilidade, fatores climáticos e ambientais (temperatura, oxigênio dissolvido), entre outros fatores (LOGATO, 2000). De modo a exemplificar, a tilápia necessita das quantidades respectivas de P e K 0,40% e 0,20-0,30%, enquanto o bagre-do-canal 0,33% e 0,26%, enquanto para a truta, a quantidade de P exigida é de 0,70%, mas o valor de K ainda não foi determinado (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2011).

Os minerais, se ingeridos em altas concentrações, podem gerar uma alta carga de resíduo no ambiente, o que pode levar à mortandade de peixes (QUEIROZ et al., 2021). Os macrominerais e microminerais devem ser balanceados de forma a minimizar os processos de excreção, que pode acarretar quadros sérios de intoxicação, além da poluição ambiental, sendo que o fósforo e nitrogênio em altas concentrações podem gerar a eutrofização do meio aquático (CYRINO et al., 2010).

O cálcio (Ca) e o fósforo (P) são macrominerais que exercem uma função importante em várias reações bioquímicas e fisiológicas do animal e são responsáveis pelo desenvolvimento do sistema esquelético (MORAES; DE ALMEIDA, 2020). A relação Ca:P no corpo do peixe varia entre 1,6-2:1, em que a maior quantidade de Ca nos peixes está localizada nos ossos e em suas escamas, assim, em caso de deficiência de cálcio, os animais mobilizam esse macronutriente das escamas e ossos (LALL; KAUSHIK, 2021). O cálcio está ligado com o sistema de contração muscular, transmissão de impulsos nervosos, manutenção da membrana celular e atividade enzimática. Já o fósforo, apresenta maior parte do seu conteúdo na forma de fosfato tricálcico dos ossos, em sinergia com o cálcio (MORAES; DE ALMEIDA, 2020). O P faz parte das moléculas de DNA, RNA e ATP, da membrana celular, do processo de metabolismo dos carboidratos, lipídeos e aminoácidos, em que o fósforo dietético fornece a maior parte do fosfato necessário para o crescimento e o metabolismo, sendo que a perda do fosfato excretado é muito maior em peixes de água doce do que em peixes de água salgada, devido ao gradiente salino do meio (LALL, 2002; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2011).

Entre as principais funções que cada mineral desempenha, o magnésio (Mg) atua na manutenção da homeostase dos meios internos e externos, atua na respiração celular, é cofator para reações enzimáticas, participa do processo de oxidação de ácidos graxos, síntese de aminoácidos, metabolismo de carboidratos e proteínas (BIJVELDS et al., 1998). O sódio (Na) e o cloreto (Cl) são os principais cátions e ânions dos fluidos extracelulares, e tem como função a regulação da pressão osmótica e equilíbrio da relação ácido-base (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2011). O potássio (K) é um importante cátion que tem função de regulação da pressão osmótica e equilíbrio da relação ácido-base (MORAES; DE ALMEIDA, 2020). O ferro (Fe) participa do processo de respiração celular e apresenta potencial de oxidação e redução e transporte de elétrons, e responsável pela produção e funcionamento da hemoglobina, mioglobina (LALL, 2002; LIM et al., 2000). O cobre (Cu) é constituinte de diversas enzimas como o citocromo C oxidase, dopamina, tirosinase, entre outras (BURY; WALKER; GLOVER, 2003; LALL, 2002). O manganês (Mn) é cofator de sistemas enzimáticos, participa do metabolismo de aminoácidos e ácidos graxos e responsável pela ativação de diversas enzimas entre elas as quinases, transferases, hidrolases (SATO et al., 2001). O zinco (Zn) é componente das metaloenzimas e cofator de sistemas enzimáticos, possuindo diversas funções bioquímicas (BURY; WALKER; GLOVER, 2003; LALL; KAUSHIK, 2021). O iodo (I) participa da síntese de hormônios da tireoide que norteiam a atividade dos tecidos (LALL; KAUSHIK, 2021). E o selênio (Se) é cofator da enzima glutathione peroxidase, e protege células e membranas dos peróxidos, além de atuar sinergicamente com a vitamina E como antioxidante biológico (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2011).

2.5. Nutrientes em sistemas de produção vegetal hidropônico

O cultivo hidropônico consiste no método de cultivo das plantas sem a utilização de solos, em que as raízes recebem uma solução nutritiva que contém todos os nutrientes essenciais para a otimização de seu crescimento e desenvolvimento (NIU; MASABNI, 2022; SAVVAS et al., 2013). Essa técnica produtiva vem sendo muito difundida e empregada por diversos produtores devido ao seu elevado desempenho produtivo em relação cultivo convencional, a eficiência no uso de fertilizantes e água, a possibilidade de plantio durante todo o ano e a facilidade de escoamento da produção, visto que pode ser realizada em áreas adjacentes aos grandes centros consumidores (COMETTI; GALON; BREMENKAMP, 2019). Entre as plantas, as hortaliças são as mais cultivadas no sistema, sendo a alface (*Lactuca Sativa L.*) a mais cultivada por meio da hidroponia (COMETTI; GALON; BREMENKAMP, 2019; SAUSEN et al., 2020).

Os elementos minerais essenciais ao desenvolvimento vegetal são divididos em macro e micronutrientes, e são classificados de acordo com as suas respectivas exigências pelas plantas. Entre os macronutrientes, tem-se que são absorvidos pelas raízes das plantas o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), sendo que o carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H), são absorvidos da água e ar atmosférico (CO₂). Já os micronutrientes, que apresentam menor demanda pelas plantas, são representados pelos elementos de ferro (Fe), zinco (Zn), boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), manganês (Mn), molibdênio (Mo) e níquel (Ni) (NIU; MASABNI, 2022; WADA, 2019).

Uma solução nutritiva é definida como uma solução homogênea em que os nutrientes se encontram dissolvidos e disponíveis na forma iônica e em proporções adequadas, mantendo a relação ideal entre cátions e ânions, para manter o equilíbrio do sistema de forma a otimizar o desenvolvimento das plantas, não interferindo assim em parâmetros de condutividade elétrica e pH do meio e não criando relações de antagonismos entre os elementos minerais. Além dos nutrientes, a solução nutritiva deve conter O₂ e deve ser fornecida para as plantas em temperaturas adequadas para que ela consiga otimizar a absorção de nutrientes (COMETTI et al., 2006; WADA, 2019).

As soluções nutritivas são preparadas para conter os nutrientes essenciais para sanar todas as necessidades nutricionais das plantas, via cultivo hidropônico. São utilizados como fontes de nutrientes, fertilizantes inorgânicos (Tabela 1), que em sua maioria são bastante solúveis em água, podendo ser usados alguns ácidos inorgânicos de menor solubilidade (WADA, 2019). A única exceção dos nutrientes fornecidos é o ferro (Fe) que deve ser fornecido na forma de quelatos (Fe-EDTA, Fe-DTPA, Fe-EDDHA) ou ácido fúlvico, para que o elemento não precipite no sistema e esteja na forma disponível para as plantas (BARTELME et al., 2018; CEROZI, 2020; WADA, 2019).

A maior parte das soluções nutritivas, por não apresentarem capacidade de tamponar o sistema, faz com que ocorram variações de pH no meio, o que pode prejudicar a absorção de nutrientes pelas plantas e assim, minimizar o seu crescimento e desenvolvimento (SAUSEN et al., 2020). Os valores de tolerância de pH para a melhor absorção de nutrientes culturas hidropônicas estão entre 5 e 7, sendo que valores de pH abaixo de 4 prejudicam as membranas celulares e acima de 6,5 podem inibir a absorção de nutrientes como o Fe, P, Mn e B (BEZERRA NETO, 2017; FURLANI et al., 2009a).

Em um sistema de produção hidropônico, as plantas retiram os nutrientes que precisam do meio, o que pode causar um certo desequilíbrio entre os nutrientes. Com isso, deve-se reestabelecer esse equilíbrio com adição de novos nutrientes e água no sistema, visto que a absorção de água pelas raízes das plantas é por osmose, e os nutrientes são transportados com a água das raízes para as folhas, sendo a solução nutritiva a fonte mineral para as plantas (DJIDONOU; LESKOVAR, 2019). Os nutrientes de maneira geral são tidos como móveis (NO₃⁻, NH₄⁺, P, K e Mg),

intermediários (S, Mn, Fe, Zn, Cu e Mo) e imóveis (Ca e B), dependendo da sua função e redistribuição no interior e ciclo das plantas, sendo os seus sintomas de deficiência ligadas à essa divisão, sendo por exemplo, a falta de N observado em folhas mais velhas (móveis) e a falta de Ca em folhas mais jovens (FURLANI et al., 2009a; TAIZ et al., 2017).

Tabela 1. Composição dos principais fertilizantes utilizados no preparo de soluções nutritivas para o cultivo de plantas hidropônicas

Fertilizante	Fórmula química	Peso molecular	% Nutrientes
Nitrato de cálcio	$5[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3$	1080,5	N: 15,5; Ca: 19
Nitrato de potássio	KNO_3	101,1	K: 38; N: 13
Sulfato de potássio	K_2SO_4	174,3	K: 45; S: 18
Monofosfato de potássio	KH_2PO_4	136,1	K: 28; P: 23
MAP - monoamônio fosfato	$(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$	115	N: 12; P: 27
Sulfato de magnésio	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246,4	Mg: 9,7; S: 13
Nitrato de magnésio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	256,3	N: 11; Mg: 9
Nitrato de amônio	NH_4NO_3	80	N: 35
Bicarbonato de potássio	KHCO_3	100,1	K: 39
Sulfato de manganês	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	169	Mn: 32
Sulfato de zinco	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	287,5	Zn: 23
Bórax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381,2	B: 11
Ácido bórico	H_3BO_3	61,8	B: 17,5
Sulfato de cobre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	249,7	Cu: 25
Molibdato de sódio	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	241,9	Mo: 40
Quelato de ferro (Fe EDTA)	$[\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{COO})_2]_2\text{FeNa}$	367	Fe: 6-13
Molibdato de amônio	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{21} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1163,3	Mo: 40

Fonte: Adaptado de Savvas et al. (2013)

2.6. Alface (*Lactuca sativa* L.) e seu aspecto nutricional

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma hortaliça folhosa de grande importância no mundo, sendo a folhosa mais consumida no Brasil (HORTIFRUTI BRASIL, 2021). Ela é originária da região do Mediterrâneo e pertence à família *Asteraceae*, sendo uma herbácea de ciclo curto que apresenta caule diminuto, em que suas folhas se desenvolvem em formato de roseta podendo apresentar diferentes aspectos, sendo que as variedades mais comuns são as lisas e as crespas, podendo apresentar formação de cabeça que podem ou não conter bastantes recortes (DEMARTELAERE et al., 2020).

Por se tratar de uma hortaliça tipicamente de regiões de clima temperado, a maioria das cultivares não são adaptadas às altas temperaturas, o que as torna mais propensas a incidência de doenças e a possíveis desequilíbrios nutricionais nas plantas, visto que no Brasil principalmente do período de verão, apresenta altos índices pluviométricos e temperaturas elevadas (ŻRÓBEK-SOKOLNIK, 2012), sendo consideradas temperaturas ideais de cultivos entre 12 a 22°C, e temperatura máxima tolerável de 30°C e mínima de 6°C (FILGUEIRA, 2008). A ocorrência de temperaturas mais elevadas faz com que o ciclo produtivo seja acelerado, o que pode resultar em plantas com menor biomassa

devido ao pendoamento ocorrer mais precocemente (HENZ; SUINAGA, 2009). Para que as variedades atinjam o seu máximo desempenho produtivo, os melhoristas devem desenvolver variedades que se adaptem às condições de cultivo, melhorando os aspectos bióticos e abióticos das plantas (COMETTI; GALON; BREMENKAMP, 2019). Um exemplo de variedade nacional melhorada é a alface “Psiquê”, que é uma variedade hidropônica do tipo crespa que apresenta precocidade e bom rendimento do número de folhas, com um formato mais cônico e folhas largas, podendo ser cultivada o ano todo. A variedade apresenta boa tolerância à queima de bordas e deficiência de cálcio (SAKATA, 2022).

Segundo Taiz et al. (2017), os elementos químicos disponíveis para a nutrição das culturas são fundamentais para a estruturação vegetal e formação das reações metabólicas, sendo que se houver deficiências devido à baixa disponibilidade de nutrientes, a planta não completa o seu desenvolvimento biológico, ocorrendo assim anomalias produtivas no desenvolvimento das plantas. Para melhor aproveitamento das variedades é fundamental o conhecimento das características morfológicas e fisiológicas dos tipos de alface, evidenciando e potencializando as características específicas de cada cultivar, sendo essas responsáveis pelo seu desenvolvimento e adaptação das características, sejam elas relacionadas ao transporte, manuseio, resistência ao pendoamento e algumas doenças e conservação pós-colheita (DEMARTELAERE et al., 2020).

O cultivo da alface pode ser dividido em fases, sendo a primeira compreendida entre a sementeira até o aparecimento da primeira folha; a segunda fase compreendida do surgimento da primeira até a quinta folha, que dura em média quatorze dias, ocorre o transplante para a bancada de crescimento. A fase posterior necessita de um maior espaçamento entre as plantas para o melhor desenvolvimento, sendo esta a fase de desenvolvimento e terminação da hortaliza folhosa (FURLANI et al., 2009b).

O crescimento máximo das plantas em sistemas integrados exige nutrição adequada, sendo necessária a disponibilização de soluções nutritivas, em que se tem por exemplo, a solução nutritiva de “Hoagland”, composta por seis macronutrientes (mg L^{-1}): N (210), P (31), K (234), Ca (160), Mg (45), e S (64) e seis micronutrientes (mg L^{-1}): Fe (0,6), Mn (0,5), B (0,5), Zn (0,05), Cu (0,02) e Mo (0,02) (AL-HAFEDH; ALAM; BELTAGI, 2008). A partir da solução de Hoagland, outras soluções hidropônicas foram formuladas e adaptadas, com a finalidade de atender as exigências nutricionais das culturas, tendo como por exemplo a solução nutritiva para as plantas de alface formuladas por Cometti et al. (2006), com a composição (mg L^{-1}) de nutrientes: $\text{N-NO}_3^- = 105,6$; $\text{N-NH}_4^+ = 12,3$; P = 29; K = 184; $\text{S-SO}_4^{2-} = 29$; Ca = 56; Mg = 21; Fe = 1,8; Mn = 0,65; B = 0,26; Zn = 0,07; Cu = 0,04; Mo = 0,03. A solução proposta por (RESH, 2016) recomenda as concentrações da solução para o cultivo da alface com a composição (mg L^{-1}) de nutrientes: $\text{N-NO}_3^- = 165,0$; P = 50; K = 210; Ca = 200; Mg = 50; Fe = 5; Mn = 0,5; Zn = 0,15; Cu = 0,15.

A absorção de nutrientes pelas hortalizas folhosas é menor quando comparada a outras culturas, mas são consideradas exigentes nutricionalmente devido a seu ciclo produtivo ser mais curto (OLIVEIRA et al., 2004). Como referência da concentração de macro e micronutrientes no tecido vegetal, tem-se que segundo Raj et al., (1996) e Silva, (2009), apresentam os seguintes valores de macronutrientes (g kg^{-1}): 30-50 (N), 4-7 (P), 50-80 (K), 15-25 (Ca), 4-6 (Mg), e 1,5-2,5 (S) e os micronutrientes (mg kg^{-1}): 50-150 (Fe), 30-150 (Mn), 30-60 (B), 30-100 (Zn), 7-20 (Cu). Sendo a disponibilidade desses nutrientes fundamentais para o melhor desenvolvimento das plantas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

O experimento foi conduzido nas instalações do Setor de Piscicultura da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, localizado no município de Piracicaba – SP, com altitude aproximada de 576 metros, com relevo suave ondulado, no período de maio a julho de 2022. O clima da região é do tipo Cwa na classificação de Köppen, tropical de altitude, com temperatura média anual de 21,6°C e precipitação média anual de 1.230 mm.

Para a condução experimental, foram usados nove módulos independentes de aquaponia que foram construídos dentro de uma estufa agrícola modelo Zanna Leve Z (Zannata®), com dimensões de 12,8 m x 12 m, 153,6 m² de área, 3,9 m de pé direito, com coberturas fixa de filme plástico difusor de 150 µm, telas optinet 40 mesh (laterais e frontais) e aberturas zenitais com tela optinet de 25 mesh (Figura 2A). Os módulos experimentais (Figura 2B em destaque vermelho) representam uma pequena parte dessa estufa, sendo a mesma dividida em um módulo experimental e comercial (Figura 2B). Este projeto estava vinculado ao Projeto Jovem Pesquisador FAPESP (JP, processo 2017/14269-2), o qual teve como proposta desenvolver uma nova técnica de determinação dos coeficientes de liberação de nutrientes em sistemas de aquaponia através de análise de balanço de massa em sistemas de produção de tilápia *Oreochromis niloticus* integrada à produção de alface hidropônica (Figura 2B).



Figura 2. (A) Estufa agrícola e (B) Croqui da estufa comercial com a área experimental em destaque vermelho.

Fonte: (A) Próprio autor, (B) Professor Dr. Brunno Cerozi.

3.2. Sistema de aquaponia experimental

Cada unidade experimental aquapônica foi composta por um tanque de fundo cônico de capacidade de depósito de água de 26 litros para a criação dos peixes, uma bomba submersa com reator biológico acoplado com capacidade de vazão de 720 L/h, e dois perfis hidropônicos com capacidade de receber nove mudas de alface. O sistema hidráulico do sistema foi constituído de tubos de 20 e 32 mm (Figura 3). Para cada unidade experimental foi instalado um termostato de 50 W para o controle da temperatura que foi ajustado para 28°C. A oxigenação do sistema foi realizada por um compressor de ar.

Foi usado o sistema hidropônico do tipo NFT (fluxo laminar de nutrientes) com perfis co-extrudado em PVC 100%, atóxico, com proteção UV, branco por fora e preto por dentro, com desnível da bancada em 5% para passagem da solução nutritiva, com espaçamento de 12 cm x 12 cm entre plantas e os perfis. Como a ração era o único 'input' no tanque dos peixes, a solução nutritiva aquapônica advinha de restos alimentares e excretas dos animais, sendo que ela apresentava fluxo contínuo, sendo bombeada dos reservatórios dos peixes para o sistema hidropônico, e assim circulando água 24 horas por dia nas canaletas, e retornando para o tanque de peixes por gravidade através do desnível das bancadas. Cada unidade experimental continha dois perfis, sendo um com capacidade para cinco plantas e outro perfil com capacidade para quatro plantas.



