



**Cultivo Inovador e Sustentável de *Nasturtium officinale* L. por
Hidroponia com Reaproveitamento de Águas Residuais da Produção de
*Squalius alburnoides***

Gabriela Campos

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG

Orientado por

Doutora Maria Inês Moreira Figueiredo Dias

Doutor Amílcar António Teiga Teixeira

Doutora Valéria Cristina Palmeira Zago

Bragança

2024

Aos meus pais, meus maiores
incentivadores, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão à minha mãe, que sempre se esforçou para proporcionar-me a melhor educação possível e por incentivar-me a perseguir meus maiores sonhos. Também agradeço ao meu pai; seus ensinamentos foram essenciais para moldar-me como uma filha dedicada aos estudos.

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais por me proporcionar uma educação de qualidade e a oportunidade de realizar um intercâmbio enriquecedor no Instituto Politécnico de Bragança.

Agradeço aos meus orientadores, Maria Inês Moreira Figueiredo Dias, Amílcar António Teiga Teixeira e Valéria Cristina Palmeira Zago, pela orientação dedicada, pelos esforços em me ajudar e pelo acompanhamento cuidadoso ao longo deste percurso.

Um agradecimento especial à Beatriz Helena Paschoalinotto por guiar-me nas atividades do dia a dia e por sua paciência e atenção ao me ensinar durante este trabalho.

Também expresso minha gratidão ao Fernando Jorge Veloso Miranda, à Vanessa Branco Paula e ao Luís Avelino Guimarães Dias pelo apoio e ensinamentos valiosos nos laboratórios do IPB.

RESUMO

A expansão demográfica desafia a produção de alimentos. Tecnologias como a aquaponia desacoplada, integrando aquacultura e hidroponia, surgem como alternativas sustentáveis. Nesse sistema, peixes e plantas são criados separadamente, transformando resíduos em nutrientes e destacando-se pela eficiência hídrica em comparação com métodos convencionais. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar, através de um sistema de aquaponia desacoplado, o desenvolvimento de agriões d'água (*Nasturtium officinale* L.) cultivados com águas residuais provenientes de tanques de criação de peixes bordalo (*Squalius alburnoides*) de diferentes densidades. Para isso, avaliou-se o impacto da densidade psícológica na qualidade físico-química da água residual, incluindo pH, condutividade, oxigenação, teor de nitritos, nitratos e fosfatos, além da carga microbiológica ao longo do período experimental. Paralelamente, as águas residuais foram usadas como água para rega num sistema de hidroponia de agrião e, avaliou-se as condições de crescimento das plantas (tamanho da parte aérea e raiz, e número de folhas). Por último, foi realizado um estudo comparativo entre o agrião comercial e o agrião cultivado em hidroponia, relativamente ao seu perfil nutricional (cinzas, gordura, proteínas e hidratos de carbono) e valor energético através de métodos AOAC (Association of Official Analytical Chemists).

Os resultados revelaram que, embora a qualidade da água da aquacultura tenha se mantido estável, a mortalidade dos peixes aumentou em tanques com maior densidade, demandando maior oxigenação. No entanto, os peixes mantiveram boa condição física. No sistema de hidroponia, as plantas apresentaram um crescimento inicial lento devido à escassez de nutrientes, mas posteriormente demonstraram uma tendência positiva, estagnando após 10 semanas de ensaios. Os resultados ressaltam o potencial da aquaponia para a produção de alimentos e a importância da monitorização dos parâmetros ambientais e da melhoria das práticas de cultivo para promover a sustentabilidade alimentar. No entanto, são necessários mais estudos para otimizar os sistemas de aquaponia desacoplados e maximizar seu potencial.

Palavras-chaves: Agricultura sustentável; Aquaponia desacoplada; Produção de alimentos; Sustentabilidade ambiental; Reutilização de água.

ABSTRACT

The demographic expansion challenges food production. Technologies such as decoupled aquaponics, integrating aquaculture and hydroponics, emerge as sustainable alternatives. In this system, fish and plants are raised separately, transforming waste into nutrients and standing out for water efficiency compared to conventional methods. In this context, the aim of this study was to evaluate, through a decoupled aquaponics system, the development of watercress (*Nasturtium officinale* L.) cultivated with wastewater from bordalo fish (*Squalius alburnoides*) breeding tanks of different densities. For this purpose, the impact of fish density on the physicochemical quality of wastewater was evaluated, including pH, conductivity, oxygenation, nitrite, nitrate, and phosphate levels, as well as microbial load throughout the experimental period. Additionally, the wastewater was used as irrigation water in a watercress hydroponic system, and the plant growth conditions (aboveground and root size, and number of leaves) were evaluated. Finally, a comparative study was conducted between commercial watercress and watercress grown hydroponically, regarding their nutritional profile (ash, fat, protein, and carbohydrates) and energy value through AOAC methods (Association of Official Analytical Chemists).

The results revealed that, although the water quality in aquaculture remained stable, fish mortality increased in tanks with higher density, requiring more oxygenation. However, the fish maintained good physical condition. In the hydroponic system, plants showed slow initial growth due to nutrient scarcity, but later demonstrated a positive trend, plateauing after 10 weeks of trials. The findings highlight the potential of aquaponics for food production and the importance of monitoring environmental parameters and improving cultivation practices to promote food sustainability. However, further studies are needed to optimize decoupled aquaponics systems and maximize their potential.