Figura 3. Componentes do sistema experimental aquapônico

Legenda: (A) Bomba com reator biológico acoplado; (B) Tanque de fundo cônico capacidade de 26L para cultivo de peixes; (C) Perfis cultivo hidropônico do tipo NFT.

Fonte: Próprio autor.

O sistema de filtragem biológica estava acoplado a uma bomba submersa (modelo Aleas/Jeneca IPF-728 720 L/h) dentro do tanque de produção de peixes (Figura 4). Cada unidade experimental possuía o seu próprio reator biológico constituído de uma manta para filtragem de pequenas partículas e, mídias biológicas (“*bioball*”) para o processo de nitrificação. O reator biológico foi previamente ativado com a inserção de bactérias nitrificantes vivas (OT Startup, Ocean Tech) no sistema, de acordo com recomendação do produto, para acelerar os processos de nitrificação e a fixação de bactérias no reator biológico. Esse processo de inserção das bactérias foi realizado anteriormente ao início do período experimental para que todas as unidades estivessem em igualdade de ativação biológica dos reatores de nitrificação.

Os tanques de fundo cônico continham uma bomba com o sistema de filtragem biológica e os peixes, e no fundo dos tanques ficavam decantadas as fezes e eventuais sobras alimentares dos animais. Para a retirada do decantado dos tanques, foi instalada uma válvula para retirada desse material (Figura 4), sendo realizada essa limpeza uma vez na semana para manter a qualidade da água do sistema em boas condições.

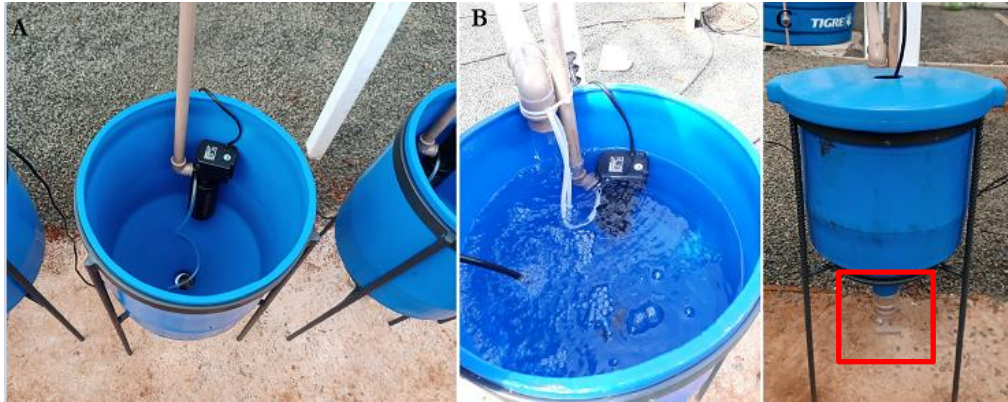


Figura 4. Componentes do tanque experimental aquapônico sendo (A) Instalação da bomba com sistema de reator biológico acoplada dentro do tanque de fundo cônico e no sistema hidráulico; (B) Bomba com sistema de filtragem biológica submersos em ddH₂O em funcionamento no sistema aquapônico; (C) Tanque de fundo cônico capacidade de 26L com a válvula para limpeza de resíduos decantados no tanque.

Fonte: Próprio autor.

Para abastecimento e reposição de água no sistema, foi utilizada água destilada-deionizada (ddH₂O) de baixa condutividade elétrica ($<1,0 \mu\text{S cm}^{-1}$) para que não houvesse interferência de nutrientes externos à ração experimental. Foram colocados inicialmente 25 L de ddH₂O em cada tanque, e houve a necessidade de renovações da água perdida no sistema, devido às pequenas perdas advindas da limpeza dos tanques, evaporação natural do ambiente e evapotranspiração das plantas. A reposição da água no sistema ocorreu conforme necessidade do sistema, sempre mantendo um nível de 25 L nos tanques, ocorrendo com menor frequência nos estágios iniciais de desenvolvimento das plantas, e diariamente nos estágios finais do seu ciclo de desenvolvimento.

O sistema experimental possuía nove unidades experimentais independentes (Figura 5). Ao todo, foram usados 9 tanques de produção de peixes, nove bombas com reator biológico acoplado, 18 perfis hidropônicos (sendo dois perfis para cada unidade experimental), nove termostatos e um compressor de ar.



Figura 5. Sistema aquapônico experimental

Fonte: Próprio autor.

3.3. Formulação e preparação das dietas experimentais

As dietas experimentais consistiram em níveis crescentes de substituição do fosfato bicálcico por fosfato de potássio, sendo o T1= tratamento controle, sem adição de fosfato de potássio; T2= substituição de 50% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio; T3= substituição de 100% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio.

As dietas foram formuladas de acordo com as exigências nutricionais de juvenis de tilápia do Nilo com base no NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2011). Todas as dietas basais eram isoprotéicas e isoenergéticas, em que continham 26% de proteína bruta e 3200 kcal kg⁻¹ de energia digestível, e foram formuladas em planilha de macros do aplicativo Microsoft Excel® (Tabela 2). Os teores de cálcio e fósforo nas rações (2 e 1% de inclusão, respectivamente) também foram mantidos iguais para todos os tratamentos.

Para a preparação das dietas experimentais (Figura 6), todos os ingredientes foram peneirados, moídos, pesados, homogeneizados, umedecidos com água, e, por último, extrudados. As rações estrudadas foram acondicionadas em bandejas metálicas em estufa de ventilação forçada a 65°C até secagem completa e, depois de secas, foram acondicionadas em sacos plástico e mantidas em local refrigerado (4°C) até seu fornecimento aos peixes.

Tabela 2. Composição das dietas experimentais dos juvenis de tilápia nos tratamentos com substituição de 0, 50 e 100% da fonte fosfatada (1%) de fosfato bicálcico por fosfato de potássio

Ingredientes	Tratamentos		
	T1	T2	T3
	Inclusão (%)		
Soja, Farelo-45	50,01	50,69	50,49
Milho, Farinha	39,68	35,91	33,65
Trigo, Farelo	0,00	0,00	1,80
Óleo de Soja	2,61	3,70	3,96
Fosfato de potássio	0,00	2,20	3,85
Fosfato bicálcico	4,75	2,70	0,00
Cloreto de cálcio	0,00	3,70	5,15
DL-Metionina	0,10	0,10	0,10
Premix mineral-vitamínico	1,00	1,00	1,00
Calcário calcítico	1,85	0,00	0,00

Fonte: Próprio autor.



Figura 6. Processos para produção das rações experimentais extrudadas para tilápias do Nilo sendo (A) Moinho de ingredientes; (B) Misturador de ingredientes; (C) Processo de extrusão da ração; (D) Ração armazenada em bandejas metálicas para secagem e pronta para alimentação dos peixes.

Fonte: Próprio autor.

3.4. Avaliação da produção de biomassa de alface

As mudas de alface (*Lactuca sativa* L.) foram produzidas no setor de Piscicultura da Esalq/USP. Utilizou-se a cultivar Psiquê (Sakata), do tipo crespa que é recomendada para produções hidropônicas. As mudas foram produzidas em uma bandeja de plástico de 140 células, sendo preenchidas com substrato de turfa de *sphagnum* (substrato inerte), à densidade de uma semente por célula e mantidas em ambiente protegido. As sementes foram plantadas no mesmo dia em que se iniciou a alimentação experimental dos peixes (11/05/2022), sendo que as mudas foram irrigadas duas vezes ao dia com o auxílio de um regador de plástico, durante 20 dias. Após este período, as mudas foram transferidas para os perfis hidropônicos, no dia 31/05/2022, sendo colocadas nove mudas por unidade experimental (81 ao todo) (Figura 7).

Após 39 dias (08/07/2022) todas as plantas foram colhidas e separadas as raízes da parte aérea. A parte aérea foi pesada em balança analítica para obtenção da biomassa fresca individual. Posteriormente, foram retiradas 6 folhas de cada planta, escolhidas aleatoriamente (sendo duas maiores, duas medianas e duas mais jovens) para secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C (Figura 8). Foram determinados a composição de micro e macronutrientes das folhas de plantas em cada unidade experimental, sendo a amostra composta de todas as plantas da unidade experimental.



Figura 7. Processo de plantio e de transplântio das alfaces para o sistema hidropônico. (A) Embalagem com Sementes Psiquê (Sakata®); (B) Plantio das sementes de alface em bandeja de 140 células; (C) Emergência das plântulas; (D) Visão do substrato com a planta; (E) Transplântio das mudas para os perfis hidropônicos.

Fonte: Próprio autor.



Figura 8. Processos para avaliação da produção das alfaces. (A) Alfaces no dia da colheita; (B) Pesagem massa fresca total alface sem a raiz; (C) Pesagem de fitomassa úmida de 6 folhas de alface; (D) Massa úmida identificada em sacos de papel kraft, e levadas para secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C, até secagem completa; (E) Fitomassa seca de 6 folhas de alface.

Fonte: Próprio autor

3.5. Tilápia e a avaliação dos seus parâmetros de desempenho

Juvenis de tilápias do Nilo (*Oreochromis Niloticus*) com peso médio de $12,47 \pm 2,14$ g (média \pm dp) foram obtidos do setor de Piscicultura da Esalq/USP e aclimatados em tanques de fundo cônico de 26 L em sistema fechado de recirculação (sistema aquapônico) nas instalações da estufa experimental. O período de aclimação dos peixes foi de sete dias e posteriormente (11/05/2022), os animais foram anestesiados utilizando-se solução de benzocaína (50 mg L⁻¹) e pesados em lotes, sendo colocados 14 peixes por unidade experimental, 126 peixes no total, obtendo uma biomassa média por tanque de 166,28 g.

Os peixes foram alimentados duas vezes ao dia (09:00 e 16:00 horas), sendo fornecidas as dietas experimentais descritas no item 3.2. a uma taxa de 3% da biomassa média (166,28 g) dos tanques, e a mesma quantidade (g) de alimento para todos os tanques experimentais. Foi considerada uma conversão alimentar teórica de 1,5:1 para reajustar a quantidade de ração fornecida semanalmente de acordo com a curva de crescimento esperada (Eq. 1):

- Curva Crescimento (CC)

$$CC = [(Biomassa\ média) + ((Quantidade\ de\ ração\ fornecida\ (3\%)\ \times\ 7) \div 1,5)]; \text{ (Eq. 1)}$$

Após 58 dias, os peixes foram submetidos a jejum de 24 h, e os animais foram novamente anestesiados utilizando-se solução alcoólica de benzocaína (50 mg L⁻¹) para coleta de amostras de sangue e pesagem em lotes com

auxílio de uma balança de precisão. Os dados de biomassa foram coletados para a determinação de ganho peso, taxa de crescimento específico e conversão alimentar e índice de sobrevivência, sendo os seguintes parâmetros zootécnicos:

- Ganho de peso (g)

$$GP = [(peso\ final) - (peso\ inicial)]; \text{ (Eq. 2)}$$

- Índice de conversão alimentar

$$ICA = [(consumo\ de\ ração) \div (ganho\ de\ peso)]; \text{ (Eq. 3)}$$

- Taxa de crescimento específico

$$TCE = \{100 \times [(\ln\ peso\ final - \ln\ peso\ inicial) \div período]\}; \text{ (Eq. 4)}$$

- Sobrevivência

$$S = [(100 \times \text{número de animais final}) \div \text{número de animais inicial}]; \text{ (Eq. 5)}$$

Para a coleta de amostras hematológicas, foram escolhidos três animais de cada unidade experimental de maneira aleatória. O sangue foi retirado através de punção do vaso caudal utilizando-se seringas plásticas de 3 mL heparinizadas e agulhas descartáveis. O perfil hematológico dos animais foi realizado através da determinação dos seguintes parâmetros: estimativa da concentração de hemoglobina (Hb) (Kit Labtest®), contagem total de eritrócitos e leucócitos (câmara de Neubauer) (NATT; HERRICK, 1952) (Figura 10), valor do hematócrito através da técnica do micro hematócrito (GOLDENFARB et al., 1971), proteína plasmática (refratômetro) (HRUBEC; SMITH, 2010) e parâmetros derivados dos seus valores, tais como: volume corpuscular médio (VCM), hemoglobina corpuscular média (HCM) e concentração de hemoglobina corpuscular média (CHCM) (WINTROBE, 1934), sendo:

- Eritrócitos/Hemácias (He)

$$He = [(n^\circ\ eritrócitos) \times 201 \times 5 \times 10]; \text{ (Eq. 6)}$$

- Volume Corpuscular médio (fl)

$$VCM = [(Hematócrito \div Eritrócitos) \times 10]; \text{ (Eq. 7)}$$

- Hemoglobina Corpuscular média (pq)

$$HCM = [(Hemoglobina \div Eritrócitos) \times 10]; \text{ (Eq. 8)}$$

- Concentração da Hemoglobina Corpuscular média (%)

$$CHCM = [(Hemoglobina \div hematócrito) \times 100]; \text{ (Eq. 9)}$$

Todos os procedimentos experimentais e amostrais realizados com os animais foram revisados e autorizados pelo Comitê de Ética Animal da Esalq/USP (CEUA), protocolo número 2019-05.

3.6. Monitoramento da qualidade da água

Para monitorar a qualidade da água do sistema e avaliar se houve alteração dos parâmetros da água dos tanques de piscicultura em virtude das variações das dietas experimentais, foi realizada a aferição diária da temperatura e oxigênio dissolvido usando um oxímetro portátil (YSI, ProODO), e aferidos os valores do potencial hidrogeniônico (pH) e da condutividade elétrica, com o auxílio de um pHmetro e condutímetro de bancada. A alcalinidade total foi determinada utilizando titulador digital (Hach Modelo 16900) e foi mantida a uma concentração de 50 mg L⁻¹ de

carbonato de cálcio (CaCO_3), sendo corrigida sempre que os valores estivessem abaixo da concentração desejada, com a adição de Na_2CO_3 no sistema para manter o poder tampão da água.

Além das análises diárias, foram coletadas semanalmente amostras de água de todos os tanques experimentais, em que se retirava uma alíquota de 80 mL de cada unidade aquapônica. Essas amostras foram analisadas no Laboratório de Nutrição de Peixes do Departamento de Zootecnia da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em que eram filtradas, se necessário, com o auxílio de um filtro de membrana de nylon de 0,45 μm para remover partículas finas suspensas para a análise dos nutrientes (CEROZI et al., 2022). Essas amostras foram usadas para medir a concentração de N-NH_3 (amônia), N-NO_2 (nitrito), N-NO_3 (nitrato) e P-PO_4 (fósforo) pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017) em espectrofotômetro portátil (DR2800, HACH, Loveland, CO, EUA). O Fe (ferro), foi analisado semanalmente pelo método do IAC (CAMARGO et al., 2009) em espectrofotômetro Shimadzu, UV-1800, sendo realizado apenas para verificação da sua concentração na solução para orientar correções em caso de valores abaixo de 1 mg L^{-1} , com o produto Seachem Fluorish Iron®. As concentrações de K foram determinadas com um espectrômetro de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) iCAP 6300 (Thermo Scientific) (AOAC, 2019).

3.6.1. Amônia pelo método do fenato

Para a determinação do N-NH_3 , 5 mL da amostra de cada sistema foi pipetada e colocada em um tubo de ensaio, e com o tubo em constante agitação, foi adicionado 200 μL de solução fenol, 200 μL de solução de nitroprussiato de sódio e 500 μL mL de solução oxidante. Realizada a agitação, as amostras foram para um descanso de pelo menos 2 horas em local escuro e em temperatura ambiente (25°C), sendo considerada estável até 24 horas. Posteriormente, as amostras foram lidas no próprio tubo de ensaio, em um espectrofotômetro portátil (DR2800, HACH, Loveland, CO, EUA) com comprimento de onda de 640 nm (APHA, 2017). As amostras foram feitas em triplicatas.

3.6.2. Nitrito pelo método da sulfanilamida

Para a determinação do N-NO_2 , 1 mL da amostra de cada sistema foi pipetada e colocada em um tubo de ensaio, e com o tubo em agitação foi adicionado 40 μL de reagente de cor. Posterior agitação a amostra foi para um descanso de 10 minutos, e depois foi transferida para uma cubeta de plástico para leitura em um espectrofotômetro portátil (DR2800, HACH, Loveland, CO, EUA) com comprimento de onda de 539,4 nm (APHA, 2017). O reagente de cor contém 8 mL de ddH_2O , 1 mL de ácido fosfórico 85%, 0,1000 g de sulfanilamida e 0,0100 g de naftil etilenodiamino dicloridrato. As amostras foram feitas em triplicatas.

3.6.3. Nitrato pelo método de redução por cloreto de vanádio

Para a determinação do N-NO_3 , 1 mL da amostra de cada sistema foi pipetada e colocada em um tubo de ensaio, e adicionado 1 mL da solução de cloreto de vanádio, 100 μL de reagente de cor (o mesmo citado no método do Nitrito, item 1.6.2). Os tubos foram incubados em banho maria a 60°C por 25 minutos. Finalizado o período, as

amostras foram retiradas imediatamente do banho maria e colocados em uma bandeja previamente preparada, com água gelada por 30 segundos. Posteriormente, os tubos foram enxugados e as amostras foram lidas no próprio tubo de ensaio, em um espectrofotômetro portátil (DR2800, HACH, Loveland, CO, EUA) com comprimento de onda de 540 nm (APHA, 2017). As amostras foram feitas em triplicatas.

3.6.4. Fósforo pelo método do vanadomolibdato

Para a determinação do fósforo (P-PO₄), 10 mL da amostra de cada sistema foi pipetada e colocada em um tubo de ensaio, e posteriormente misturada com 2 mL de reagente vanadomolibdato de amônio, e deixada em repouso por 10 minutos, e posteriormente lidas em espectrofotômetro portátil (DR2800, HACH, Loveland, CO, EUA) com o uso de cubeta quadrada de 10 mL e absorvância de 400 nm (APHA, 2017). As amostras foram feitas em triplicatas.

3.6.5. Ferro dissolvido pelo método da fenantrolina

Para a determinação do ferro dissolvido pelo método da fenantrolina, 10 mL da amostra de cada sistema foi pipetada e colocada em um tubo de ensaio, e com o tubo em constante agitação, foi adicionado 200 µL de solução de ácido ascórbico, 500 µL de solução 1,10-o-fenantrolina e 200 µL mL de solução de citrato de sódio (25%). Realizada a agitação, as amostras foram para um descanso de pelo menos 15 minutos em local escuro e em temperatura ambiente (25°C) e depois foi transferida para uma cubeta de quartzo para leitura em um espectrofotômetro Shimadzu UV-1800 pelo método do IAC (CAMARGO et al., 2009). As amostras foram feitas em duplicatas.

3.7. Análise foliar

Para a determinação da composição de elementos dos tecidos vegetais, foi realizado o processo de digestão nítrica, em que uma amostra de 0,1000 g de cada amostra composta da fitomassa seca moída foi transferida para um balão de digestão de 50 mL e misturada com 5 mL de peróxido de hidrogênio (50%), e deixada em repouso durante a noite. O tubo contendo a mistura foi transferido para um bloco digestor e aquecido a 90°C até restar aproximadamente 2 mL de líquido. O tubo foi removido, deixado esfriar até a temperatura ambiente, recebeu 5 mL de ácido nítrico concentrado (37%) e recolocou no bloco digestor. A temperatura foi aumentada para 145°C e a mistura foi digerida até que restassem aproximadamente 2 mL de líquido. O digerido límpido resultante foi transferido para um balão volumétrico de 50 mL, completado o volume com solução de ácido nítrico a 1% e armazenado em geladeira a 4°C. As concentrações de K, P, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B, e Mo no digerido foi determinado pela metodologia adaptada do Official Methods of Analysis of AOAC International (AOAC, 2019) e determinadas em espectrofotômetro de emissão óptica-plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

O teor de nitrogênio dos tecidos vegetais das plantas foi determinado pela digestão sulfúrica, em que inicialmente 0,1000 g da fitomassa composta seca moída, foi transferida para um balão de digestão de 50 mL e misturada com 5,0 mL de ácido sulfúrico concentrado e 2 g de mistura de digestão (sulfato de sódio e sulfato de cobre na proporção 20:1). Os tubos foram transferidos para um bloco digestor de calor por 2 h e foram aquecidos a 385°C. O digerido resfriado foi diluído com 400 mL de água destilada deionizada em um béquer e o pH ajustado para 10,0 ±

0,1 por titulação de uma solução de NaOH a 10%. A amostra neutralizada foi transferida para um balão volumétrico de 500 mL e completada com água destilada deionizada (CEROZI et al., 2022). A concentração de nitrogênio na amostra neutralizada, foi determinada pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017) em espectrofotômetro portátil (DR2800, HACH, Loveland, CO, EUA), como já descrito no item 3.6.1.

3.8. Análises estatísticas

Os ensaios relativos a cada nível de inclusão de fosfato de potássio foram conduzidos e analisados em um delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos e três repetições cada ($n=3$) distribuídos em nove unidades experimentais. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As variáveis que apresentaram efeito significativo dos tratamentos foram submetidas ao teste de comparação de médias de Tukey ($\alpha=0,05$) pelo PROC GLM SAS do software SAS® 9.4 (SAS Institute, Cary, NC, USA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Desempenho produtivo da tilápia do Nilo

Os resultados para os dados de ganho de peso, consumo de ração, índice de conversão alimentar, taxa de crescimento específico e sobrevivência dos peixes estão apresentados na Tabela 3. Ao final do período experimental (59 dias após o início da alimentação), os peixes atingiram um peso médio individual de $28,51 \pm 3,57$ g, e biomassa média total de cada tanque em $362 \pm 45,03$ g. A densidade de estocagem final foi de $14,53 \text{ kg m}^{-3}$ por unidade experimental em média. Não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre os tratamentos para o consumo de ração e a taxa de sobrevivência, sendo registrada a mortalidade de 11 animais durante o período experimental. Já para o ganho de peso, índice de conversão alimentar e taxa de crescimento específico, foram registradas diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos, sendo os tratamentos com doses de substituição do fosfato bicálcico por fosfato de potássio (T2 e T3) superiores ao tratamento controle (T1).

Tabela 3. Desempenho zootécnico das tilápias (*Oreochromis niloticus*), cultivadas em sistema de aquaponia.

Tratamento	GP (g)	CR (g)	ICA	TCE (% dia ⁻¹)	Sobrevivência (%)
T1	12,12b \pm 1,27	22,14 \pm 0,22	1,83a \pm 0,20	1,18b \pm 0,09	97,62 \pm 4,12
T2	19,68a \pm 0,96	22,36 \pm 0,00	1,14b \pm 0,05	1,67a \pm 0,04	83,33 \pm 10,91
T3	18,17a \pm 1,20	22,25 \pm 0,21	1,22b \pm 0,07	1,57a \pm 0,08	92,85 \pm 7,14
p-valor	0,0040	0,3579	0,0010	0,0003	0,1584

Legenda: GP – ganho de peso individual (g); CR – Consumo de ração (g); ICA – índice de conversão alimentar; TCE – taxa de crescimento específico (% dia⁻¹). Os valores correspondem a média \pm DP de todos os peixes dos tanques experimentais, sendo: T1 – Tratamento controle; T2 - substituição de 50% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio; T3 - substituição de 100% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio. Médias seguidas de letras minúsculas diferentes na coluna diferiram pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os peixes criados em sistemas de aquaponia podem apresentar desempenhos de crescimento e ganho de biomassa, similares e até superiores em relação ao seu cultivo em sistemas convencionais e de recirculação (ANI et al., 2022; MAUCIERI et al., 2019). Para tanto, as características do animal e o meio em que o sistema produtivo está inserido devem proporcionar condições ótimas para o desenvolvimento dos peixes. Quando se buscam espécies de peixe para serem criadas em sistemas de aquaponia, a principal característica desejada é a sua capacidade de tolerar altas densidades de estocagem e suportar altos níveis de sólidos totais em suspensão, nitrogênio, fósforo e potássio (RAKOCY, 2012). A tilápia é um peixe de elevada rusticidade que apresenta alta tolerância a oscilações dos parâmetros de qualidade da água, incluindo variações de temperatura, pH e oxigênio dissolvido, sendo assim a principal espécie cultivada em sistemas aquapônicos (YEP; ZHENG, 2019).

Os tratamentos T2 e T3 apresentaram valores de GP significativamente superior em relação ao T1 (controle), sendo um indicativo de que a substituição da fonte fosfatada (fosfato bicálcico por fosfato de potássio), auxiliou no maior acúmulo de biomassa nos animais dos tratamentos experimentais. Sendo o fosfato bicálcico um ingrediente convencional utilizado em rações de peixes devido à sua capacidade de fornecer P para os peixes, a substituição da fonte fosfatada por uma com K, otimizou o seu GP. Este resultado mostra que a substituição de ingredientes de fontes fosfatas podem otimizar o acúmulo de biomassa nos peixes. Ao inserir K nas dietas experimentais, buscava-se equilibrar a relação P:K em sistemas de aquaponia, visto que as exigências de K para peixes

são pouco estudadas devido à baixa necessidade desse nutriente, sendo o mesmo subutilizado em dietas para peixes. A troca da fonte de P, fez com que os animais aproveitassem melhor os nutrientes das dietas, que ao que tudo indica ficaram prontamente disponíveis para a melhor absorção dos peixes e assim obtiveram melhores índices de desempenho de GP. Ru et al. (2017) ao realizarem a adição de micro e macronutrientes em sistema de aquaponia, observaram que os tratamentos suplementados com os minerais melhoraram o desempenho das tilápias em 52,9% em ganho de biomassa (g) em relação ao seu tratamento controle, valor esse bem similar ao do presente trabalho, que demonstra GP superiores a 50% (T2 e T3) em relação ao tratamento controle (T1).

Todos os tanques receberam a mesma quantidade de ração (313,18 g), sendo ofertados 22,36 g de ração para cada peixe ao longo do período experimental, sendo as pequenas diferenças numéricas as sobras do período em cada tratamento. As rações foram ofertadas duas vezes ao dia a uma quantidade de 3% da biomassa média dos tanques. A substituição da fonte fosfatada em T2 e T3 não alterou o consumo de ração (CR) dos peixes nesses tratamentos em relação à ração controle ($p > 0,05$), mostrando que esse fator não interferiu nos resultados de desempenho e que a substituição de um componente na ração não afetou o consumo das rações.

O tratamento controle (T1) apresentou o pior valor de ICA (1,83), sendo significativamente diferente do que os tratamentos T2 (1,14) e T3 (1,22), devido a menores valores de GP (aproximadamente 50% menor). De acordo com Kubitzka (2004), as melhores conversões alimentares geralmente se encontram na faixa de 0,9 a 1,8, sendo que pode variar de acordo com o sistema de produção, densidade de estocagem, idade e tamanho dos peixes. Os ICA de T2 e T3 estão dentro da faixa citada pelo autor, entretanto, por mais que tenha obtido os piores índices de conversão alimentar, o T1 não ficou muito acima do intervalo. Em estudos Delaide et al. (2017), obtiveram um ICA de 1,56 em sistema PAFF Box para tilápias, e Maucieri et al. (2019) apresentaram um índice de 1,66 e 1,86 para 300 e 450 peixes m^{-3} , valores esses bem próximos ao do presente trabalho, porém piores que o T2 e T3. Já Lenz et al. (2017) relataram um ICA de 2,18 em sistema com água doce, valor este superior ao encontrado no trabalho. De maneira geral, os animais apresentaram um bom ICA, com destaque para o T2 e T3.

A taxa de crescimento específico médio está ligada a taxa de crescimento dos peixes. O T2 (1,67 % dia^{-1}) e T3 (1,57 % dia^{-1}) não apresentaram diferenças significativas entre si ($p > 0,05$), sendo que ambas apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) em relação ao tratamento controle (T1) (1,18 % dia^{-1}), mostrando que os peixes que estavam em T2 e T3 apresentaram maiores ganhos diários (%) em relação ao T1. Diversos autores relataram valores menores de TCE em relação ao T2 e T3, sendo 1,15 - 1,21 % dia^{-1} (LENZ et al., 2017), 1,14 % dia^{-1} (SIRINGI; TUROOP; NJONGE, 2021), 1,17 - 1,33 % dia^{-1} (NOZZI et al., 2018). Já Stathopoulou et al. (2021), ao adicionarem Fe e K na água obtiveram valores superiores (3,13 % dia^{-1}) ao do presente trabalho. Luo et al. (2014) obtiveram valores de 2,13 % dia^{-1} fornecendo uma ração altamente proteica (44% de PB), resultado esse esperado, visto que no presente trabalho a ração ofertada era de 26% PB. De acordo com Ani et al. (2022), a taxa de crescimento específico (% dia^{-1}) pode sofrer alterações devido a densidade de estocagem dos tanques. Como a densidade de estocagem foi a mesma para todas as unidades experimentais, esse fator não afetou os dados da TCE.

Em relação ao índice de sobrevivência dos tratamentos tem-se que não apresentaram diferenças significativas entre si, mostrando que os tratamentos não afetaram tal parâmetro. Os valores variaram de 83,33 a 97,62 % e seu bom índice está relacionado ao fato da tilápia (*Oreochromis niloticus*) apresentar elevada rusticidade, apresentando resistência aos parâmetros de qualidade da água (RAKOCY, 2012). Valores similares foram encontrados na literatura (LENZ et al., 2017; RAKOCY, 2012; STATHOPOULOU et al., 2021), sendo uma média do índice de sobrevivência em torno de 90%. Em estudos de aquaponia, Rafiee et al. (2019) produziram alface e tilápia vermelha, e relataram valores de sobrevivência de 50 - 73%, sendo o menor índice relacionado a não suplementação mineral do sistema, e o

maior índice relacionado a suplementação de 25% da solução contendo a adição de Fe, K, Ca, Mg, Mn, P e Zn. Esses autores mostraram a importância da disponibilização de nutriente em sistemas aquapônicos e como o desenvolvimento e a sobrevivência dos animais são afetados pela disponibilização dos nutrientes de maneira correta. Analisando o exposto com os dados obtidos, pode-se inferir que as rações ofertadas as tilápias eram de boa qualidade e apresentavam os nutrientes essenciais para o seu desenvolvimento.

Os resultados para os dados de eritrócitos, hemoglobina, hematócrito, proteína, volume corpuscular médio (VCM), hemoglobina corpuscular média (HCM) e a concentração da hemoglobina corpuscular média (CHCM) estão apresentados na Tabela 4. Foram coletadas amostras de três animais por unidade experimental, sendo apresentados os valores médios \pm desvio padrão para cada tratamento. Não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre os tratamentos para os dados hematológicos.

Tabela 4. Perfil hematológico das tilápias (*Oreochromis niloticus*), cultivadas em sistema de aquaponia ao final do período experimental.

Dados Hematológicos	Tratamento			p-valor
	T1	T2	T3	
He ($\times 10^6 \text{ mm}^{-3}$)	1,34 \pm 0,18	1,35 \pm 0,26	1,10 \pm 0,06	0,2547
Hb (g dL ⁻¹)	6,67 \pm 0,85	6,67 \pm 0,65	6,67 \pm 0,86	1,0000
Hct (%)	31,00 \pm 4,73	31,00 \pm 3,66	32,33 \pm 5,17	0,9191
Proteína (g dL ⁻¹)	5,52 \pm 0,37	5,04 \pm 0,33	5,65 \pm 0,29	0,133
VCM (fl)	229,77 \pm 6,10	236,26 \pm 66,08	294,85 \pm 57,69	0,297
HCM (pg)	50,30 \pm 1,52	50,92 \pm 13,27	61,46 \pm 10,30	0,3591
CHCM (%)	21,43 \pm 1,19	21,97 \pm 4,54	20,94 \pm 0,79	0,9008

Legenda: He – eritrócitos ($\times 10^6 \text{ mm}^{-3}$); Hb – hemoglobina (g/dL); Hct – hematócrito (%), VCM - volume corpuscular médio (fl); HCM - hemoglobina corpuscular média (pg); CHCM - concentração da hemoglobina corpuscular média (%). Os valores correspondem a média \pm DP de três peixes de cada unidade experimental, sendo: T1 – Tratamento controle; T2 - substituição de 50% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio; T3 - substituição de 100% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio. Médias sem letras na linha não diferiram estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$).

Os parâmetros hematológicos indicam o estado fisiológico dos peixes, mostrando as respostas dos animais perante as diferentes situações enfrentadas nos sistemas de produção que podem ser a troca de um componente da ração, o aumento da densidade de estocagem de peixes, a exposição a patógenos (bactérias e fungos), variações nos parâmetros de qualidade da água, o manejo inadequado do sistema, entre outros fatores (ISLAM et al., 2019; RODRIGUES, 2020). Os parâmetros sanguíneos estão sendo cada vez mais usados como uma importante ferramenta de monitoramento da saúde dos peixes em sistemas produtivos, sendo que essas análises revelam índices de condição corporal e são indicativos de eventuais doenças ou otimização produtiva (PEREIRA et al., 2016). De maneira geral, os dados hematológicos podem ser influenciados pelo teor de oxigênio dissolvido no sistema, a temperatura do meio, quantidade de sais dissolvidos, pH, estágio de maturação sexual do peixe, deficiências nutricionais e doenças, sendo que essas variações podem ocorrer entre indivíduos de mesma espécie a depender de suas condições fisiológica no momento das coletas (RANZANI-PAIVA, 1991; RANZANI-PAIVA et al., 2013).

Esperava-se que os parâmetros hematológicos dos peixes dos tratamentos não sofressem alterações com as substituições do fosfato bicálcico por fosfato de potássio, fato esse confirmando pelo presente estudo que não demonstrou diferença significativa entre o controle e os tratamentos, mostrando que o perfil hematológico não foi alterado com os tratamentos. Esses resultados demonstraram que em condições de igualdade produtiva, boa qualidade da água, manejo adequado do sistema de aquaponia e o fornecimento adequado de nutrientes, os peixes conseguem se desenvolver sem que ocorram prejuízos aparentes com a inserção de dietas versáteis. John et al. (2022), em estudo com aplicações de diferentes doses de potássio em sistema de aquaponia, observaram que os valores hematológicos não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos e o controle em *P. hypophthalmus*, mostrando que o estado fisiológico dos peixes permaneceu inalterado independente das doses aplicadas. A inserção de potássio em sistemas de aquaponia ao que tudo indica não reduz os índices hematológicos dos peixes, sendo esse nutriente essencial em maiores quantidades para o desenvolvimento das plantas. Já Pereira et al. (2016) em estudos sobre as respostas da tilápia do Nilo em diferentes salinidades, observaram diferenças significativas na concentração de hemoglobina, nas proteínas plasmáticas totais e no número de eritrócitos e não observaram diferença no número de leucócitos e de trombócitos. Essas diferenças encontradas pelos autores mostram a importância do controle da salinidade do meio, de maneira que em ambientes saturados, os animais perdem desempenho, o que prejudica o seu desenvolvimento.

De acordo com os intervalos de referência para tilápias descritos por Hrubec, Cardinal e Smith (2000), tem-se que os intervalos de proteína (g dL^{-1}) apresentam variações entre 4,8-7,8, Hb (g dL^{-1}) 7,0-9,8, He ($\times 10^6/\text{mm}^3$) 1,91-2,83, Hct (%) 27-37, VCM (fl) 115-183, HCM (pg) 28,3-42,3 e CHCM (%) 22-29%. Os dados do presente estudo apresentam valores dentro dos intervalos descritos para proteína e hematócrito (Hct), valores inferiores para hemácias (He), hemoglobina (Hb) e CHCM, e valores superiores para VCM e HCM. Essas variações ocorrem normalmente, visto que esses índices podem apresentar variações dentro da mesma espécie e entre espécies (RANZANI-PAIVA, 1991; RANZANI-PAIVA et al., 2013), podendo variar de acordo com o sexo, idade, maturidade celular e dietas ofertadas aos peixes (HRUBEC; CARDINALE; SMITH, 2000).

A função dos eritrócitos é o transporte de oxigênio, que dependem da concentração de hemoglobinas dentro das células e das trocas gasosas. O número de eritrócitos do estudo variou de 1,10-1,35 ($\times 10^6 \text{ mm}^{-3}$), valores esse bem similares aos encontrados por Siringi, Turoop, Njonge (2021). O teor médio de hemoglobina (Hb) foi de 6,67 g dL^{-1} entre todos os tratamentos. Esses valores são similares aos encontrados por John et al. (2022) que relataram variações entre 5,90 e 7,67 g dL^{-1} , e inferiores aos relatados por Pereira et al. (2016), que obtiveram valores médios de variação de 10,2-19,2 entre os tratamentos.