Keywords: Sustainable agriculture; Decoupled aquaponics; Food production; Environmental sustainability; Water reuse.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Unidade de Aquacultura e Unidade de Hidroponia.	3
Figura 2. <i>Nasturtium officinale</i> L. Aspectos gerais da flor (A); detalhe do cálice (B); Androceu e Gineceu (C) (Scavone & Panizza, 1973).	12
Figura 3. Peixe bordalo (<i>Squalius alburnoides</i>) (Alexandrino et al., 2005).	17
Figura 4. Esquema representativo do processo de filtração da água do sistema <i>Aquaneering</i> usado no estudo (adaptado de <i>Aquaneering</i> , 2010).	20
Figura 5. Pesca elétrica: amostragem da fauna piscícola, no rio Sabor (outono 2023) (A); obtenção de dados biométricos (outono 2023) (B).	22
Figura 6. Desenho experimental de um fator (A); implementação real do sistema de aquacultura (B).	23
Figura 7. Diluição das amostras em caldo de peptona.	26
Figura 8. Agriões em fase de germinação com o crescimento das duas folhas embrionárias.	29
Figura 9. Perfil de hidroponia com quatro perfurações tamponado.	30
Figura 10. Desenho experimental de um fator (A); implementação real do sistema de hidroponia, de acordo com o desenho experimental do sistema de aquaponia (B).	31
Figura 11. Tendência dos parâmetros físico-químicos nos tanques de crescimento durante 10 semanas usando os valores globais das médias dos parâmetros*/semana/40 tanques. *Parâmetros: temperatura, pH, condutividade, oxigênio dissolvido e percentagem de saturação. * letras diferentes nas linhas significam diferenças estatísticas significativas com $p > 0,05$	38
Figura 12. Relação Comprimento x Peso no: i) Geral início (A , $b = 2,93$) e fim (B , $b = 3,01$); ii) 2ª fila início (C , $b = 2,92$) e fim (D , $b = 3,08$); iii) 3ª fila início (E , $b = 2,90$) e fim (F , $b = 3,16$); iv) 4ª fila início (G , $b = 2,88$) e fim (H , $b = 3$); v) 5ª fila início (I , $b = 3,30$) e fim (J , $b = 2,87$). ● – W (g) e — – W (g) estimado.	42
Figura 13. Concentração de nitratos (mg/L) nas águas residuais de produção de peixes, em filas com diferentes densidades, ao longo do período experimental de 10 semanas.	44
Figura 14. Concentração de nitritos (mg/L) nas águas residuais de produção de peixes, em filas com diferentes densidades, ao longo do período experimental de 10 semanas.	45

Figura 15. Concentração de fosfatos (mg/L) nas águas residuais de produção de peixes, em filas com diferentes densidades, ao longo do período experimental de 10 semanas.....	46
Figura 16. Mortalidade observada nos perfis de hidroponia correspondentes às plantas de agrião transplantadas com 45 dias após germinação.	49
Figura 17. Monitorização do crescimento das plantas em hidroponia durante 10 semanas, relativamente ao tamanho da parte aérea (A); nº de folhas (B); tamanho da raiz (C).....	50
Figura 18. Agrião obtido após 10 semanas de crescimento em sistema de hidroponia.	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Concentração de nutrientes recomendados para a produção de agrião.	14
Tabela 2. Valores médios dos parâmetros físico-químicos (temperatura, pH, condutividade, concentração de oxigênio e percentagem de saturação) monitorizados ao longo do período experimental para os tanques com 0, 2, 4, 8 e 16 peixes (Média ± DP [Mín-Máx]).....	36
Tabela 3. Fatores K de condição de Fulton no início e fim do período experimental.....	43
Tabela 4. Quantificação (NMP/100 mL) de coliformes totais e <i>E. coli</i> na água de torneira e nas águas residuais do sistema de produção de peixes no início e fim do período experimental.	47
Tabela 5. Quantificação (UFC/100 mL) de microrganismos cultiváveis a 22 °C e 37 °C na água de torneira e nas águas residuais do sistema de produção de peixes no início e fim do período experimental.	48
Tabela 6. Teor de humidade, perfil nutricional e valor energético do agrião comercial e produzido em hidroponia com diferentes densidades de peixes (Média ± DP).	52

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. OBJETIVO GERAL	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. AQUAPONIA.....	3
3.1.1. <i>Aquacultura</i>	4
3.1.2. <i>Hidroponia</i>	6
3.1.3. <i>Benefícios da aquaponia</i>	7
3.1.4. <i>Sistemas aquapónicos desacoplados</i>	10
3.2. BRASSICAS	11
3.2.1. <i>Agrião</i>	12
3.2.2. <i>Produção de agrião em sistemas agrícolas não convencionais</i>	13
3.3. POTENCIAL DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS DO NE DE PORTUGAL	15
3.3.1. <i>Aproveitamento do potencial dos sistemas lênticos</i>	15
3.3.2. <i>Bordalo (Squalius alburnoides)</i>	17
4. METODOLOGIA.....	19
4.1. REAGENTES E AMOSTRAS	19
4.2. SISTEMA DE AQUACULTURA	19
4.2.1. <i>Captura da espécie piscícola</i>	21
4.2.2. <i>Desenho experimental</i>	22
4.2.3. <i>Avaliação do crescimento dos peixes</i>	23
4.2.4. <i>Análises químicas e microbiológicas das águas residuais</i>	24
4.2.4.1. Análises químicas	24
i) Teor de nitratos	24
ii) Teor de nitritos	25
iii) Teor de fosfatos.....	25
4.2.4.2. Análises microbiológicas.....	25
i) Contagem de microrganismos cultiváveis	25
ii) Análise de <i>Clostridium perfringens</i> pelo método da filtração por membrana	26
iii) Análise de <i>Enterococos</i> intestinais pelo método de filtração por membrana	27
v) Análise de Coliformes totais	28
vi) Análise de coliformes termotolerantes (fecais) e <i>E. coli</i>	28
4.3. SISTEMA DE HIDROPONIA.....	28
4.3.1. <i>Germinação do agrião</i>	28
4.3.2. <i>Desenho experimental do sistema de hidroponia</i>	29
4.3.3. <i>Perfil nutricional do agrião comercial e crescido em sistema de hidroponia</i>	32
4.3.3.1. Humidade	32

4.3.3.2.	Cinzas	32
4.3.3.3.	Gorduras totais.....	32
4.3.3.4.	Proteína bruta.....	33
4.3.3.5.	Hidratos de carbono.....	33
4.3.3.6.	Valor energético	34
4.4.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1.	MONITORIZAÇÃO DO SISTEMA DE AQUACULTURA	35
5.1.1.	<i>Análise dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água da produção de peixes.....</i>	35
5.1.2.	<i>Avaliação do desempenho do crescimento e condição física dos peixes</i>	39
5.1.3.	<i>Análise dos parâmetros químicos e microbiológicos das águas da produção de peixes... ..</i>	43
5.1.3.1.	Nitratos	43
5.1.3.2.	Nitritos	44
5.1.3.3.	Fosfatos.....	45
5.1.4.	<i>Análises microbiológicas das águas residuais dos peixes</i>	46
5.2.	MONITORIZAÇÃO DO SISTEMA DE HIDROPONIA	48
5.2.1.	<i>Avaliação do crescimento das plantas</i>	48
5.2.2.	<i>Caracterização nutricional do agrião crescido em hidroponia e comercial ...</i>	51
6.	CONCLUSÃO.....	55
7.	PERSPETIVAS FUTURAS.....	57
8.	REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional contínuo representa um desafio significativo para a humanidade, uma vez que exige um aumento constante na produção de alimentos para atender às necessidades populacionais, além de um maior consumo de água. Estudos apontam que, no período entre 2005 e 2050, a procura global por produtos agrícolas poderá aumentar exponencialmente, chegando a um acréscimo de mais de 100% (Tilman et al., 2011). No entanto, a agricultura convencional, que historicamente tenta responder a essa crescente demanda, tem como consequência impactos negativos para o meio ambiente e para saúde humana a médio-longo prazo.