O hematócrito (Hct) é um dos parâmetros hematológicos que apresenta baixa variabilidade e alta confiabilidade com pequena margem de erro, mostrando a relação de proporção de eritrócitos no sangue em relação à quantidade de leucócitos, trombócitos e plasma sanguíneo (RANZANI-PAIVA et al., 2013). Os valores de Hct (%) foram de $31,00 \pm 4,73$ (T1), $31,00 \pm 3,66$ (T2) e $32,33 \pm 5,17$ (T3), sendo os valores dos tratamentos bem próximos ao controle. Em estudo com tilápias e a inserção de espirulina (*Arthrospira platensis*) em sistema de aquaponia, Siringi, Turoop, Njonge (2021) encontraram valores de Hct (%) de 35,46-39,93, apresentando diferenças significativas dos tratamentos em relação ao controle. Já para as proteínas os valores variaram de 5,04 a 5,65 (g dL^{-1}), resultados similares ao encontrado por Pereira et al. (2016) em estudos com tilápia.

O VCM indica o volume de células vermelhas circulantes, sendo a relação entre o hematócrito e o número de eritrócito das células. Já o HCM e o CHCM indicam os valores de hemoglobina por célula e por volume celular (RANZANI-PAIVA et al., 2013). No presente estudo as tilápias apresentaram valores de VCM (fl) de 229,77-294,85,

HCM (pg) de 50,30-61,46 e CHCM (%) 20,94-21,97, sendo que os tratamentos não diferiram estatisticamente do controle em todos os parâmetros analisados.

A produção de peixes mostrou que a substituição da fonte fosfatada da ração (fosfato bicálcico) por outra (fosfato de potássio) apresentou resultados promissores em sua substituição parcial e/ou total, mostrando que, além de apresentar valores produtivos superiores (T2 e T3) em relação ao tratamento controle (T1), não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos em relação aos dados hematológicos da *Oreochromis Niloticus*. Assim, a adição de potássio (K) na ração através da substituição da fonte fosfatada (fosfato bicálcico) pode ser uma excelente alternativa de maximizar os valores de ganho de biomassa dos animais e corrigir eventuais deficiências nutricionais que são recorrentes em plantas cultivadas em sistemas de aquaponia, que em sua maioria necessitam de suplementação mineral, principalmente do potássio, sem afetar os índices hematimétricos das tilápias do Nilo.

4.2. Análise foliar

Os resultados para os dados de acúmulo de macro e micronutrientes das folhas secas das plantas dos tratamentos experimentais estão apresentados nas Figuras 10 e 11, respectivamente. O T1 (controle) apresentou em ordem decrescente de absorção de macronutrientes: N>K>Ca>P>S>Mg; e micronutrientes: Fe>Zn>B>Mn>Mo>Cu. Já o T2 apresentou em ordem decrescente de absorção de macronutrientes: N>K>P>Ca>S>Mg; e micronutrientes: Fe>Zn>Mn>B>Mo>Cu. E o T3 apresentou em ordem decrescente de absorção de macronutrientes: N>K>P>Ca>S>Mg; e micronutrientes: Fe>Zn>B>Mn>Cu>Mo. Percebe-se que o nitrogênio e o potássio são os principais macronutrientes absorvidos pelas plantas apresentando maiores valores em todos os tratamentos. Em contrapartida, ao realizar a substituição de fosfato bicálcico por fosfato de potássio como ingrediente das rações ofertadas a T2 e T3, percebeu-se que o fósforo se tornou mais disponível para absorção pelas plantas, sendo este elemento o terceiro mais absorvido por esses tratamentos. Já o T1 (controle) possui o fosfato bicálcico como fonte fosfatada, fazendo com que a absorção de cálcio (Ca) pelas plantas apresentasse maiores valores em relação ao fósforo para o tratamento controle. A partir desses dados de absorção de nutrientes pelas plantas, pode-se mais uma vez observar o potencial da substituição do fosfato bicálcico por fosfato de potássio em dietas para tilápias em sistemas de aquaponia, mostrando que a substituição apresenta um grande potencial de regulação nutricional do sistema, visto que pode auxiliar na disponibilidade e ajuste da relação N:P:K em sistemas aquapônicos.

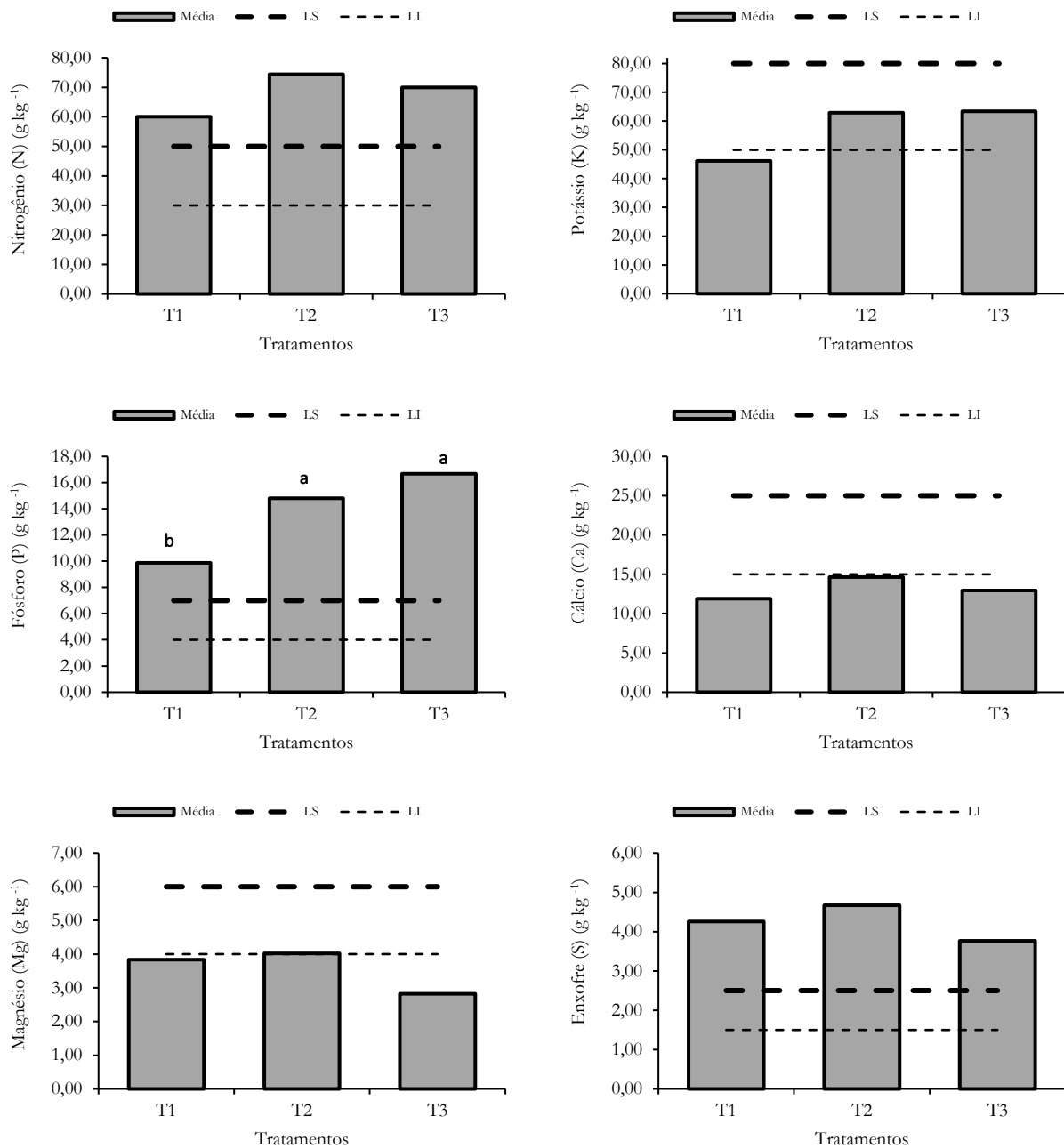


Figura 9. Teores de macronutrientes das folhas secas das plantas da alface psíquê determinados ao final do período experimental no sistema aquapônico com as respectivas faixas recomendadas de nutrientes, sendo: Média – Valores médios dos respectivos nutrientes em cada tratamento; LS e LI – Limite Superior e Inferior recomendados por Silva (2009) para cada macronutriente.

Fonte: Próprio autor

A faixa de valores adotados como referência para os nutrientes necessários para o desenvolvimento das alfaces (*Lactuca sativa* L.) foram descritos por Silva (2009), sendo para os macronutrientes (g kg⁻¹): 30-50 (N), 4-7 (P), 50-80 (K), 15-25 (Ca), 4-6 (Mg), e 1,5-2,5 (S) e os micronutrientes (mg kg⁻¹): 50-150 (Fe), 30-150 (Mn), 30-60 (B), 30-100 (Zn), 7-20 (Cu), 0,8-1,4 (Mo). Apresentaram valores superiores a faixa recomendada, para absorção, o nitrogênio, fósforo, enxofre, ferro, boro e zinco para todos os tratamentos (T1, T2 e T3). Os nutrientes que estavam dentro dos limites recomendados foram o manganês para todos os tratamentos, potássio para o T2 e T3 e o magnésio para o T2.

Os nutrientes que ficaram abaixo dos valores referência foram o cálcio, cobre e molibdênio para todos os tratamentos, potássio (T1) e magnésio (T1 e T3).

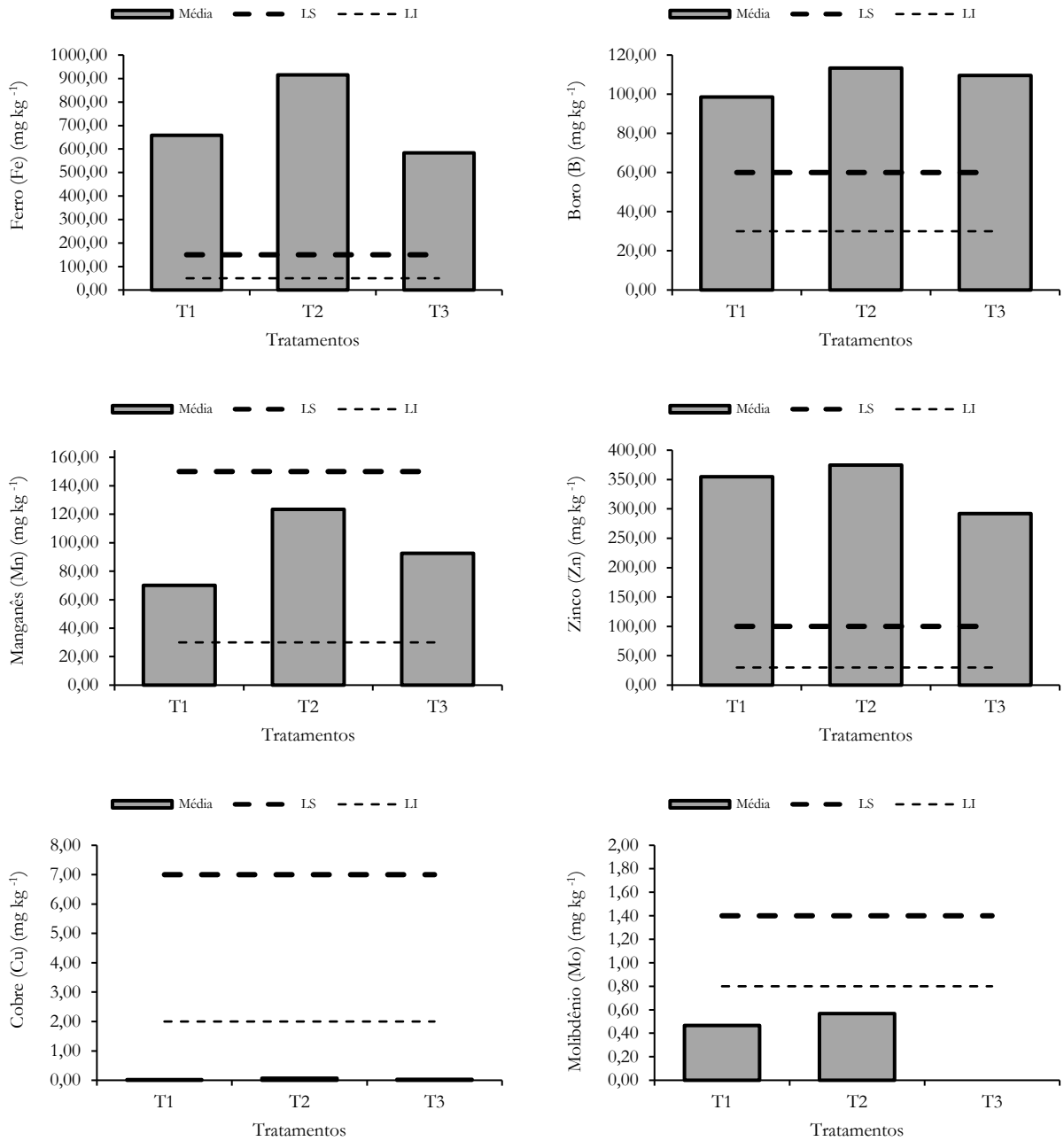


Figura 10. Teores de micronutrientes das folhas das plantas da alface psíquê determinados ao final do período experimental no sistema aquapônico com as respectivas faixas recomendadas de nutrientes, sendo: Média – Valores médios dos respectivos nutrientes em cada tratamento; LS e LI – Limite Superior e Inferior recomendados por Silva (2009) para cada micronutriente. Fonte: Próprio autor

A absorção de nutrientes pelas plantas tem relação direta com parâmetros de qualidade da água e a disponibilidade de nutrientes na solução aquapônica. A sua eficiência está relacionada ao índice de absorção das raízes das plantas no sistema de aquaponia, através da ação de suas células radiculares, no transporte desses nutrientes e em sua utilização (TAIZ et al., 2017). A alface é uma das culturas que mais necessitam de nutrientes para o seu

desenvolvimento em relação às outras culturas, pois é uma hortaliça de ciclo curto. A alface apresenta grandes quantidades de nitrogênio em sua composição, e pode se desenvolver sem grandes problemas em sistemas de aquaponia, visto que nesse tipo de sistema o nitrogênio está sempre disponível posterior a realização de um tratamento biológico, que é responsável pelo ciclo de nitrificação, disponibilizando assim o macronutriente (SUTANI et al., 2021). Além do nitrogênio, os resíduos sólidos eliminados pelos peixes após o processo de digestão, contêm muitos outros macronutrientes e micronutrientes exigidos pelas plantas (BAILEY; FERRAREZI, 2017).

O nitrogênio foi o macronutriente de maior absorção pelas plantas no sistema de aquaponia, sendo de 60,00 g kg⁻¹ (T1), 74,44 g kg⁻¹ (T2) e 70,00 g kg⁻¹ (T3). Os tratamentos T2 e T3 apresentaram maiores valores de N nas plantas em relação a T1. Os valores foram superiores aos encontrados por Martins et al. (2009), que apresentaram valores de 50,70 g kg⁻¹ de N em estudo de absorção de nutrientes em alface para diferentes dias após o seu transplântio. Todos os tratamentos apresentaram absorção superior ao recomendado para a cultura, sendo que as suas taxas de absorção são influenciadas por vários fatores como concentração de nutrientes, intensidade de luz, temperatura e a concentração de carbono no ambiente (TAIZ et al., 2017). Todos os tratamentos aquapônicos receberam dietas com 26% de PB, sendo esta, a única entrada mineral no sistema. A proteína das dietas é a fonte dos compostos nitrogenados da solução, e são produtos de resíduos alimentares e excretas das tilápias.

O K ficou dentro da faixa recomendada para o T2 e T3, e apresentou valores de absorção nas plantas de 46,19 g kg⁻¹ (T1), 62,94 g kg⁻¹ (T2) e 63,41 g kg⁻¹ (T3). O potássio é o nutriente que apresenta a maior demanda dentro da faixa de valores para a alface entre todos os nutrientes (50-80 g kg⁻¹). Ele possui um papel fundamental no desenvolvimento das plantas, pois está envolvido em processos da fotossíntese, síntese de proteínas e ativação de enzimas (ANGKHA et al., 2020). Esses valores foram superiores aos encontrados por Anderson et al. (2017), que ao estudarem diferentes valores de pH e alcalinidade das soluções, chegaram a valores de K nas alfaces de 30,1 e 31,2 g kg⁻¹. Essas diferenças ocorrem devido a disponibilidade do nutriente na solução. T2 e T3 apresentaram absorções superiores em 1,36 e 1,37 vezes em relação ao T1, mostrando que a formulação das rações versáteis com inserção de K, melhoram a absorção do elemento pelas plantas, eliminando eventuais deficiências que são corriqueiramente relatados na literatura sobre o sistema. A menor absorção de K pelas plantas do T1 é mais uma constatação de que em sistemas de aquaponia esse nutriente deve ser suplementado, como descrito por diversos autores (CARNEIRO et al., 2015; NOZZI et al., 2018; RAFIEE et al., 2019; YEP; ZHENG, 2019).

Ao se fornecer o K em maiores quantidades nas rações, como é o caso desse estudo, percebe-se uma maior absorção do mesmo pelas plantas. Além de não alterar os parâmetros hematológicos das tilápias, a inserção do potássio na formulação de dietas versáteis fez com que aumentasse a disponibilidade de nutrientes para as plantas, otimizando assim a sua absorção e produção. Outro fator importante é a fonte fosfatada ofertada, visto que apesar do fosfato bicálcico ser usual e de fácil absorção pelos peixes (P), ao se fornecer fosfato de potássio, além de otimizar os índices produtivos dos peixes, fez que com que o K ficasse dentro dos limites de concentração recomendados nos tratamentos experimentais. A sua deficiência pode provocar a redução da atividade fotossintética dos tecidos vegetais e como consequência, pode haver diminuição dos valores de biomassa fresca das plantas e conseqüente redução de crescimento da planta (TAIZ et al., 2017). Em excesso, pode comprometer a absorção de outros nutrientes, como magnésio, manganês, ferro, zinco e cálcio e, conseqüentemente, o crescimento da alface (SANTOS et al., 2010). Ao se observar os valores (Figura 11) de ferro, manganês e zinco percebeu-se que os níveis de potássio não influenciaram as plantas na absorção desses nutrientes.

A concentração de fósforo foi superior a faixa recomendada para todos os tratamentos, sendo de 9,87 g kg⁻¹ (T1), 14,63 g kg⁻¹ (T2) e 16,68 g kg⁻¹ (T3). Os valores de T2 e T3 foram estatisticamente superiores em relação ao T1,

e todos os tratamentos foram superiores aos encontrados por Anderson et al. (2017), que relataram variações do nutriente nas alfaces entre 10,2 e 11,2 g kg⁻¹. Mantovani et al. (2014), em estudos com doses de P em alface crespa, mostraram que a cultura apresentou melhores desempenhos com altas doses desse nutriente. Em estudo sobre o desenvolvimento de plantas de alface em solução orgânica e convencional hidropônica, Ahmed et al. (2021) observaram maior concentração de P (6,82 g kg⁻¹) em plantas produzidas em sistemas em que a solução era de resíduos de peixes (orgânica), sendo esta, quase três vezes maior que a absorção de uma fonte convencional (inorgânica). Esses resultados mostram que a fonte fosfatada advinda de resíduos da produção de peixes é bem aceita pelas plantas para o seu desenvolvimento, e em condições propícias para sua absorção (bons índices de qualidade da água do meio), otimizam o crescimento das plantas e reduzem circunstancialmente o impacto gerado pelo descarte inadequado de P advindo da produção de peixes. O P desempenha funções estruturais nas plantas, sendo fundamental para o seu crescimento, desenvolvimento e reprodução, tendo participação direta em processos de metabolismo das plantas como no armazenamento e transporte de energia das células, além de ser essencial nos processos de respiração e de fotossíntese (MANTOVANI et al., 2014). Além disso a substituição da fonte fosfatada, além de apresentar resultados superiores à fonte convencional (fosfato bicálcico), mostrou que outras fontes de P em dietas podem otimizar o sistema aquapônico como um todo.

O cálcio apresentou valores de 11,89 g kg⁻¹ (T1), 14,63 g kg⁻¹ (T2) e 12,94 g kg⁻¹ (T3) nas plantas, e o seu teor ficou abaixo da faixa adequada sugerida por Silva (2009) (15-25 g kg⁻¹). Apesar disso, não foram observados sinais visuais de deficiência nas plantas. Uma possível explicação para a não ocorrência visual de sinais de deficiência de Ca, é que os valores apresentados estavam bem próximos da faixa recomendada (referência) para a cultura da alface. Outro ponto é que a variedade Psiquê, de acordo com Sakata (2022), apresenta tolerância ao '*tip burn*', mostrando bom desempenho produtivo mesmo em condições de deficiência de Ca e altas temperaturas do ambiente. Além disso, a substituição do fosfato bicálcico, uma das fontes Ca fornecidas pela ração, por fosfato de potássio, não interferiu nos índices de absorção desse nutriente pelas plantas. Valores similares foram encontrados por Benini et al. (2005) com 11,13 g kg⁻¹, em que os autores fizeram o comparativo da concentração e o acúmulo de macronutrientes em dois sistemas de produção de alface.

Referente à concentração de enxofre, todos os tratamentos apresentaram valores superiores ao referencial adotado para a cultura, apresentando valores que variaram de 3,77 a 4,67 g kg⁻¹. Apesar dos valores serem bem próximos, T2 apresentou maior valor e T3 o menor. Já o magnésio foi o macronutriente que obteve os menores valores de absorção pelas plantas, variando de 2,82 g kg⁻¹ (T3) a 4,02 g kg⁻¹ (T2). Esse nutriente auxilia as plantas em seu crescimento e influencia diversas reações e processos do metabolismo vegetal, entre elas a síntese de proteínas, formação de clorofila, fotofosforilação, entre outros (GUO et al., 2016). De acordo com os mesmos autores, o K pode ser um antagonista na absorção de Mg, entretanto os valores desses nutrientes não sugeriram essa relação visto que o teor de Mg de T1 e T3 estão bem próximos a referência e T2 apresentou valor adequado.

O ferro foi o micronutriente que obteve maior aporte pelas folhas das plantas, obtendo valores médios de 658,20 mg kg⁻¹ (T1), 915,37 mg kg⁻¹ (T2) e 583,83 mg kg⁻¹ (T3). Os valores de ferro foram muito superiores em relação a faixa recomendada para a cultura (30-150 mg kg⁻¹). O ferro foi mantido a uma concentração mínima de 1 mg L⁻¹ no sistema de aquaponia, visto que em concentrações abaixo desse valor apareceram visualmente sintomas de deficiência em todos os cultivos, sendo realizada reposições desse nutriente sempre que necessário como descrito no item 3.7. Como os índices de absorção desse nutriente foram superiores aos limites recomendados, recomenda-se que para estudos futuros essa concentração seja reduzida, visto que se trata de um insumo de alto valor financeiro, e sua redução pode não ocasionar danos no desenvolvimento das alfaces.

Em relação ao boro, manganês e zinco, o sistema aquapônico foi capaz de fornecer quantidades adequadas (manganês) e até superiores (boro e zinco) desses micronutrientes, fruto de sobras das rações fornecidas e dos subprodutos das excretas dos peixes. Para todos esses micronutrientes, o T2 apresentou maiores valores. Esses nutrientes não apresentam deficiências nesse tipo de sistema, visto que os alimentos e as excretas dos peixes disponibilizam quantidade suficientes para as plantas, que possuem exigências em menores quantidades para o seu desenvolvimento (COMETTI; GALON; BREMENKAMP, 2019; NOZZI et al., 2018; RAFIEE et al., 2019; RAKOCY, 2012). Os valores de cobre e molibdênio ficaram abaixo do mínimo recomendado, sendo que para T3 o valor de Mo ficou abaixo da faixa mínima de leitura do ICP-OES. Não se tem uma explicação para baixos valores de Cu e Mo, entretanto não houve maiores implicações pela deficiência desses nutrientes.

De maneira geral, as plantas que foram produzidas nos sistemas experimentais aquapônicos, que receberam rações versáteis (T2 e T3), apresentaram melhores valores de absorção dos nutrientes, principalmente os relacionados ao N, P e K, que são os principais nutrientes para o desenvolvimento vegetal.

4.3. Produção de biomassa vegetal

Os dados referentes à biomassa vegetal média fresca e da produtividade de cada tratamento estão apresentados na Tabela 5 e Figura 11, respectivamente.

Tabela 5. Produção de biomassa fresca média de alface cultivada em sistema de aquaponia ao final do período experimental.

Tratamento	Peso (g planta ⁻¹)
T1	192,46b
T2	215,53ab
T3	222,15a
C.V. (%)	18,96
p-valor	0,0196

Os valores correspondem a média de todas as plantas de cada tratamento em cada unidade experimental, sendo: T1 – Tratamento controle; T2 - substituição de 50% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio; T3 - substituição de 100% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio. Médias seguidas de letras minúsculas diferentes na coluna diferiram pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

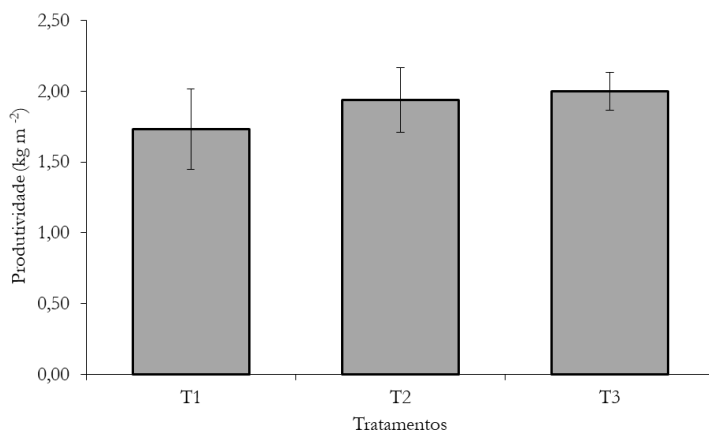


Figura 11. Produtividade média da alface psíquê determinada ao final do período experimental no sistema aquapônico em cada tratamento.

Fonte: Próprio autor

Como base na análise da variância e do teste de Tukey, pode-se observar diferenças significativas ($p=0,0196$) entre os tratamentos para os dados de desempenho da biomassa fresca. O coeficiente de variação encontrado para esse índice foi de 18,96% evidenciando reduzida sensibilidade a fatores experimentais não controláveis. O T3 apresentou maiores valores médios de biomassa fresca ($222,15 \text{ g planta}^{-1}$), sendo estatisticamente superior ao tratamento controle (T1), que apresentou valores médios da biomassa fresca de $192,46 \text{ g planta}^{-1}$. O T2 ($215,53 \text{ g planta}^{-1}$) não apresentou diferenças significativas ($p>0,05$) em relação ao T3 e T1. Esses resultados mostram o potencial da formulação de rações versáteis em sistemas de aquaponia, uma vez que ao se obter melhores índices de biomassa fresca das plantas com a substituição parcial ou total de um ingrediente (fosfato bicálcico por fosfato de potássio), as plantas obtiveram melhor desempenho.

Os dados da biomassa fresca das plantas atingiram valores considerados bons para serem comercializados. Em estudo sobre diferentes valores de pH e concentrações alcalinas da solução produtiva para alface, Anderson et al. (2017) apresentaram valores que variaram de 122 a $159 \text{ g planta}^{-1}$. Freitas et al. (2021) ao observarem a diferença dos índices produtivos em relação a colheita das alfaces em dias após o seu transplante (DAT), mostraram valores de 129,20 a 171,10 $136,5 \text{ g planta}^{-1}$ e 285,70 a $355,30 \text{ g planta}^{-1}$ para plantas em sistema NFT com 21 e 28 DAT respectivamente. Já Fernandes et al. (2018), ao estudarem a condição produtiva de alface hidropônica em região semiárida no Brasil, encontraram em um ciclo de 53 dias, um valor médio de $136,5 \text{ g planta}^{-1}$. Os resultados apresentados e os mostrados pelos autores citados, reforçam que ocorrem variações nos sistemas produtivos de hortaliças, que são dependentes das condições do meio para o seu desenvolvimento, principalmente das condições climática, manejo adotado e da disponibilidade de nutrientes da solução para as plantas.

A produtividade da alface no presente trabalho (Figura 11) não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, e variou numericamente conforme o tratamento, apresentando valores de $1,732 \text{ kg m}^{-2}$ para o tratamento controle (T1), $1,940 \text{ kg m}^{-2}$ para o tratamento T2 e de $1,999 \text{ kg m}^{-2}$ para o tratamento T3. Essa variação entre os valores pode ser em decorrência dos índices de absorção de nitrogênio, fósforo e potássio, como pode ser visto na Figura 9, em que os tratamentos T2 e T3 apresentaram maiores valores de absorção desses nutrientes em comparação ao controle. Em estudos de aquaponia Lenz et al. (2017) chegaram a valores menores do que o presente estudo, mostrando produtividades da cultura de $1,21 \text{ kg m}^{-2}$ para águas doces e $0,8 \text{ kg m}^{-2}$ para águas salobras. Já Maucieri et al. (2019) encontraram valores produtivos superiores ao do presente estudo, com produtividade de $4,00 \text{ kg m}^{-2}$. Os valores superiores podem ser explicados devido a maior quantidade de plantas por m^2 usados pelos autores (sendo plantados $12 \text{ plantas m}^{-2}$), e no presente trabalho foram utilizadas 9 plantas m^{-2} .

De modo geral, as plantas do T2 e T3 apresentaram maiores valores de biomassa fresca, sendo o T3 superior ao T1. Já em relação a produtividade média das alfaces em relação ao tratamento controle (T1), não se constatou diferenças significativas entre os tratamentos, apenas que os T2 e T3 foram superiores numericamente em relação ao T1. De maneira geral, o potencial da substituição da fonte fosfatada na ração, para uma que contenha potássio, se mostrou altamente promissora. Ao utilizar fosfato de potássio na ração, a solução aquapônica apresentou maiores valores de fósforo e potássio na solução, como será discutido na próxima seção, mostrando assim maiores valores de absorção (K e P) pelas plantas e obtendo melhores desempenhos da alface.

4.4. Qualidade da água

Os valores para as variáveis de temperaturas e oxigênio dissolvido (OD) das águas dos sistemas de aquaponia estão apresentados na Figura 13.

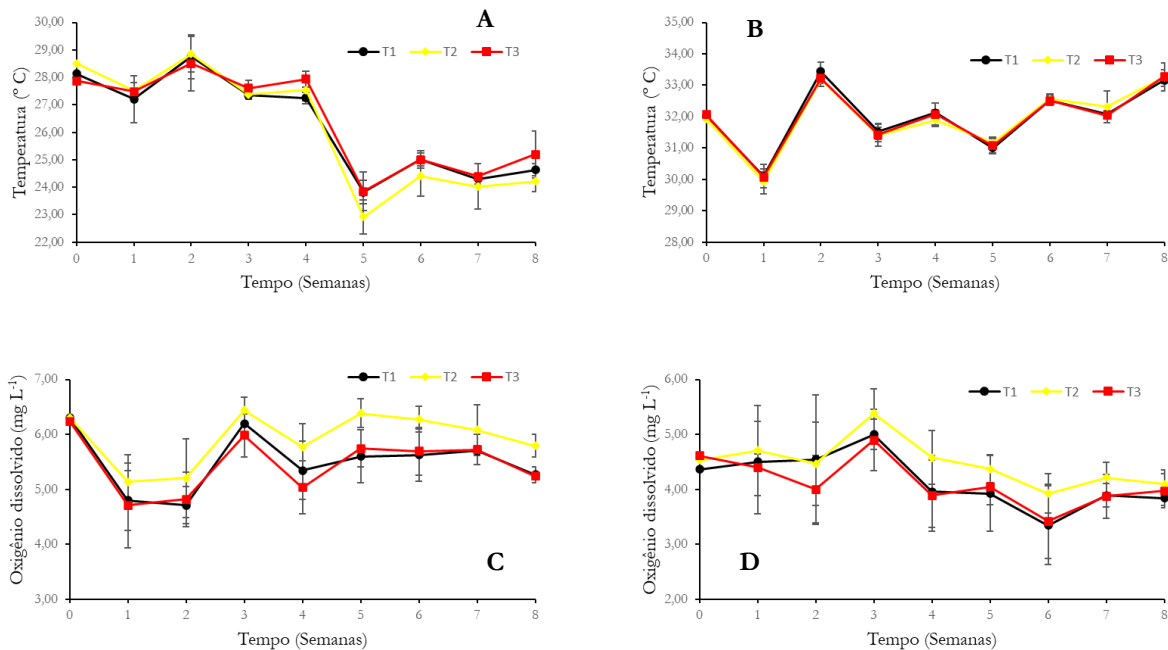


Figura 12. Valores médios semanais de temperatura e oxigênio dissolvido do sistema de aquaponia, contendo plantas de alface (Psíquê) e tilápias do Nilo, sendo: (A) Temperatura da água sistema de aquaponia no período da manhã (9:00h); (B) Temperatura da água sistema de aquaponia no período da tarde (16:00h); (C) Oxigênio dissolvido na água sistema de aquaponia no período da manhã (9:00h); (D) Oxigênio dissolvido na água sistema de aquaponia no período da tarde (16:00h).

Fonte: Próprio autor

Os valores médios das temperaturas para as aferições do período da manhã (Figura 12A) foram de 26,27 °C (T1), 26,15 °C (T2) e 26,43 °C (T3). Já para o período da tarde (Figura 12B) os valores médios foram de 32,00 °C (T1), 31,96 °C (T2) e 31,98 °C (T3). Como pode-se observar na Figura 12A em vários momentos o termostato não foi suficiente para manter a temperatura da água desejada (28 °C). Observou-se que para as temperaturas do período da manhã, a semana 5 (14/06/2022) apresentou os menores valores de temperatura da água em todos os tratamentos, sendo o T2 com menor valor (22,92 °C), seguido por T1 (23,82 °C) e T3 (23,85 °C). Já nas semanas subsequentes (6, 7 e 8) os valores subiram um pouco em relação a semana 5, porém ainda estavam abaixo do ideal. O experimento se iniciou no dia 11/05/2022 e foi finalizado no dia 08/07/2022, sendo realizado em um período com temperaturas mais baixas, principalmente no período noturno devido ao início do inverno. Para os valores do período da tarde, os maiores valores documentados foram relativos à semana 2, sendo o maior valor atingido por T1 (33,44 °C), T3 (33,28 °C) e T2 (33,26 °C). Apesar das temperaturas apresentarem valores acima das faixas recomendadas para o sistema, o desempenho das plantas e dos peixes não foram afetados, visto que a tilápia apresenta elevada rusticidade e a alface (Psíquê) apresenta melhorias genéticas propícias a tolerar altas temperaturas.

Para os dados de oxigênio dissolvidos na água, tem-se que para as aferições do período da manhã (Figura 12C) valores médios de 5,50 mg L⁻¹ (T1), 5,93 mg L⁻¹ (T2) e 5,46 mg L⁻¹ (T3). Já para o período da tarde (Figura 12D) os valores médios foram de 4,15 mg L⁻¹ (T1), 4,47 mg L⁻¹ (T2) e 4,12 mg L⁻¹ (T3). Os maiores valores apresentados foram 6,31 mg L⁻¹ (T1), 6,44 mg L⁻¹ (T2) e 6,24 mg L⁻¹ (T3) (Figura 12C) e os menores valores foram 3,35 mg L⁻¹ (T1), 3,92 mg L⁻¹ (T2) e 3,42 mg L⁻¹ (T3) (Figura 12D). O OD é muito importante para a manutenção e desempenho dos peixes, bactérias e das plantas em sistemas de aquaponia (NUWANSI et al., 2021), sendo que as tilápias podem tolerar concentrações muito baixas (1,0-1,5 mg L⁻¹) devido a sua maior robustez e rusticidade (ABDEL-TAWWAB et al.,

2015), e as raízes de plantas e as bactérias (nitrificantes) do sistema necessitam de concentrações mínimas de 3,00 mg L⁻¹ (LENNARD; GODDEK, 2019; SOMERVILLE et al., 2014). Analisando as exigências de OD pelos diferentes componentes dos sistemas envolvidos com os valores apresentados, tem-se que o sistema não apresentou déficit de OD em nenhuma etapa. De maneira geral, ao se ajustar o OD para atender os requisitos dos peixes, atende-se os requisitos das bactérias e plantas (STATHOPOULOU et al., 2021).

Ao se observar os dados de temperatura e OD manhã (Figura 12A e C) e os dados de temperatura e OD tarde (Figura 12B e D), percebe-se uma relação inversa entre esses parâmetros, visto que quando se aumenta a temperatura, diminui a quantidade de oxigênio. Essa relação da temperatura com o OD também foi relatada por diversos autores (FREITAS et al., 2021; SILVA et al., 2020), mostrando que o acompanhamento desses parâmetros, são primordiais para o melhor desempenho de sistemas aquapônicos. Além da temperatura, podem influenciar o teor de OD na água, os restos alimentares dos peixes, a atividade respiratória das tilápias, além do correto funcionamento da fonte externa de oxigênio. De acordo com Abdel-Tawwab et al. (2015), o OD afeta diretamente a taxa de consumo de ração e o crescimento dos peixes, sendo que em condições de boa disponibilidade de OD na água a eficiência alimentar é otimizada, fato esse observado no presente estudo, visto que as concentrações obtidas foram consideradas boas para o sistema produtivo, apresentando como concentração mínima o valor de 3,35 mg L⁻¹ no T1 na semana 6, e as tilápias apresentaram bom consumo de ração como já discutido na Tabela 3.