O uso excessivo de pesticidas na agricultura convencional, por exemplo, contamina o solo e a água, provocando danos significativos à biodiversidade. Além disso, a prática de monoculturas esgota os nutrientes do solo, levando à dependência de fertilizantes químicos e provoca um aumento dos riscos de erosão e perda de biodiversidade. A desflorestação, frequentemente associada à agricultura convencional, contribui ainda mais para a degradação dos solos e para a perda de habitats naturais, além de ser um fator que aumenta as emissões de gases de efeito estufa (Cozim-Melges et al., 2024).

Perante este cenário, a pesquisa e a implementação de tecnologias ambientais que visam aumentar a produtividade alimentar por unidade de área sem agravar os problemas ambientais têm-se vindo a destacar na comunidade académica (Tilman et al., 2002).

Neste contexto, este trabalho concentrou-se no estudo da aquaponia desacoplada, uma abordagem inovadora que oferece soluções promissoras para a produção de alimentos de forma sustentável. Para tal, implementou-se um sistema de aquacultura utilizando o peixe bordalo (*Squalius alburnoides*) e um sistema de hidroponia utilizando como matriz o agrião d'água (*Nasturtium officinale* L.) cultivado com águas residuais de um sistema de aquacultura fechado (Aquaneering Systems ©).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar, através de um sistema de aquaponia desacoplado, o impacto no desenvolvimento de agriões d'água (*Nasturtium officinale L.*) cultivados com águas residuais oriundas de tanques com diferentes densidades de biomassa total do peixe bordalo (*Squalius alburnoides*).

2.2. Objetivos específicos

- Analisar a condição do crescimento e a condição corporal dos peixes criados em cativeiro;
- Avaliar a influência de diferentes densidades de peixe na composição físico-química das águas residuais em termos de temperatura, pH, condutividade, saturação, oxigénio dissolvido, nitratos, nitritos e fosfatos;
- Avaliar a influência de diferentes densidades de peixes em termos microbiológicos, através de contagem de colónias a 22 °C e a 37 °C, coliformes totais e *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* e enterococos intestinais;
- Avaliar nutricionalmente os agriões d'água por métodos AOAC, nomeadamente, em termos de humidade, cinzas, gordura total, proteínas, hidratos de carbono e valor energético, por comparação com o agrião comercial;
- Analisar, após a colheita, as condições fitossanitárias dos agriões d'água através da medição da parte aérea e radicular e número de folhas por planta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aquaponia

A aquaponia representa a integração entre a aquacultura (produção de peixes) e a hidroponia (produção de plantas) (**Figura 1**). Na aquaponia convencional, a criação de peixes e o cultivo de plantas hidropônicas são realizados de forma integrada, dispensando a necessidade de solo (Diver, 2006; Monsees et al., 2019). Este sistema integrado promove uma simbiose eficiente entre seus componentes. Os nutrientes, com destaque para o nitrogênio, resultantes do metabolismo dos peixes, juntamente com os resíduos e o excesso de alimento que não é consumido, são reutilizados pelas plantas. Em contrapartida, as plantas desempenham um papel fundamental ao filtrar e purificar a água, que posteriormente retorna ao ambiente dos peixes, mantendo assim a qualidade do sistema.

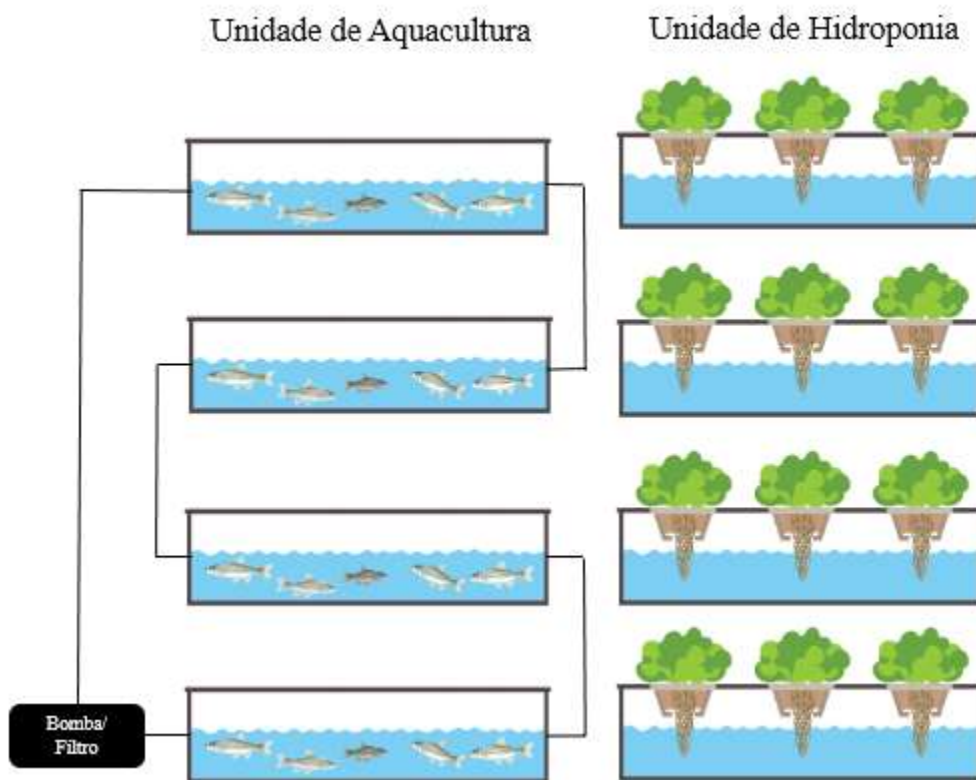


Figura 1. Unidade de Aquacultura e Unidade de Hidroponia.