Os valores das flutuações do pH e condutividade elétrica (CE) durante o desenvolvimento experimental são mostrados na Figura 13.

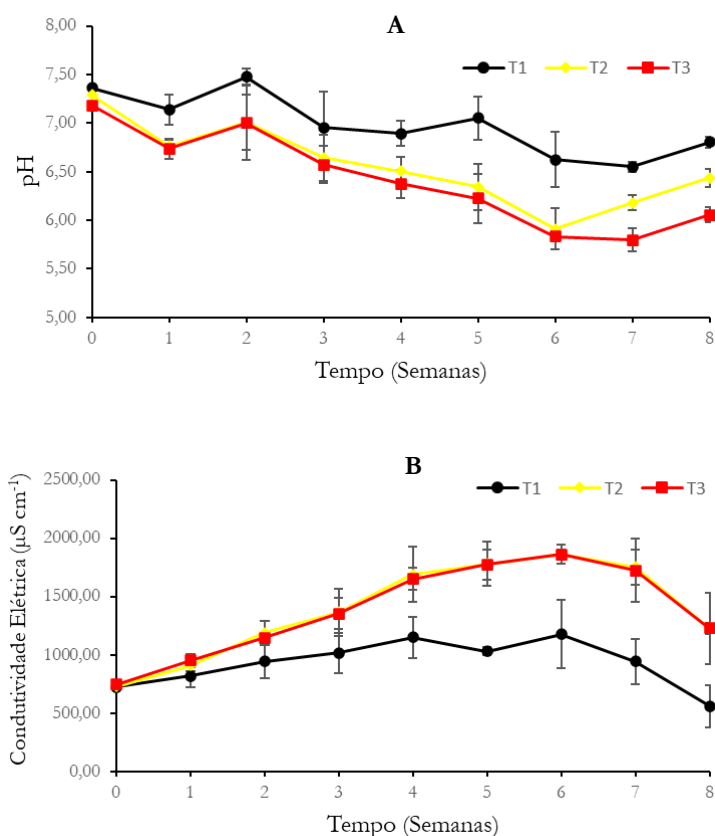


Figura 13. Valores médios semanais do pH e condutividade elétrica na água do sistema de aquaponia, contendo plantas de alface (Psíquê) e tilápias do Nilo.

Fonte: Próprio autor

Os valores médios em cada tratamento para o pH foram de 6,98 (T1), 6,56 (T2) e 6,42 (T3), com valores máximos e mínimos de 7,47-6,55 (T1), 7,29-5,91 (T2) e 7,18-5,79 (T3). Já os valores médios da CE foram de 927,92 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (T1), 1388,91 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (T2) e 1380,86 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (T3), com faixa de variação entre 1176,13-557,13 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (T1), 1860,06-727,87 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (T2) e 1860,73-744,00 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (T3). Os valores médios de pH e CE ao longo do período experimental, apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos, e são apresentados na Tabela 6. Para o pH, o T1 e T3 foram significativamente diferentes, já T2 não apresentou diferenças em relação a T1 e T3. Já para a CE, T2 e T3 foram significativamente superiores ao T1.

Tabela 6. Valores do teste de comparação de médias (Tukey) para os dados médios de pH e CE.

Tratamento	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
T1	6,98a	927,92b
T2	6,56ab	1388,91a
T3	6,42b	1380,86a
p-valor	0,022	0,013

Os valores correspondem a média das águas de cada tratamento em cada unidade experimental, sendo: T1 – Tratamento controle; T2 - substituição de 50% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio; T3 - substituição de 100% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio. Médias seguidas de letras minúsculas diferentes na coluna diferiram pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em um sistema de aquaponia a água deve estar disponível e atender as necessidades de três organismos completamente diferentes (plantas, bactérias e peixes), sendo que o valor do pH do meio é um determinante crítico da produção. O pH ideal em um sistema aquapônico varia de 6,5-7,0 para atender aos três componentes do sistema (CARNEIRO et al., 2015), sendo o pH ideal para os peixes nesse sistema variando de 6,0 a 8,5 (SOMERVILLE et al., 2014), 6,4 a 8 é recomendado para a melhor ação das bactérias nitrificantes (RUIZ; JEISON; CHAMY, 2003), e para as plantas o valor recomendado de pH apresenta variações entre 5,5 e 6,5 (CARNEIRO et al., 2015; SOMERVILLE et al., 2014). Fora da faixa ideal de pH (>7), a biodisponibilidade de nutrientes é afetada, dificultando assim a absorção de nutrientes como Fe, Mn, B, Zn e Cu, e com valores <5,0 afeta a absorção e biodisponibilidade de nutrientes como Ca, K, Mg e N-NH₄ (RESH, 2016). Os valores de pH ficaram a maior parte do tempo dentro da faixa recomendada, com exceção dos valores de T2 e T3 que apresentaram valores inferiores nas semanas 5 e 6. Essa queda possivelmente ocorreu pela ação das bactérias nitrificantes do sistema. Os valores obtidos foram semelhantes aos encontrados por Delaid et al. (2017). Os valores de pH de maneira geral não afetaram a absorção de nutrientes pelas plantas como foi apresentado nas Figuras 9 e 10 e nem no desempenho das tilápias como discutido nas Tabelas 3 e 4. Ao se relacionar os valores de pH com a biomassa fresca média de alface em cada tratamento (Tabela 5), percebeu-se que quanto maior o valor de pH apresentado, menor o valor da biomassa, mostrando que esse parâmetro é importante para a absorção de nutrientes e desenvolvimento das plantas.

A CE foi maior para os tratamentos T2 e T3 durante todo o experimento, sendo que T2 e T3 apresentaram valores estatisticamente superiores em relação ao tratamento controle. Uma possível explicação para essa diferença entre os tratamentos, é o fato de T2 e T3 apresentarem cloreto de cálcio nas dietas das tilápias, enquanto o T1 possuía como fonte de cálcio o calcário calcítico e a fosfato bicálcico. O cloreto de cálcio aumenta a condutividade elétrica dos tanques dos peixes, visto que é uma substância altamente solúvel em água, formando íons que altera a CE; já o calcário calcítico é composto basicamente por carbonato de cálcio que é menos solúvel em água. A condutividade elétrica (CE) é um parâmetro que faz uma estimativa da quantidade de íons livres nas soluções aquosas, sendo um importante norteador da qualidade da água. Para um sistema de aquaponia, a CE recomendada está entre 600 e 900 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (CARNEIRO et al., 2016). Ela possui relação direta com a absorção de água e nutrientes pelas plantas e com o equilíbrio iônico dos peixes (LENZ et al., 2017). Em estudo sobre produção hidropônica de alfaces em sistema NFT, Barbieri et al. (2010) recomendaram a produção em soluções com faixas de CE de 750-1500 $\mu\text{S cm}^{-1}$, mas dizem que as condições do ambiente produtivo exercem influência no teor de sais dissolvidos, sendo assim, sugerem que mais estudos devem ser realizados conforme a região de produção. Altos valores de CE pode ser um indicativo de altas concentrações de matéria orgânica em decomposição, resultado do fornecimento elevado de rações e acúmulo de resíduos dos peixes, além da falta de manutenção do sistema (SUTANI et al., 2021). Os valores obtidos no presente estudo apresentaram bons valores de CE, mostrando que a quantidade ofertada de ração ao longo do experimento foi adequada, sendo que os peixes e as plantas obtiveram um bom desempenho no sistema, fruto da qualidade da ração ofertada e da disponibilidade de nutrientes.

Em aquaponia, a ração adicionada ao sistema é a principal entrada de nutrientes para a produção de peixes e plantas, sendo que a sua qualidade e quantidade disponibilizada influencia em seus índices produtivos e na qualidade da água (SÁTIRO; NETO; DELPRETE, 2018). De acordo com Carneiro et al. (2015), ao se fornecer 25 a 40 g de ração diariamente aos peixes, é possível a produção de para 1 m² de área de produção de hortaliças. Já Rakocy (2012), ao criar a relação da taxa de alimentação, diz que para cada m² de produção de hortaliças é necessário o fornecimento de 60 a 100g de ração. A relação apresentada por Somerville et al. (2014) mostra que um reservatório produtivo de 250L de água é capaz de atender 1 m² de produção de hortaliças folhosas. Considerando que o sistema experimental

continha 25L de água em cada reservatório e alimentava 9 unidades de alface por m², sendo ofertados 5,39g de ração diariamente em média, o sistema apresentou bons índices produtivos de peixes e plantas, mostrando que o arraçoamento de 3% do peso da biomassa dos tanques foi adequado.

A alcalinidade é um importante parâmetro que deve ser monitorado em sistemas de aquaponia, sendo uma medida de tamponamento do pH, sendo uma medida de acompanhamento do poder de neutralização de soluções alcalinas por hidrogênio dissolvido (VALDEZ-AGUILAR; REED, 2006). Em aquaponia, durante o processo de nitrificação, que acontece no reator biológico, o valor de pH diminui, visto que esse processo é acidificante, reduzindo assim o poder de tamponamento do meio, sendo necessário a aplicação de uma fonte de carbonatos (DELAIDE et al., 2017). Durante o experimento foram adicionadas doses de carbonato de sódio (Na₂CO₃) para manter uma concentração mínima de 50 mg L⁻¹ de carbonato (CO₃), sendo corrigida sempre que os valores estivessem abaixo da concentração desejada, com a inserção de Na₂CO₃ no sistema para manter o poder tampão da água, para controle da alcalinidade e auxiliar nas variações de pH. Como o manejo da alcalinidade consistiu em reposições com carbonato de sódio sempre que necessário para manter o poder tampão da água, esse parâmetro não foi apresentado graficamente.

Monitorar os parâmetros de qualidade da água em sistemas de produção aquapônicos são práticas consideradas essenciais para o melhor desenvolvimento e otimização da produção de peixes e plantas, sendo os mesmos, responsáveis pelo bem-estar, sanidade (saúde) e disponibilização de nutrientes para as espécies envolvidas (NUWANSI et al., 2021). O presente estudo ressaltou que o fornecimento de rações versáteis não teve nenhuma influência sobre os valores das variáveis temperatura e OD das soluções aquapônicas. Apesar de apresentarem pequenas variações de valores absolutos entre os tratamentos, o comportamento da temperatura e OD se mostrou similar ao longo do período experimental. Como os sistemas apresentaram baixo volume de água (25L), a temperatura do meio foi altamente influenciada pela temperatura da estufa (ar). Além disso, cada unidade experimental possuía um termostato regulado para manter a temperatura mínima da água em 28°C.

A temperatura da água é um importante fator ambiental que desempenha um papel fundamental no crescimento e metabolismo dos peixes (ISLAM et al., 2019). Variações de temperaturas podem causar efeitos negativos no desempenho de crescimento dos peixes, sendo que a diminuição da temperatura pode gerar gastos energéticos extras para a sobrevivência das tilápias, e o seu aumento excessivo pode reduzir o consumo de alimentos e assim prejudicar o desenvolvimento dos animais (FU et al., 2018). Além de auxiliar no desempenho ótimo de crescimento dos peixes, a temperatura da água em sistemas aquapônicos, também influencia nas atividades de desenvolvimento das bactérias nitrificantes e das plantas (THOMAS et al., 2019). Segundo Somerville et al. (2014) em sistemas de aquaponia a faixa de temperatura da água indicada apresenta variações entre 18-30°C, sendo temperaturas ideais de 25 a 30°C para bactérias nitrificantes (JOHN et al., 2022), 27-32 °C para as tilápias (KUBITZA, 2011) e 15-25°C para as alfaces (MARTINEZ, 2006). Em condições de altas temperaturas, as alfaces podem acelerar o seu ciclo produtivo, o que pode reduzir a sua produtividade, causando o seu pendoamento precoce e possível amargor de suas folhas (YURI et al., 2005).

Os valores para as concentrações de amônia, nitrito, nitrato, fósforo e potássio das águas dos sistemas de aquaponia estão apresentados na Figura 14. O nitrogênio, fósforo e potássio são os nutrientes que demandam maiores quantidades em sistemas de aquaponia, com o nitrogênio sendo o principal para o desenvolvimento dos peixes e das plantas (ENDUT; JUSOH; ALI, 2014). Como a água deionizada foi usada para repor as perdas por evapotranspiração, a ração fornecida aos peixes foi considerada a única entrada de nutrientes para cada sistema de aquaponia.

O nitrogênio ao longo do sistema sofre modificações, em que é afetado pelas concentrações de amônia, nitrito e nitrato, pH, OD e a relação C:N (WONGKIEW et al., 2017). Segundo Cyrino et al. (2010) o uso de rações

desbalanceadas ou o seu excesso reduzem o aproveitamento dos nutrientes pelos peixes, o que causa um maior acúmulo de matéria orgânica na água, reduzindo assim a qualidade da água e intensificando os danos ambientais causados por acúmulo de N e P. De acordo com Flores et al. (2022), o fornecimento de rações deve ser dimensionado com a capacidade alojada nos tanques, de maneira a otimizar a utilização dos nutrientes e disponibilizá-los sem excessos para os peixes e plantas.

Observou-se que o T1 apresentou maiores valores para o N-NH_4^+ (Figura 14A), com valor máximo de $17,45 \text{ mg L}^{-1}$ na semana 2 e outro pico na semana 5 ($15,02 \text{ mg L}^{-1}$). Para minimizar os eventuais problemas da alta concentração de amônia no sistema, na semana 2 houve uma redução da alimentação dos peixes para uma taxa de 1% do peso dos peixes para todos os tratamentos. Esse mecanismo se mostrou eficaz, visto que na semana 3 os valores tiveram uma queda ($4,10 \text{ mg L}^{-1}$). Na semana 3 a alimentação voltou ao normal com uma taxa de arraçamento de 3%. O T2 apresentou valor médio de $2,96 \text{ mg L}^{-1}$, e valor máximo de $4,95 \text{ mg L}^{-1}$. Já o T3 apresentou valor médio de $3,76 \text{ mg L}^{-1}$, e valor máximo de $11,08 \text{ mg L}^{-1}$. Os tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes ao longo do experimento, em que apresentaram picos na semana 2 e 5, e quedas das concentrações de amônia nas semanas subsequentes. Os limites aceitáveis de amônia em produção de peixes devem estar entre $0,4$ e $2,0 \text{ mg L}^{-1}$ (BOYD; TUCKER, 1998). Em sistemas aquapônicos, a amônia sofre variações de toxicidade devido as flutuações de temperatura e pH (PIEDRAS et al., 2006). No presente estudo, apesar dos valores serem superiores ao recomendado, os peixes e as plantas conseguiram se desenvolver sem maiores problemas, visto que o reator biológico teve uma importante atuação ao converter a amônia em nitrito e nitrato.

Observando-se as Figuras 14A, B e C, conseguiu-se visualizar a atuação do reator biológico no sistema aquapônico, em que a amônia é convertida em nitrito e depois em nitrato pela ação de bactérias nitrificantes (*Nitrosomonas* e *Nitrobacter*). Ressalta-se que o reator de nitrificação foi ativado anteriormente ao início do experimento para que as bactérias estivessem realizando a conversão biológica da amônia. O funcionamento do reator biológico pode ser acompanhado olhando, por exemplo, nas semanas 2 e 3 (Figura 14A), e nas semanas 3 e 4 (Figura 14B e C), em que na semana 2 teve o aumento da amônia no sistema, na semana 3 a concentração de amônia diminuiu e a concentração de nitrito aumentou, e na semana 4 a concentração de nitrato aumentou, fazendo com que essa taxa de transformação ocorresse de maneira a disponibilizar os nutrientes para as plantas e deixar o ambiente menos tóxico para os peixes.

Os valores médios de nitrito (N-NO_2^-) dos tratamentos foram de $5,94 \text{ mg L}^{-1}$ (T1), $2,66 \text{ mg L}^{-1}$ (T2) e $2,13 \text{ mg L}^{-1}$ (T3). Na semana 3, o T1 apresentou o maior valor ($16,03 \text{ mg L}^{-1}$) entre todos durante o período experimental, fruto da alta concentração de amônia da semana anterior. Os maiores valores do T2 e T3 foram respectivamente, $6,10 \text{ mg L}^{-1}$ e $5,13 \text{ mg L}^{-1}$ (T2). De acordo com Jiang et al. (2014) níveis de nitrito acima de $1,00 \text{ mg L}^{-1}$ podem causar danos aos peixes. Apesar de apresentar valores considerados elevados de N-NO_2^- , os resultados foram inferiores em relação aos valores relatados por Ru et al. (2017), que ao estudarem a adição de nutrientes em sistemas aquapônicos, relataram que as *Oreochromis Niloticus* sobreviveram em concentrações de nitrito de até $44,67 \text{ mg L}^{-1}$. O nitrito sofreu variações de concentração ao longo de todo o experimento, resultado do processo de nitrificação que ocorreu no reator biológico.

Para o nitrato, os níveis médios da concentração em cada tratamento foram de $49,38 \text{ mg L}^{-1}$ (T1), $65,88 \text{ mg L}^{-1}$ (T2) e $48,39 \text{ mg L}^{-1}$ (T3). Essas variações ocorreram por causa dos processos de nitrificação do sistema e da maior absorção de nitrato pelas plantas. Como foi observado na Figura 9, o N foi absorvido em valores superiores ao recomendado, mostrando que a disponibilização e a sua concentração na solução foram importantes para o desenvolvimento da cultura vegetal. O nitrato (N-NO_3^-) em um sistema de produção de peixes varia em relação a

quantidade de proteínas das rações e da densidade de estocagem de peixes (Endut 2010), sendo diretamente dependente da atuação das bactérias nitrificantes. Concentrações entre 150 e 300 mg L⁻¹ foram relatadas como inofensivas para a tilápia (GRABER; JUNGE, 2009). Em caso de concentrações muito elevadas, pode-se realizar a desnitrificação (RAKOCY, 2012). Schmautz et al. (2021) observaram concentrações de nitrato na solução aquapônica de 74 mg L⁻¹. Ao estudarem variações de 5 a 105 mg L⁻¹ de nitrato no sistema, Letey, Jarrel e Valoras (1982) não observaram diferenças significativas em produção de massa fresca da alface romana. Os valores encontrados foram próximos aos relatados pelos autores, sendo que os maiores valores observados em cada tratamento foram de 144,00 mg L⁻¹(T1), 168,33 mg L⁻¹ (T2) e 119,67 mg L⁻¹ (T3). O processo de nitrificação funcionou muito bem durante o período, transformando amônia em nitrito e nitrato com muita eficiência.