Por outro lado, a aquaponia desacoplada opera sem a interligação entre as unidades de criação de peixes e cultivo hidropônico. Nesse cenário, a água residual da unidade de aquacultura é

direcionada exclusivamente para a unidade hidropónica, sem retorno à unidade de aquacultura original (Monsees et al., 2019). Portanto, é crucial destacar e analisar as vantagens tanto da aquacultura quanto da hidroponia para compreender plenamente os desafios e benefícios que a aquaponia oferece em termos de ecologia e impacto socioeconómico.

3.1.1. Aquacultura

A aquacultura, muitas vezes chamada de "agricultura aquática", é uma prática fundamental na sociedade contemporânea, desempenhando um papel cada vez mais crucial na produção global de alimentos (Chen & Wong, 2016). A prática consiste na criação e cultivo de organismos aquáticos, como peixes, crustáceos, moluscos e algas, em ambientes controlados, como tanques, viveiros e sistemas circulantes (Leal et al., 2018).

No âmbito da aquacultura, existem três regimes de produção distintos, descritos como: extensivo, semi-intensivo e intensivo. De acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente [APA] (2023), no regime de produção extensivo, as condições naturais predominam, com a espécie de interesse sendo capturada na natureza ou proveniente de unidades de reprodução, e a alimentação é exclusivamente natural. Já no regime de produção semi-intensivo, a reprodução artificial é utilizada para obter ovos e juvenis, com um acompanhamento frequente durante a fase de crescimento, com o intuito de otimizar o desenvolvimento por meio de amostragens e calibragens, através da alimentação natural e suplementação artificial. Por fim, no regime de produção intensivo, todos os parâmetros de produção são minuciosamente monitorados, como o controlo da reprodução e crescimento, com a espécie sendo alimentada exclusivamente com alimentos artificiais.

Em 2020, a Food and Agriculture Organization [FAO] (2022), apontou que devido ao aumento da produção aquícola, a produção de animais aquáticos superou significativamente a média da década de 1990, registando um aumento de mais de 60%. Desta forma, a produção de animais aquáticos ultrapassou consideravelmente o crescimento da população mundial. No entanto, a União Europeia (UE) não tem acompanhado essa tendência global de crescimento na aquacultura. Mais de 70% dos produtos de pescado são importados para suprir a crescente demanda dos consumidores. A produção aquícola na UE representa menos

de 2% da produção mundial, permanecendo altamente concentrada em termos de Estados-membros e espécies criadas, o que sugere um potencial considerável de diversificação no setor (APA, 2023).

Isso pode ser atribuído, em parte, ao facto de que alguns consumidores ainda não veem a aquacultura como uma substituição viável ou complemento para a prática da pesca. Em Portugal, no ano de 2020, por exemplo, a produção aquícola nacional representava apenas 9,8% do total de descargas de pescado fresco. Esses números indicam que, até aquele momento, a aquacultura ainda não era amplamente reconhecida pelos consumidores como uma alternativa ao pescado obtido através da pesca convencional. Apesar desses obstáculos, a produção aquícola está gradualmente a ganhar destaque em Portugal. No mesmo ano referido, a aquacultura registou um aumento de 18,6% em relação a 2019, totalizando 16.999 toneladas de produção, o que gerou uma receita de 99,9 milhões de euros em vendas, embora esse valor fosse 15,6% inferior ao ano anterior (APA, 2023).

Portugal tem uma forte tradição de consumo de peixe, está localizado numa zona de transição de ecossistemas mais quentes, e apresenta uma elevada diversidade de espécies de pescado, embora com baixa incidência. A região costeira e ilhas atlânticas têm condições geomorfológicas que tornam o mar menos propício para a instalação de unidades de aquacultura oceânica durante os meses de inverno, tornando necessário o uso de soluções tecnológicas adaptadas ao ambiente. As regiões costeiras, especialmente a região costeira ocidental do continente e o norte das ilhas atlânticas, é muito exposta e possui poucos espaços naturais que possam proteger as estruturas aquícolas em mar aberto, exigindo a utilização de tecnologias inovadoras (Direção Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos [DGRM], 2022).

Por outro lado, a aquacultura e a produção de plantas em sistemas de água doce pode também constituir um futuro nicho de oportunidade em termos de empreendedorismo, através da utilização de soluções baseadas na natureza nos muitos reservatórios de água doce (i.e., albufeiras de pequenas e grandes barragens) disponíveis. Por exemplo, a construção de bio-ilhas para produção de plantas edíveis e outras e a exploração de espécies piscícolas podem ter enquadramento no desenvolvimento sustentável de regiões e contribuir para as estratégias

de mitigação de impactos ambientais, como a eutrofização de águas pela remoção/redução de nutrientes e melhoria da qualidade da água.

3.1.2. *Hidroponia*

A hidroponia envolve o crescimento de plantas em meio líquido, sem a necessidade de fixá-las ao solo, e pode ser conduzida com ou sem a adição de um substrato nutritivo. Os nutrientes são fornecidos as plantas num fluxo contínuo ou intermitente, como acontece no sistema de filme estático, no qual a solução nutritiva é continuamente oxigenada (Carrijo & Makishima, 2000). A origem do termo "hidroponia" remonta às palavras gregas "*hydro*" (água) e "*ponos*" (trabalho), que juntas significam "trabalho da água". Embora essa técnica tenha raízes antigas, evidenciadas nos jardins suspensos da Babilónia e nos jardins flutuantes dos astecas no México, foi somente a partir dos anos 30 que ela começou a ganhar popularidade. No entanto, foi na década de 80 que a hidroponia se estabeleceu como uma prática comercial para a produção de hortaliças (Carrijo & Makishima, 2000).

A hidroponia desempenha um papel crucial na pesquisa da composição das plantas, na sua análise de padrões de crescimento, necessidades nutricionais e resposta às variações climáticas (Carrijo & Makishima, 2000). Além disso, esta técnica é amplamente adotada para fins comerciais, uma vez que proporciona um ambiente altamente propício para o crescimento sem as limitações das raízes e reduz significativamente o consumo de água, chegando a uma economia de aproximadamente 80% em comparação com os métodos de cultivo tradicionais (Orsini et al., 2010; Levy & Barreto, 2011; Mhadhbi, 2012).