Os valores de fósforo (P-PO₄³⁻) apresentaram variações entre 0,64 e 102,10 mg L⁻¹. Os valores médios dos tratamentos foram de 4,69 mg L⁻¹(T1), 24,64 mg L⁻¹ (T2) e 42,13 mg L⁻¹ (T3). As variações apresentadas indicaram que a substituição do fosfato bicálcico por fosfato de potássio, aumentou a concentração disponível do P, fato esse constatado pela maior absorção de P pelas plantas nos tratamentos T2 e T3. Além disso T2 e T3 apresentaram maior acúmulo da concentração do nutriente ao longo do tempo como apresentado na Figura 14D, mostrando a tendência de acúmulo na solução como descrito por Avnimelech (2009). Pinho et al. (2017) obtiveram concentrações de ortofosfato de 20,6 mg L⁻¹ ao produzirem alface e tilápias em aquaponia. Já Santos et al. (2004) mostraram que as plantas em concentrações mínimas de 20 mg L⁻¹ apresentavam crescimento e biomassa constantes. Como discutido na Tabela 5, as plantas de T2 e T3 apresentaram melhores valores de desempenho, sendo T3 o tratamento com melhores valores, fato esse que pode ser justificado pela substituição total de um ingrediente da ração e maior disponibilidade na solução.

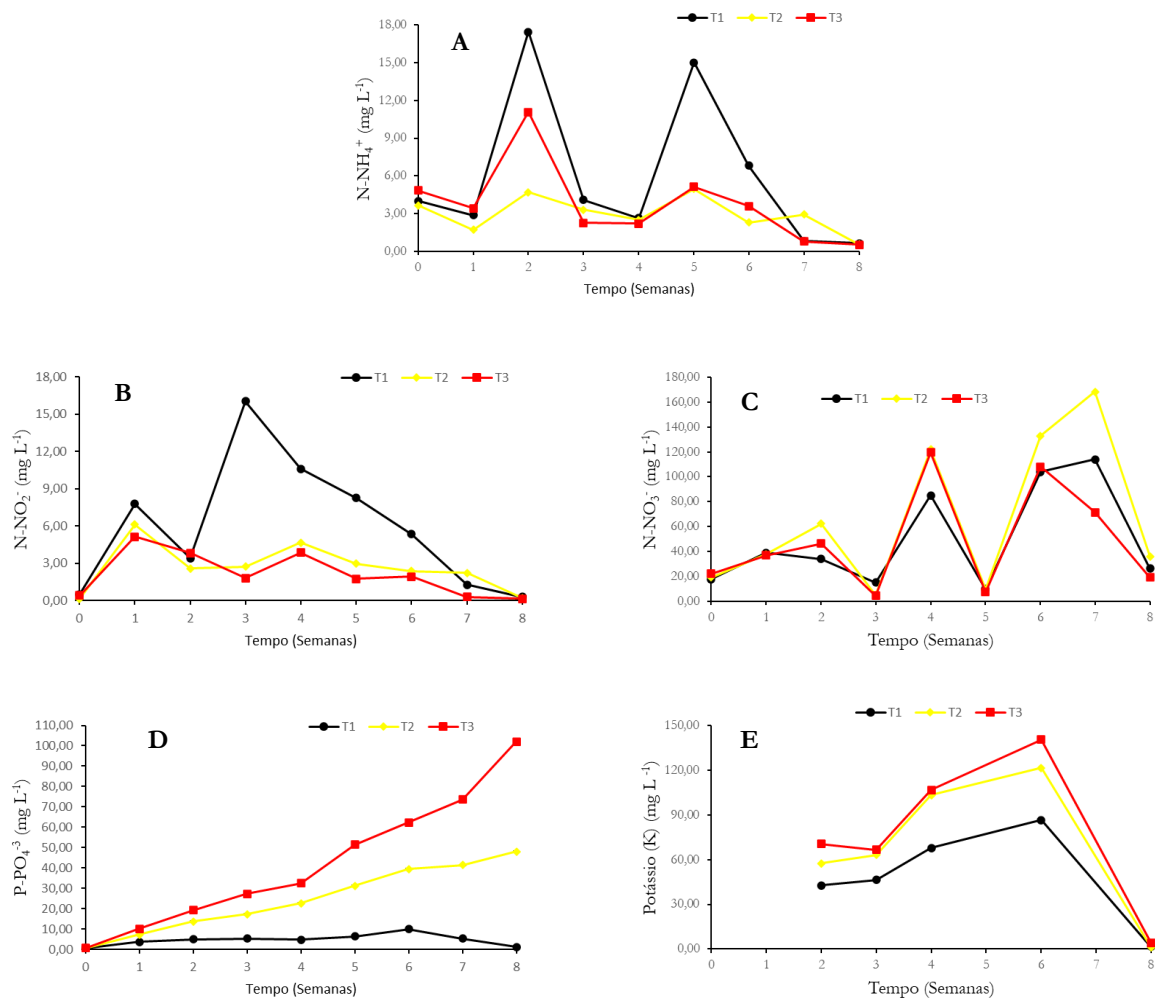


Figura 14. Concentrações de elementos na solução aquapônica referente ao comportamento da (A) amônia (N-NH₄⁺); (B) nitrito (N-NO₂⁻), (C) Nitrato (N-NO₃⁻), (D) fósforo (P-PO₄³⁻) e (E) potássio ao longo do período experimental.

Fonte: Próprio autor

As concentrações de potássio foram quantificadas a partir da semana 2 visto que as plantas só entraram no sistema na semana 3. Além disso, na ração houve uma inserção de K nos tratamentos T2 e T3, o que precisou de um período para gerar acúmulo do nutriente no sistema. Como se observa na Figura 14E, T2 e T3 apresentaram as maiores concentrações de K, apresentado valores médios de concentração de 69,41 mg L⁻¹ e 77,83 mg L⁻¹ respectivamente. Já T1 apresentou valor médio de 48,99 mg L⁻¹, evidenciando a menor concentração de K em sistemas de aquaponia em rações não suplementadas com o nutriente. Essas concentrações mais elevadas de K dos T2 e T3 mostram a importância da formulação de dietas versáteis em aquaponia, visto que mesmo que não utilizados pelos peixes em sua totalidade, esse nutriente é essencial para o desenvolvimento das plantas e deve estar disponível em concentração adequada na água para o seu melhor desenvolvimento. Um outro ponto relevante, é que no estágio final de desenvolvimento as plantas absorveram maiores quantidade de K, o que causou a queda de concentração entre as semanas 6 e 8. Essa maior disponibilidade do nutriente otimizou a biomassa fresca do T3 que apresentou resultados superiores em relação ao controle como visto na tabela 5. John et al. (2022) ao estudarem diferentes níveis de complementação do K em aquaponia, concluíram que a melhor dose de aplicação para a produção de peixes e plantas era a de 150 mg L⁻¹, sendo que o comportamento do K no sistema foi semelhante ao do presente estudo, se iniciando

com concentrações menores, atingindo o valor máximo no terço final, e diminuindo a concentração (absorção plantas) na fase final (últimos dias) de cultivo.

Definir a melhor relação N:P:K em sistema de aquaponia é um dos principais desafios para otimizar esse sistema produtivo. Geralmente desses nutrientes, o K apresenta baixas concentrações, visto que as entradas (rações) são formuladas para atender as exigências dos peixes e não as das plantas (Rakocy, 2012). Para melhorar essa relação, o presente trabalho testou a substituição de fosfato bicálcico por fosfato de potássio, com a finalidade de gerar melhores índices produtivos e otimizar a relação N:P:K, que vem sem mostrando desbalanceada nos estudos aquapônicos. Os valores médios obtidos dessa relação são apresentados na Tabela 7, e foram comparados com soluções nutritivas encontradas por Resh (2012), Anderson et al. (2017) e Delaid et al. (2017) para a produção de alface.

Como se observa na Tabela 7, para todas as relações observadas houve diferenças entre os valores, resultado das dietas ofertadas aos animais. Para a relação N:P, T3 (1:1,02 mg L⁻¹) apresentou relação 12,5 vezes maior que a relação T1 (1:0,08 mg L⁻¹), 2,37 vezes em relação de T2 (1:0,43 mg L⁻¹) e 3,40 vezes em relação aos valores de Resh (2012) e Delaid et al. (2017). Já o T2 apresentou valores 5,38 vezes superior ao T1 e 1,43 e 1,87 vezes superior a Resh (2012) e Anderson et al. (2017) respectivamente. O que se pode observar nessa relação é que as dietas versáteis apresentaram maiores concentrações de P em relação as soluções citadas pelos autores, diminuindo assim a diferenças entre esses elementos (N e P) na solução do sistema.

Tabela 7. Valores médios das relações N:P, N:K e K:P das soluções aquapônicas experimentais comparadas com valores encontrados na literatura.

Relações	N:P	N:K	K:P
	mg L ⁻¹		
T1	1:0,08	1:0,94	1:11,29
T2	1:0,43	1:0,89	1:2,09
T3	1:1,02	1:1,61	1:1,57
Resh (2012)	1:0,30	1:1,10	1:3,67
Anderson et al. (2017)	1:0,23	1:1,62	1:7,04
Delaid et al. (2017)	1:0,30	1:0,40	1:1,33

Legenda: N (nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio). Os valores correspondem a média das soluções aquapônicas de cada tratamento em cada unidade experimental, sendo: T1 – Tratamento controle; T2 - substituição de 50% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio; T3 - substituição de 100% do fosfato bicálcico por fosfato de potássio.

A relação N:K entre os tratamentos experimentais apresentou o T3 com maior relação (1:1,61 mg L⁻¹), sendo este valor similar ao encontrado na solução hidropônica para cultivo de alface citada por Anderson et al. (2017). Todos os valores experimentais foram superiores a solução aquapônica de Delaid et al. (2017), e T1 e T2 apresentaram relação próxima à da apresentada por Resh (2012). O T3 apresentou relação 4,03 vezes superior ao valor apresentado por Delaid et al. (2017). Em experimento sobre o coeficiente de liberação de nutrientes em sistemas aquapônicos, da Silva Cerozi et al. (2022) encontraram valores inferiores aos observados, obtendo uma relação de 1:0,26 (N:K) com o fornecimento de rações comerciais. Ao colocar K em substituição fosfato bicálcico nas dietas experimentais, a concentração desse nutriente aumentou no sistema, melhorando a absorção do mesmo pelas plantas e não prejudicando o desempenho dos peixes. Em T2 a relação ficou próxima ao grupo controle pois além do aumento do K, houve um aumento também na concentração de N total, o que fez com que a relação não subisse.

Por fim a relação K:P apresentou redução de 5,40 e 7,19 vezes do T1 em relação ao T2 e T3 respectivamente, resultado do incremento de P e K nas concentrações do sistema advindas das dietas experimentais.

Ao se reduzir a distância da concentração entre esses nutrientes, tem-se uma solução que tenta corrigir eventuais deficiências entre esses macronutrientes, de forma que se possuírem concentrações mínimas, podem ajudar no desenvolvimento de plantas e não prejudicar o dos peixes. T3 apresentou redução de 2,34 e 4,48 vezes em relação a Resh (2012) e Anderson et al. (2017), e superior em 1,18 vezes a de Delaid et al. (2017).

De maneira geral, definir a melhor relação N:P:K em sistemas de aquaponia através do fornecimento de rações versáteis, é uma prática que deve ser mais difundida e estudada, visto que ainda não se tem a relação ideal entre esses nutrientes. Aproveitar os nutrientes em sua plenitude e reduzir desperdícios são as bases de sistemas de aquaponia, de maneira a otimizar e obter melhores índices produtivos de peixes e plantas de maneira sinérgica.

5. CONCLUSÃO

A formulação de rações versáteis se mostrou uma importante prática para otimizar o sistema de produção aquapônico, visto que ao fornecer rações com alto valor nutricional aos peixes, substituindo o fosfato bicálcico por fosfato de potássio, apresentou resultados promissores em sua substituição parcial e/ou total, mostrando que a sua substituição além de apresentar valores produtivos superiores para a biomassa de tilápia e de alface (fresca) em relação ao tratamento controle, não apresentou diferenças hematológicas para a produção da *Oreochromis Niloticus*, mostrando o potencial de uso das formulações de dietas específicas para uso em aquaponia. Além disso, o potencial da concentração de nutrientes dos sistemas e a absorção das plantas foram otimizadas em sistemas de aquaponia recebendo rações versáteis. No T3 a relação K:P apresentou redução de 7,19 vezes em relação a T1, e a relação N:P do T3 foi 12,5 vezes superior ao T1, mostrando o potencial da substituição da fonte fosfatada por uma que possuía K, através da aproximação das concentrações dos nutrientes N:P:K em sistemas de aquaponia. Recomenda-se que mais estudos sejam realizados para minimizar a deficiência nutricional de sistemas aquapônicos de maneira a atender e melhorar a produção de peixes e plantas, através de um ponto de equilíbrio da relação de nutrientes, em especial a relação N:P:K.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-TAWWAB, M. et al. Effects of dissolved oxygen and fish size on Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.): growth performance, whole-body composition, and innate immunity. **Aquaculture International**, v. 23, n. 5, p. 1261–1274, 30 out. 2015.
- ADLER, P. R. et al. Economic evaluation of hydroponics and other treatment options for phosphorus removal in aquaculture effluent. **HortScience**, v. 35, n. 6, p. 993–999, 2000.
- AHMED, Z. F. R. et al. Evaluation of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Production under Hydroponic System: Nutrient Solution Derived from Fish Waste vs. Inorganic Nutrient Solution. **Horticulturae**, v. 7, n. 9, p. 292, 6 set. 2021.
- AL-HAFEDH, Y. S.; ALAM, A.; BELTAGI, M. S. Food Production and Water Conservation in a Recirculating Aquaponic System in Saudi Arabia at Different Ratios of Fish Feed to Plants. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 39, n. 4, p. 510–520, ago. 2008.
- ANDERSON, T. et al. Growth and Tissue Elemental Composition Response of Butterhead Lettuce (*Lactuca sativa*, cv. Flandria) to Hydroponic Conditions at Different pH and Alkalinity. **Horticulturae**, v. 3, n. 41, p. 1–15, 13 jul. 2017.
- ANGKHA, B. et al. Mobilization of mica by *Bacillus* sp. and its effect on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cum holy basil (*Ocimum tenuiflorum*)–based aquaponic system. **Aquaculture International**, v. 28, n. 5, p. 2045–2058, 13 out. 2020.
- ANI, J. S. et al. Effect of stocking density on growth performance of monosex Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in the aquaponic system integrated with lettuce (*Lactuca sativa*). **Aquaculture and Fisheries**, v. 7, n. 3, p. 328–335, maio 2022.
- AOAC. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists: Official Methods of Analysis of AOAC International (21st Edition)**. Washington, DC: AOAC, 2019.
- ARAÚJO, A. D. F. **Integração de plantas com espécies nativas de peixes em sistema de aquaponia**. Dissertação de Mestrado—Florianópolis (SC): Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- AVNIMELECH, Y. **Biofloc Technology—A Practical Guide Book**. 3rd ed. ed. Louisiana, EUA: World Aquaculture Society, 2009.
- BAILEY, D. S.; FERRAREZI, R. S. Valuation of vegetable crops produced in the UVI Commercial Aquaponic System. **Aquaculture Reports**, v. 7, p. 77–82, ago. 2017.
- BARBIERI, E. et al. Condutividade elétrica ideal para o cultivo hidropônico de alface em ambiente tropical. **Horticultura Brasileira**, v. 28, n. 2, p. 303–308, jul. 2010.
- BARTELME, R. P. et al. Stripping away the soil: Plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, n. JAN, p. 1–7, 2018.

- BEZERRA NETO, E. HIDROPONIA. Em: **Cadernos do Semiárido**. [s.l: s.n.]. v. 6p. 1–88.
- BIJVELDS, M. et al. Magnesium transport in freshwater teleosts. **Journal of Experimental Biology**, v. 201, n. 13, p. 1981–1990, 1 jul. 1998.
- BOYD, C. E.; TUCKER, C. S. **Pond aquaculture water quality management**. Boston: [s.n.].
- BURY, N. R.; WALKER, P. A.; GLOVER, C. N. Nutritive metal uptake in teleost fish. **Journal of Experimental Biology**, v. 206, n. 1, p. 11–23, 1 jan. 2003.
- CAMARGO, O. A. et al. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC. **Boletim Técnico 106**, p. 77, 2009.
- CARDINAL, K. M.; COSTA, J. L. B.; RIBEIRO, A. M. L. Princípios básicos na formulação de rações. **Pubvet**, v. 13, n. 9, p. 1–7, set. 2019.
- CARNEIRO, P. C. F. et al. Aquaponia: Produção integrada de peixes e vegetais em aquaponia. Em: **Tavares Dias, M.; Mariano, W.S. (Org.). Aquicultura no Brasil: novas perspectivas**. 1. ed. São Carlos: 2, 2015. p. 683–706.
- CARNEIRO, P. C. F. et al. **Sistema familiar de aquaponia em canaletas**. Embrapa Tabuleiros Costeiros. **Circular técnica, 81**: Embrapa Tabuleiros Costeiros. Circular técnica, 81. Aracaju: [s.n.].
- CASTELLANE, P. D.; ARAÚJO, J. A. C. DE. **Cultivo sem solo: hidroponia**. 3 ed ed. Jaboticabals SP: Editora FUNEP, 1995.
- CEROZI, B. DA S. **Fulvic acid increases iron bioavailability in aquaponic systems: Theoretical designs and practical considerations to prevent iron deficiency in plants**. **Aquacultural Engineering**, 2020.
- COMETTI, N. N. et al. Soluções Nutritivas : formulação e aplicações. Em: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 90–112.
- COMETTI, N. N.; GALON, K.; BREMENKAMP, D. M. Comportamento de quatro cultivares de alface em cultivo hidropônico em ambiente tropical. v. 8, n. 1, p. 114–122, 2019.
- CYRINO, J. E. P. et al. A piscicultura e o ambiente: o uso de alimentos ambientalmente corretos em piscicultura. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. suppl spe, p. 68–87, jul. 2010.
- DA SILVA CEROZI, B. et al. Nutrient release coefficient: a proposed batch reactor assay to determine the elemental composition of aquaponic nutrient solutions. **Aquaculture International**, v. 30, n. 2, p. 735–746, 16 abr. 2022.
- DANAHER, J. J. et al. Alternative Solids Removal for Warm Water Recirculating Raft Aquaponic Systems. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 44, n. 3, p. 374–383, jun. 2013.