Na hidroponia, atividades culturais tradicionais, como a rotação de culturas, correção do solo, manejo de plantas invasoras, desinfecção e preparação do solo, tornam-se desnecessárias. Isso confere à técnica uma versatilidade notável e aplicável mesmo em regiões com escassez de terra disponível para o cultivo (Carrijo & Makishima, 2000). No entanto, para alcançar o sucesso no cultivo hidropónico, os investimentos substanciais na construção da infraestrutura e na aquisição de equipamentos são essenciais. Além disso, o conhecimento sobre as singularidades das espécies em relação à nutrição, fatores climáticos e fitossanitários são necessários, bem como o controlo da condutividade da água, uma vez que este parâmetro

está diretamente relacionado à quantidade total de sais presentes na solução nutritiva (Carrijo & Makishima, 2000).

Assim, apesar das vantagens, o cultivo hidropónico apresenta algumas desvantagens, como o custo elevado para construção da estrutura, dependência de energia elétrica e a demanda de mão de obra especializada (Hussain et al., 2014). Uma vez estabelecida as limitações dos fatores climáticos e as exigências nutricionais de uma espécie, torna-se praticável o cultivo da mesma através de um sistema hidropónico (Carrijo & Makishima, 2000).

Para isso, os dimensionamentos de sistemas hidropónicos podem ser variados, entretanto, o sistema laminar de nutrientes (NFT) é o dimensionamento mais popularmente aplicado e conhecido, devido a sua eficácia. Este sistema envolve uma solução nutritiva que é bombeada a partir de um reservatório através de calhas, canais ou tubos, passando pelos sistemas radiculares das plantas antes de retornar, por ação da gravidade, ao reservatório central (Carrijo & Makishima, 2000). Assim, essa abordagem não apenas contribui para a sustentabilidade dos sistemas de produção, através da redução do consumo de água e otimização do uso de nutrientes e pesticidas (Sanchez, 2007), mas também é altamente económica, sendo particularmente adequada para o cultivo de diversas hortaliças, com destaque para as hortaliças folhosas (Cometti, 2003).

Portanto, estimular estratégias de desenvolvimento da aquacultura e da hidroponia que incorporem diretrizes voltadas para a sustentabilidade ambiental, económica e social é de extrema importância tanto para Portugal quanto para toda a Europa. Nesse cenário, a aquaponia emerge como uma técnica promissora, unindo a aquacultura com a hidroponia e proporcionando uma ampla variedade de benefícios, conforme detalhado a seguir.

3.1.3. Benefícios da aquaponia

O crescimento populacional mundial, aliado ao aumento da demanda por recursos hídricos, tem colocado uma pressão substancial nas indústrias relacionadas à produção de alimentos. Nesse cenário, a sustentabilidade deixa de ser meramente uma causa política ou moral, e transforma-se numa necessidade premente. Com as vantagens descritas anteriormente, das práticas de aquacultura e hidroponia aplicadas individualmente, a aquaponia surge como uma

alternativa viável para a produção de alimentos, uma vez que esta técnica promove o cultivo integrado, onde uma segunda cultura aproveita os subprodutos de uma primeira cultura em seu benefício e em benefício do meio (Rakocy et al., 2016).

Na década de 1990, a eficiência hídrica do sistema de aquaponia foi documentada por McMurtry (1990). O sistema de aquaponia proposto na época utilizava somente cerca de 1% da quantidade de água necessária em comparação a um sistema de cultivo em lago semelhante. Em 2005, Lennard (2005) relatou que a economia de água associada a um sistema de teste aquapônico otimizado em laboratório foi de 90% ou mais quando comparado a um sistema de controlo de aquacultura de recirculação (RAS), onde a água foi trocada para controlar o acúmulo de nitrato, enquanto as plantas na aquaponia realizaram o mesmo requisito. Por conseguinte, o autor demonstrou que a aquaponia proporciona um benefício substancial em termos de poupança de água em comparação com a aquicultura RAS padrão.

De acordo com Carneiro et al. (2015), a aquaponia requer muito menos água do que os métodos tradicionais de agricultura e aquicultura. Uma vez em funcionamento, o sistema de aquaponia acoplado pode operar indefinidamente sem troca de água, apenas necessitando da reposição da água perdida devido à evaporação e colheita. Neste sentido, a aquaponia torna-se mais eficiente em relação ao uso de água e produção de efluentes do que a hidroponia convencional, que requer uma renovação constante da solução de nutrientes.

Contudo, ainda que haja evidências concretas sobre a economia de água no sistema de aquaponia, é importante salientar que neste sistema há perdas de pequenas quantidades de água devido a evapotranspiração das plantas. Isso pode ser explicado pelo fato de que, se a dinâmica de nutrientes entre a produção de peixes e o cultivo das plantas for mantida em equilíbrio, a única perda de água ocorrerá devido à evapotranspiração das plantas. Além disso, uma vez que a água é compartilhada integralmente entre os sistemas de peixes e plantas, as quantidades diárias de água de reposição representarão, essencialmente, toda a água perdida no processo de cultivo (Lennard, 2017).

Por outro lado, projetos de aquaponia desacoplada apresentam um desafio maior, uma vez que os dois componentes não estão completamente interligados, resultando em um uso diário de água pelo componente de peixes que não se alinha perfeitamente com o uso diário de água

pelo componente de plantas (Delaide et al., 2016; Goddek & Keesman, 2018). Portanto, a utilização da água e as taxas de substituição para sistemas aquapônicos não estão completamente resolvidas e provavelmente nunca o serão devido às grandes diferenças nas abordagens de concepção do sistema (Lennard & Goddek, 2019). O autor Rakocy (1993) referiu que a taxa diária de reposição de água para um tipo de sistema aquapônico representava aproximadamente 1,5% do volume total do sistema, enquanto os autores Love, Fry, et al. (2015) e Love, Uhl, et al. (2015) indicaram uma taxa de perda de água de aproximadamente 1% do volume do sistema por dia em seu sistema de pesquisa de aquaponia.

Outro benefício da aquaponia está relacionada à qualidade do tratamento das águas. De acordo com Boxman et al. (2018), a integração da produção vegetal com a aquacultura pode aprimorar significativamente o tratamento das águas. Isso acontece porque os nutrientes, em particular o nitrogênio, resultado do metabolismo dos peixes, juntamente com outros detritos orgânicos, passam a ser aproveitados pelas plantas cultivadas em sistemas de aquaponia como fertilizantes. Como resultado, a aquaponia reduz a eutrofização dos corpos receptores, uma vez que não há descarga de água proveniente da criação de peixes em corpos hídricos.

Os autores Monsees et al. (2019) também relataram resultados favoráveis à qualidade do tratamento das águas. Através de sistemas aquapônicos desacoplados, cultivaram alface (*Lactuca sativa* var. Salanova) e observaram que o uso das águas residuais dos peixes economizou 62,8% de fertilizante mineral e substituiu totalmente a água necessária para a solução nutritiva em comparação ao controle. Além disso, demonstraram que a diminuição da necessidade de fertilizantes em aquaponia desacoplada tem o potencial de reduzir as emissões de gases de efeito estufa de um local de produção anual de alface por hectare em 72%, devido à economia de energia no processo de fabricação de fertilizantes.

Braz Filho (2000) evidenciou mais benefícios da aquaponia como o controle da qualidade da água, a redução na proliferação de algas e fungos que podem conferir sabor desagradável ao peixe, a manutenção das condições ambientais propícias para a criação por todo o ano, a possibilidade de obtenção de várias colheitas durante o ano e a possibilidade de manejo intensivo para a obtenção de produtos mais homogêneos.

A aquaponia também apresenta vantagens nos domínios económico e social. Em muitos países, a aquaponia está a ganhar uma crescente adoção como uma alternativa para a produção autossustentável de alimentos de maneira saudável, em consonância com princípios de sustentabilidade (Carneiro et al., 2015). O Laboratório de Pesquisa em Aquaponia da Embrapa Tabuleiros Costeiros (LAPAq), sediado na cidade brasileira Aracajú, está atualmente envolvido em dois projetos-chave: um voltado para o desenvolvimento de sistemas modulares de aquaponia a nível familiar, permitindo a produção simultânea de diversas variedades de hortaliças; e outro focado no estabelecimento de um sistema de aquaponia a nível comercial, destinado ao cultivo de hortaliças folhosas, em colaboração com os produtores locais de hidroponia. Além disso, o LAPAq também está empenhado numa linha de trabalho voltada para a educação. Nesse contexto, professores do ensino fundamental e médio estão sendo capacitados para incorporar o sistema de aquaponia como uma ferramenta de apoio ao ensino em disciplinas como biologia, química, matemática, física, meio ambiente e sustentabilidade (Carneiro et al., 2015).

3.1.4. Sistemas aquapónicos desacoplados

Os sistemas aquapónicos podem ser implementados de duas maneiras distintas: acoplados ou desacoplados. Neste primeiro, também conhecido como aquaponia convencional, a água flui da unidade dos peixes (aquacultura) para a unidade das plantas (hidroponia) e vice-versa (J. Rakocy et al., 2006; Tyson et al., 2011). Já no sistema aquapónico desacoplado, os peixes são criados numa unidade pesqueira individual, enquanto as plantas são cultivadas num sistema hidropónico separado sem a recirculação da água (Monsees et al., 2019). Para garantir o bom funcionamento em ambos os sistemas, é essencial o controlo dos parâmetros da água, como pH, temperatura e concentrações de nutrientes, dentro dos limites adequados tanto para os peixes quanto para as plantas, uma vez que desvios nesses parâmetros podem prejudicar a produtividade do sistema, tornando-o menos eficiente (Monsees et al., 2017).

Um dos parâmetros de maior atenção dentro de um sistema aquapónico convencional é o pH, pois neste sistema há três organismos muito distintos (peixes, plantas e bactérias) (Carneiro et al., 2015). A maioria das espécies de peixes requer um pH da água próximo a 7,4, enquanto as bactérias, responsáveis pela conversão de amónia em nitrato, requerem um pH em torno de 7,5, e finalmente, as plantas hidropónicas requerem um pH em torno de 5,5 (Carneiro et

al., 2015; Lennard, 2017). Desta maneira, o sistema aquapónico desacoplado torna-se vantajoso uma vez que projetos dissociados permitem uma maior flexibilidade para se otimizar o pH da água nos componentes do peixe e das plantas separadamente (Lennard & Goddek, 2019). Outro proveito dos sistemas desacoplados dá-se pela possibilidade de realizar ajustes precisos na concentração de nutrientes, de forma a adaptar às necessidades específicas do sistema. Essa adaptação envolve a aplicação intensiva de suplementos nutricionais na água de cultivo, especialmente após a fase de criação dos peixes, com o objetivo de promover o crescimento das plantas (Lennard & Goddek, 2019).

Embora haja poucas publicações comparando diretamente a aquaponia desacoplada com a hidroponia convencional, alguns estudos são promissores. Delaide et al. (2016) relataram um aumento de 39% no crescimento de alface em sistemas aquapónicos desacoplados em comparação com sistemas hidropónicos únicos, sugerindo que fatores como matéria orgânica dissolvida ou rizobactérias promotoras de crescimento podem contribuir para esse aumento. Além disso, Suhl et al. (2016) observaram uma produção de tomate comparável em sistemas aquapónicos desacoplados e hidropónicos, indicando que a produtividade de tomates através da aquaponia desacoplada pode atingir níveis semelhantes aos da hidroponia única quando os nutrientes são adequadamente controlados. Por fim, Monsees et al. (2019), conseguiram produzir alface em sistemas aquapónicos desacoplados de forma tão eficaz quanto a hidroponia convencional. Assim, os sistemas aquapónicos desacoplados têm o potencial de se tornar um dos sistemas de produção sustentável mais eficazes para a produção combinada de proteínas animais e culturas vegetais.