DELAIDE, B. et al. Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. **Aquacultural Engineering**, v. 78, p. 130–139, ago. 2017.

DEMARTELAERE, A. C. F. et al. A influência dos fatores climáticos sob as variedades de alface cultivadas no Rio Grande Do Norte. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 90363–90378, 2020.

DJIDONOU, D.; LESKOVAR, D. I. Seasonal changes in growth, nitrogen nutrition, and yield of hydroponic lettuce. **HortScience**, v. 54, n. 1, p. 76–85, 2019.

ENDUT, A. et al. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 5, p. 1511–1517, mar. 2010.

ENDUT, A.; JUSOH, A.; ALI, N. Nitrogen budget and effluent nitrogen components in aquaponics recirculation system. **Desalination and Water Treatment**, v. 52, n. 4–6, p. 744–752, 28 jan. 2014.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura : agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3. ed. Viçosa: [s.n.].

FLORES, R. M. V. et al. Efficiency tests for screening production strategies in a lettuce-juvenile tilapia aquaponics system in Brazil. **Aquaculture International**, v. 30, n. 5, p. 2403–2424, 9 out. 2022.

FREITAS, F. T. O. DE et al. CULTIVO DE ALFACE SOB INTERVALOS DE RECIRCULAÇÕES DAS SOLUÇÕES NUTRITIVAS EM SISTEMAS HIDROPÔNICOS USANDO ÁGUA SALOBRA. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 67–96, 21 jun. 2021.

FU, K.-K. et al. The thermal acclimation rate varied among physiological functions and temperature regimes in a common cyprinid fish. **Aquaculture**, v. 495, p. 393–401, out. 2018.

FURLANI, P. R. et al. **Cultivo Hidropônico de Plantas: Parte 2 - Solução Nutritiva**. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/hidroponiap2/index.htm>. Acesso em: 21 set. 2022a.

FURLANI, P. R. et al. **Cultivo Hidropônico de Plantas: Parte 3 - Produção de mudas para hidroponia**. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/hidroponiap3/index.htm>. Acesso em: 21 set. 2022b.

GAJDANOWICZ, P. et al. Potassium (K⁺) gradients serve as a mobile energy source in plant vascular tissues. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 2, p. 864–869, 11 jan. 2011.

GATLIN III, D. M. Principles of fish nutrition. **Souther Regional Aquaculture Center**, p. 1–8, jul. 2010.

GODDEK, S. et al. Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. **Sustainability**, v. 7, n. 4, p. 4199–4224, 10 abr. 2015.

GOLDENFARB, P. B. et al. Reproducibility in the Hematology Laboratory: The Microhematocrit Determination. **American Journal of Clinical Pathology**, v. 56, n. 1, p. 35–39, 1 jul. 1971.

GRABER, A.; JUNGE, R. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. **Desalination**, v. 246, n. 1–3, p. 147–156, set. 2009.

GUO, W. et al. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. **The Crop Journal**, v. 4, n. 2, p. 83–91, abr. 2016.

HAFSI, C. et al. Potassium deficiency alters growth, photosynthetic performance, secondary metabolites content, and related antioxidant capacity in *Sulla carnosa* grown under moderate salinity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 118, p. 609–617, set. 2017.

HENZ, G. P.; SUINAGA, F. **Tipos de Alface Cultivados no Brasil. Comunicado Técnico 75**. Brasília, DF Embrapa, , 2009.

HORTIFRUTI BRASIL. Anuário 2021/2022. **CEPEA – ESALQ/USP**, p. 1–50, dez. 2021.

HRUBEC, T. C.; CARDINALE, J. L.; SMITH, S. A. Hematology and Plasma Chemistry Reference Intervals for Cultured Tilapia (*Oreochromis Hybrid*). **Veterinary Clinical Pathology**, v. 29, n. 1, p. 7–12, mar. 2000.

HRUBEC, T. C.; SMITH, S. A. Hematology of fishes. Em: WEISS, D. J.; WARDROP, K. J. (Eds.). **Schalm's Veterinary Hematology**. 6. ed. Ames, Iowa: Wiley-Blackwell, 2010. p. 994–1003.

HUNDLEY, G. C.; NAVARRO, R. D. **AQUAPONIA_ A INTEGRAÇÃO ENTRE PISCICULTURA E A HIDROPONIA**. , 2013. Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/2809>>

IBGE. **Pesquisa Pecuária Municipal: Produção da aquicultura**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/b25372bebf621f8c789c4fda346d1a9.pdf>. Acesso em: 7 out. 2022.

ISLAM, MD. A. et al. Temperature changes influenced the growth performance and physiological functions of Thai pangas *Pangasianodon hypophthalmus*. **Aquaculture Reports**, v. 13, p. 100179, mar. 2019.

JIANG, Q. et al. Effect of nitrite exposure on metabolic response in the freshwater prawn *Macrobrachium nipponense*. **Open Life Sciences**, v. 9, n. 1, p. 86–91, 1 jan. 2014.

JOHN, V. C. et al. Effect of potassium supplementation on osmoregulatory and stress response of *Pangasianodon hypophthalmus* (Sauvage, 1878) with *Spinacia oleracea* L. in aquaponics. **Journal of Fish Biology**, v. 101, n. 1, p. 249–261, 3 jul. 2022.

KHATER, E. S. G. et al. **Utilization of effluent fish farms in tomato cultivation**. **Ecological Engineering**, 2015.

- KUBITZA, F. Nutrição e alimentação dos peixes cultivados. p. 1–126, 2004.
- KUBITZA, F. **Tilápia: tecnologia e planejamento na produção comercial**. 2. ed. [s.l.] Editora Kubitza, 2011.
- LALL, S. P. The minerals. Em: HALVER, J. E.; HARDY, R. W. (Eds.). **Fish Nutrition**. 3 ed ed. San Diego, CA: Elsevier/Academic Press, 2002. p. 259–308.
- LALL, S. P.; KAUSHIK, S. J. Nutrition and Metabolism of Minerals in Fish. **Animals**, v. 11, n. 9, p. 2711, 16 set. 2021.
- LENNARD, W. Aquaponic system design parameters: fish to plant ratios (feeding rate ratios). **Aquaponic Solution**, v. 11, p. 1–11, 2012.
- LENNARD, W.; GODDEK, S. Aquaponics: The Basics. Em: **Aquaponics Food Production Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 113–143.
- LENZ, G. L. et al. Produção de alface (*Lactuca sativa*) em efluentes de um cultivo de tilápias mantidas em sistema BFT em baixa salinidade. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 43, n. 4, p. 614–630, 15 dez. 2017.
- LETEY, J.; JARRELL, W. M.; VALORAS, N. Nitrogen and water uptake patterns and growth of plants at various minimum solution nitrate concentrations. **Journal of Plant Nutrition**, v. 5, n. 2, p. 73–89, 21 jan. 1982.
- LIM, C. et al. Interaction between dietary levels of iron and vitamin C on growth, hematology, immune response and resistance of channel catfish *Ictalurus punctatus*/ to *Edwardsiella ictaluri* challenge. **Aquaculture**, v. 185, p. 313–327, 2000.
- LIM, C.; WEBSTER, C. D. **Dietary Nutrients, Additives, and Fish Health**. [s.l.] WILEY blackwell, 2015.
- LOGATO, P. **Alimentação de peixes de água doce**. Viçosa, MG: Editora Aprenda Fácil, 2000.
- LOVE, D. C. et al. An international survey of aquaponics practitioners. **PLoS ONE**, v. 9, n. 7, p. 1–10, 2014a.
- LOVE, D. C. et al. An International Survey of Aquaponics Practitioners. **PLoS ONE**, v. 9, n. 7, p. e102662, 16 jul. 2014b.
- LOVE, D. C. et al. Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. **Aquaculture**, v. 435, p. 67–74, jan. 2015.
- LUO, G. et al. Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system. **Aquaculture**, v. 422–423, p. 1–7, fev. 2014.

MANTOVANI, J. R. et al. Teores de fósforo no solo e produção de alface crespa em função de adubação fosfatada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 4Supl, p. 2369, 4 set. 2014.

MARTINEZ, H. E. P. **Manual Prático de Hidroponia**. 4. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2006.

MARTINS, C. M. et al. CURVA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES EM ALFACE HIDROPÔNICA. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 4, p. 123–128, out. 2009.

MAUCIERI, C. et al. Effect of stocking density of fish on water quality and growth performance of European Carp and leafy vegetables in a low-tech aquaponic system. **PLOS ONE**, v. 14, n. 5, p. e0217561, 30 maio 2019.

MEENA, L. L. et al. Effect of foliar application of potassium with aquaculture wastewater on the growth of okra (*Abelmoschus esculentus*) and Pangasianodon hypophthalmus in recirculating aquaponic system. **Scientia Horticulturae**, v. 302, n. April, p. 111161, 2022.

MORAES, G.; DE ALMEIDA, L. C. Nutrition and functional aspects of digestion in fish. Em: **Biology and Physiology of Freshwater Neotropical Fish**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 251–271.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Nutrient Requirements of Fish and Shrimp**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2011.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. **Nutrient Requirements of Fish and Shrimp**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2011.

NATT, M. P.; HERRICK, C. A. A New Blood Diluent for Counting the Erythrocytes and Leucocytes of the Chicken. **Poultry Science**, v. 31, n. 4, p. 735–738, jul. 1952.

NELSON, R. L. Ten aquaponic systems around the world. **Aquaponics Journal**, v. 46, p. 8–12, 2007.

NIU, G.; MASABNI, J. Hydroponics. Em: **Plant Factory Basics, Applications and Advances**. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 153–166.

NOZZI, V. et al. Nutrient Management in Aquaponics: Comparison of Three Approaches for Cultivating Lettuce, Mint and Mushroom Herb. **Agronomy**, v. 8, n. 3, p. 27, 7 mar. 2018.

NUWANSI, K. K. T. et al. Utilization of phytoremediated aquaculture wastewater for production of koi carp (*Cyprinus carpio* var. *koi*) and gotukola (*Centella asiatica*) in an aquaponics. **Aquaculture**, 2019.

NUWANSI, K. K. T. et al. Optimization of stocking density of koi carp (*Cyprinus carpio* var. *koi*) with gotukola (*Centella asiatica*) in an aquaponic system using phytoremediated aquaculture wastewater. **Aquaculture**, 2021.

PEREIRA, D. S. P. et al. Parâmetros hematológicos e histológicos de tilápia-do-nilo em resposta ao desafio de diferentes níveis de salinidade. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 42, n. 3, p. 635–647, 30 set. 2016.

PIEDRAS, S. R. N. et al. Lethal concentration (CL50) of un-ionized ammonia for pejerrey larvae in acute exposure. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 2, p. 184–186, abr. 2006.

PINHO, S. M. et al. Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. **Ecological Engineering**, v. 103, p. 146–153, jun. 2017.

QUEIROZ, J. F. et al. Manejo alimentar e da qualidade da água na produção de tilápia-do-nylo (*Oreochromis niloticus*) . **Embrapa Meio Ambiente**, p. 1–37, 2021.

RAFIEE, GH. R. et al. Effects of supplementary nutrient in an aquaponic system for production of ornamental red tilapia (*Oreochromis Sp.*) and lettuce (*Lactuca sativa var longifolia*). **Journal of Survey in Fisheries Sciences**, v. 5, n. 2, 1 fev. 2019.

RAKOCY, J. E. Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture. Em: **Aquaculture Production Systems**. [s.l.] Wiley, 2012. p. 344–386.

RANZANI-PAIVA, M. J. T. Hematologia de peixes. Em: SANTOS, H. S. L. (Ed.). **Histologia de Peixes**. São Paulo: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp, 1991. p. 65–70.

RANZANI-PAIVA, M. J. T. et al. **Métodos para análise hematológica em peixes**. Maringá: Editora da Universidade Estadual de Maringá (EDUEM), 2013.

RESH, H. M. Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. **CRC Press**, 2016.

RODRIGUES, J. S. **Densidade de estocagem de *Pangasius hypophthalmus* (Sauvage, 1878) criado em sistema raceway**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia)—Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2020.

ROOSTA, H. R.; HAMIDPOUR, M. Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. **Scientia Horticulturae**, v. 129, n. 3, p. 396–402, jun. 2011.

RU, D. et al. Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 19, p. 16328–16335, 25 jul. 2017.

RUIZ, G.; JEISON, D.; CHAMY, R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration. **Water Research**, v. 37, n. 6, p. 1371–1377, mar. 2003.

SAKATA. **Psiquê A beleza da sua hidroponia**. Disponível em: <<https://www.sakata.com.br/hortalicas/folhosas/alface/crespa/psique>>. Acesso em: 14 ago. 2022.

SALAM, M. A.; ASADUJJAMAN, M.; RAHMAN, M. S. Aquaponics for Improving High Density Fish Pond Water Quality Through Raft and Rack Vegetable Production. **World Journal of Fish and Marine Sciences**, v. 5, n. 3, p. 251–256, 2013.

SANTOS, M. H. V. DOS et al. Uso da manipueira como fonte de potássio na cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em casa-de-vegetação. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 4, 1 dez. 2010.

SÁTIRO, T. M.; NETO, K. X. C. R.; DELPRETE, S. E. AQUAPONIA: SISTEMA QUE INTEGRA PRODUÇÃO DE PEIXES COM PRODUÇÃO DE VEGETAIS DE FORMA SUSTENTÁVEL. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 11, n. 1, p. 38, 10 out. 2018a.

SÁTIRO, T. M.; S. E. D.; NETO, K. X. C. R.; DELPRETE, S. E. AQUAPONIA: SISTEMA QUE INTEGRA PRODUÇÃO DE PEIXES COM PRODUÇÃO DE VEGETAIS DE FORMA SUSTENTÁVEL. **Revista Brasileira de Engenharia da Pesca**, v. 11, n. 1, p. 38–54, 2018b.

SATOH, S. et al. Bioavailability of amino acid-chelated and glass-embedded manganese to rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), fingerlings. **Aquaculture Research**, v. 32, p. 18–25, dez. 2001.

SAUSEN, D. et al. Cultivo fora do solo: uma alternativa para áreas marginais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 14888–14903, 2020.

SAVVAS, D. et al. 12. Soilless culture. Em: **Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops**. FAO, Roma: [s.n.]. p. 303–354.

SCHMAUTZ, Z. et al. Nitrogen transformations across compartments of an aquaponic system. **Aquacultural Engineering**, v. 92, p. 102145, fev. 2021.

SHETE, A. P. et al. **Optimization of hydraulic loading rate in aquaponic system with Common carp (*Cyprinus carpio*) and Mint (*Mentha arvensis*)**. **Aquacultural Engineering**, 2016.

SHIAU, S.-Y.; HSIEH, J.-F. Quantifying the dietary potassium requirement of juvenile hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*). **British Journal of Nutrition**, v. 85, n. 2, p. 213–218, 2001.

SILVA, F. C. DA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. e ampl. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SILVA, M. G. DA et al. HYDROPONIC CULTIVATION OF CORIANDER USING FRESH AND BRACKISH WATERS WITH DIFFERENT TEMPERATURES OF THE NUTRIENT SOLUTION. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 6, p. 674–683, dez. 2020.

SIRINGI, J. O.; TUROOP, L.; NJONGE, F. Growth and biochemical response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to spirulina (*Arthrospira platensis*) enhanced aquaponic system. **Aquaculture**, v. 544, p. 737134, nov. 2021.

SOMERVILLE, C. et al. Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. **FAO Fisheries and aquaculture technical paper**, p. 1–589, 2014.

SON, Y.-J. et al. Production of low potassium kale with increased glucosinolate content from vertical farming as a novel dietary option for renal dysfunction patients. **Food Chemistry**, v. 339, p. 128092, mar. 2021.

STATHOPOULOU, P. et al. Iron and Potassium Fertilization Improve Rocket Growth without Affecting Tilapia Growth and Histomorphology Characteristics in Aquaponics. **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5681, 19 jun. 2021.

SUTANI, J. et al. Avaliação do desempenho produtivo de cultivares de alfaces em sistemas aquapônico e hidropônico. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 38, n. 3, p. 26909, 15 set. 2021.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal Diversidade vegetal**. 6. ed. [s.l.: s.n.]. v. 6 ed.

THOMAS, R. M. et al. Utilization of Inland saline underground water for bio-integration of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and spinach (*Spinacia oleracea*). **Agricultural Water Management**, 2019.

TSUKAGOSHI, S. et al. A quantitative management of potassium supply for hydroponic production of low-potassium cherry-type tomato fruit for chronic kidney disease patients. **Horticulturae**, v. 7, n. 4, 2021.

TYSON, R. V.; TREADWEL, D. D.; SIMONNE, E. H. Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. **HortTechnology**, v. 21, n. 1, p. 6–13, 2011.

TYSON, R. V.; TREADWELL, D. D.; SIMONNE, E. H. Opportunities and Challenges to Sustainability in Aquaponic Systems. **HortTechnology**, v. 21, n. 1, p. 6–13, fev. 2011.

VALDEZ-AGUILAR, L. A.; REED, D. W. Comparison of Growth and Alkalinity-induced Responses in Two Cultivars of Hibiscus (*Hibiscus rosa-sinensis* L.). **HortScience**, v. 41, n. 7, p. 1704–1708, dez. 2006.

WADA, T. Theory and Technology to Control the Nutrient Solution of Hydroponics. **Plant Factory Using Artificial Light: Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation**, p. 5–14, 2019.

WINTROBE, M. M. Variations in the size and haemoglobin content of erythrocytes in the blood of various vertebrates. **Folia Haematologica**, v. 51, p. 32–49, 1934.

WONGKIEW, S. et al. Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. **Aquacultural Engineering**, v. 76, p. 9–19, jan. 2017.

YEP, B.; ZHENG, Y. Aquaponic trends and challenges – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 1586–1599, ago. 2019.

YURI, J. E. et al. Comportamento de cultivares de alface americana em Santo Antônio do Amparo. **Horticultura Brasileira**, v. 2, n. 3, p. 870–874, 2005.

ZAFAR, N.; KHAN, M. A. Growth, body composition, mineralisation and Na⁺/K⁺-ATPase activity of fingerling *Heteropneustes fossilis* (Bloch) fed diets with different levels of potassium. **Archives of Animal Nutrition**, v. 73, n. 6, p. 505–516, 2 nov. 2019.

ŻRÓBEK-SOKOLNIK, A. Temperature Stress and Responses of Plants. Em: **Environmental Adaptations and Stress Tolerance of Plants in the Era of Climate Change**. New York, NY: Springer New York, 2012. p. 113–134.