3.2. Brassicas

Das mais de 3.700 espécies pertencentes à vasta família *Brassicaceae*, que compreende um total de 338 géneros de plantas conhecidos, as Brassicas destacam-se. Estas plantas tiveram um papel importante na história da agricultura, sendo uma das primeiras culturas historicamente registadas. A família *Brassicaceae* abriga um número significativo de espécies e é notável pelo seu sabor característico, que é atribuído aos seus compostos secundários ricos em enxofre e os glucosinolatos (GLS). Essas plantas são consumidas amplamente em todo o mundo e incluem brócolos, couve-flor, repolho, acelga, rúcula, nabos, couve de Bruxelas, agrião e outros. São consideradas uma fonte estável de alimento e são

valorizadas pela sua riqueza em aminoácidos, minerais, hidratos de carbono, vitaminas e fitoquímicos (Melo et al., 2017; Shankar et al., 2019). As plantas pertencentes a família *Brassicaceae* possuem fácil adaptação ambiental, o que favorece o cultivo em diferentes regiões climáticas. Além do atrativo perfil nutricional, o perfil fitoquímico promove propriedades antimicrobiana e anticancerígena, principalmente pela presença dos GLS (Shankar et al., 2019). Um dos exemplos de vegetais mais consumidos é o agrião o qual possui uma versatilidade de cultivo, uma vez que pode ocorrer em terra ou em água por ser uma cultura de clima ameno e de ambientes alagados (Guimarães et al., 2017).

3.2.1. Agrião

O agrião (*Nasturtium officinale*, **Figura 2**) é uma planta amplamente apreciada e consumida em todo o mundo, não apenas pelo seu alto valor nutricional, mas também pela variedade de compostos bioativos (Payne et al., 2015). Composto por mais de 15 vitaminas e minerais essenciais, o agrião é perene e pode atingir uma altura de até 80 centímetros. As suas folhas possuem uma coloração verde-escura e seu caule é tenro e oco (Hirata & Hirata, 2015). O agrião é composto maioritariamente por água (96%) e é uma fonte de (Ca), ferro (Fe), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), zinco (Zn), vitaminas do complexo B, C, E e K (Santos et al., 2012).

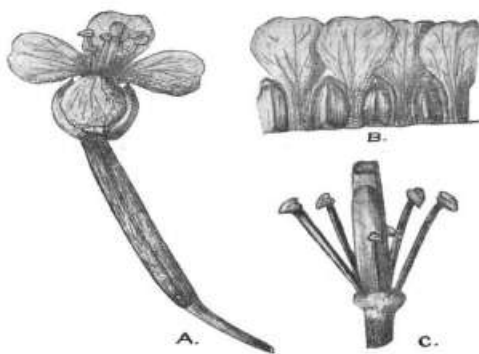


Figura 2. *Nasturtium officinale* L. Aspectos gerais da flor (A); detalhe do cálice (B); Androceu e Gineceu (C) (Scavone & Panizza, 1973).

O agrião também é uma planta rica em substâncias como flavonóides, GLS, esteróis e fenilpropanóides (Chaudhary et al., 2023; Oliveira et al., 2023). Essa gama de compostos

confere ao agrião propriedades que vão além de seu sabor, pois conferem propriedades bioativas, como a prevenção do cancro, associada a presença de GLS.

De acordo com Buzzo et al. (2020), pesquisadores conduziram um estudo em ratos hipertensos nos quais a única fonte de alimentação foi o agrião. Após 11 semanas, observou-se uma redução significativa na pressão arterial desses animais. Esse efeito benéfico está associado à capacidade do agrião de inibir a enzima conservadora da angiotensina, o que resulta no relaxamento dos vasos sanguíneos, promovendo, por conseguinte, uma queda na pressão arterial. Além disso, os autores também atribuem propriedades antioxidantes ao agrião. Desta forma, o agrião destaca-se não apenas como uma adição saborosa à dieta, mas também como um aliado na promoção da saúde devido as suas ótimas propriedades medicinais. Segundo Payne et al. (2015), as evidências dos efeitos benéficos desses compostos na saúde humana são crescentes.

No entanto, conforme Morais et al. (2006), apesar de ser comum encontrar o agrião em locais como lodos e banhados, a sua aceitação no mercado consumidor é limitada, devido às preocupações levantadas pelos consumidores sobre a possível contaminação do alimento. Nesse contexto, o cultivo do agrião em um ambiente hidropônico emerge como uma solução alternativa, promovendo uma produção de maior qualidade e mitigando tais preocupações.

3.2.2. Produção de agrião em sistemas agrícolas não convencionais

O agrião ocupa uma posição de destaque entre as hortaliças de ciclo curto nos sistemas hidropônicos do Brasil, beneficiando-se das vantagens inerentes a esse sistema de cultivo sustentável (Ohse et al., 2012). Em Portugal, o agrião é cultivado em várias regiões incluindo a Beira Litoral, Grande Lisboa e Algarve, com produção contínua ao longo do ano, mas o seu desenvolvimento depende muito das condições meteorológicas (Gabinete de Planeamento e Políticas [GPP], 2006). Durante o inverno, temperaturas baixas e humidade reduzida desaceleram a produção, enquanto o aumento da humidade devido à chuva e temperaturas amenas estimulam o crescimento. Entretanto, a sensibilidade do agrião às geadas pode resultar em atrasos no crescimento, folhas com coloração roxa e maior suscetibilidade a doenças. No verão, o crescimento rápido limita os cortes de plantas, marcando também o início da floração e produção de sementes. Nas estações de outono e

primavera, quando as condições climáticas são favoráveis, as plantações têm duração de cerca de 5 a 6 meses, com 6 a 7 ciclos de corte, e é nesse período que a produtividade do agrião é mais elevada (GPP, 2003, 2006).

Quanto à produção do agrião em sistemas hidropônicos, deve-se alertar para o controle rigoroso do pH no meio hidropônico de forma a garantir a disponibilidade dos nutrientes importantes à cultura, como o azoto, o fósforo, o potássio, o cálcio e o ferro (Cano, 2019). A ficha técnica do Manual de Fertilização das Culturas publicado pelo Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, apresenta os seguintes intervalos recomendados para o manejo nutricional do agrião (Velooso et al., 2022), descritos na **Tabela 1**.

Tabela 1. Concentração de nutrientes recomendados para a produção de agrião.

Nitrogénio (N)	entre 4,2% e 6%
Fósforo (P)	entre 0,7% e 1,30%
Potássio (K)	entre 4% e 8%
Cálcio (Ca)	entre 1% e 2%
Magnésio (Mg)	entre 0,25% e 0,50%
Zinco (Zn)	entre 20 mg/kg e 40 mg/kg
Ferro (Fe)	entre 50 mg/kg e 100 mg/kg
Cobre (Cu)	entre 6 mg/kg e 15 mg/kg
Manganês (Mn)	entre 50 mg/kg e 250 mg/kg
Boro (B)	entre 25 mg/kg e 50 mg/kg

No que se refere à unidade de hidroponia no cultivo de agrião, Braz et al. (2008), ao estudarem o cultivo do agrião d'água em sistema hidropónico NFT no município de Garça, em São Paulo, Brasil, observaram que a cultura se adaptou bem à região no qual foi cultivada, obtendo-se uma produção satisfatória. Barbosa et al. (2009), através da avaliação do desenvolvimento de quatro cultivares de agrião em sistema NFT, concluíram que a cultivar agrião d'água folha larga, adaptou-se melhor ao sistema hidropónico quando comparado com as outras cultivares estudadas.

Em relação a sistemas de aquaponia, Castellani et al. (2009) estudaram a integração do cultivo hidropónico do agrião e a produção de camarões de água doce, e concluíram que as

necessidades nutricionais do agrião foram atendidas de maneira satisfatória. A integração do cultivo hidropônico com a produção aquícola resultou no crescimento de plantas com maior biomassa quando comparadas àquelas expostas à solução nutritiva via gotejamento. Recentemente, Contini et al. (2020) constaram que a produção de agrião em um sistema de aquaponia superou a do sistema convencional em até 75%. No decorrer do estudo, observou-se que o agrião não apresentou limitações de crescimento relacionadas ao pH da água, que se aproximou de 7,0, embora o intervalo ideal para essas plantas seja entre 6,0 e 6,8. Surpreendentemente, não foi necessário o uso de fertilizantes mineralizados, uma vez que o efluente gerado pela produção de peixes se mostrou suficiente para atender as necessidades nutricionais das plantas. Além disso, o agrião demonstrou uma adaptação notável ao sistema de aquaponia, com um crescimento significativamente mais rápido em comparação ao cultivo convencional, atingindo tamanho comercial em menos de 30 dias, em contraste com os 45 a 50 dias necessários no sistema tradicional. Como relatado pelos autores, as variáveis de massa seca e massa verde mostraram uma forte correlação, como era esperado, uma vez que ambas medem a mesma parte das plantas. A análise dos dados concentrou-se na massa verde das hortaliças, considerando o seu consumo na forma mais tenra.

3.3. Potencial dos ecossistemas aquáticos do NE de Portugal

A região nordeste de Portugal abriga uma vasta extensão de ecossistemas aquáticos cujo potencial vai muito além de suas fronteiras naturais. Esses sistemas aquáticos, que incluem rios sinuosos e albufeiras, desempenham um papel crucial na sustentabilidade ambiental e económica da região. À medida que exploramos mais a fundo, desvendamos não apenas o valor desses ambientes na conservação da biodiversidade, mas também o seu potencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos e as oportunidades de desenvolvimento económico que oferecem no aproveitamento dos sistemas lênticos de menor valor conservacionista.

3.3.1. Aproveitamento do potencial dos sistemas lênticos

Os sistemas lênticos, que compreendem lagos, lagoas, pântanos, açudes e reservatórios, são ecossistemas de água doce caracterizados pela sua baixa velocidade de fluxo ou, em alguns casos, pela ausência de fluxo. Em Portugal, os sistemas lênticos apresentam particularidades, sendo que os únicos naturais são os pequenos lagos de alta montanha, enquanto os demais

são albufeiras resultantes da criação de barragens nos rios (Geraldes & Calheiros, 2019). A origem da palavra "lêntico" remonta ao latim "*lentus*," que significa "lento," e esta denominação refere-se à tranquilidade da água encontrada nesses sistemas. Além de sua caracterização, é importante ressaltar que esses ecossistemas desempenham um papel de suma importância na distribuição da biodiversidade, uma vez que apresentam ecótonos bem definidos (Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico [ANA], 2013).

Esses sistemas aquáticos destacam-se também pelos seus processos naturais de filtração, que ajudam a remover poluentes e sedimentos da água, e resultam numa melhoria notável na qualidade da água. Essa qualidade da água promove o crescimento saudável da vida aquática e, em muitos casos, a água desses sistemas pode ser usada como fonte de abastecimento de água potável após o tratamento adequado (Ramachandra & Solanki, 2007).

No entanto, é importante observar que esses ecossistemas têm enfrentado desafios significativos em relação à sua qualidade ambiental. Embora naturalmente sejam mais suscetíveis ao processo de eutrofização devido ao elevado tempo de detenção hidráulica (Barros, 2013), a eutrofização artificial tem se tornado um impacto ambiental preocupante para esses ambientes. A eutrofização é um processo resultante do aumento das concentrações de fósforo e nitrogênio na água, e um excesso desses nutrientes pode comprometer a qualidade ambiental dos sistemas lênticos. Essa condição muitas vezes é provocada por atividades humanas, incluindo práticas inadequadas de uso do solo, a aplicação excessiva de fertilizantes e pesticidas, bem como o desmatamento. Isso representa um risco substancial para a saúde e a estabilidade desses ecossistemas (Ansari et al., 2010). Deste modo, a aplicação de técnicas que promovam a preservação destes sistemas é essencial. Na aquaponia, por exemplo, a água dos sistemas lênticos pode ser utilizada como uma fonte confiável e de alta qualidade, mantendo os parâmetros da água em níveis ideais para as plantas e peixes. Ao mesmo tempo, a aquaponia ajuda na preservação dos sistemas lênticos ao promover práticas de manejo responsáveis e sustentáveis.

Assim, a integração entre sistemas lênticos e aquaponia representa uma abordagem inovadora e sustentável que otimiza o aproveitamento dos recursos naturais, contribui para a qualidade da água e para o crescimento saudável de plantas e peixes. Essa simbiose demonstra como a

harmonização entre a ciência e a natureza pode resultar em soluções ecologicamente conscientes e benéficas para a agricultura e a conservação dos ecossistemas aquáticos.

3.3.2. *Bordalo (Squalius alburnoides)*

O *Squalius alburnoides* (**Figura 3**), conhecido popularmente como bordalo, é uma espécie de peixe endémica da região sul da Península Ibérica, encontrado em rios e ribeiras, sejam eles permanentes ou intermitentes, caracterizados por leitos estreitos e rasos, com a presença de plantas aquáticas, incluindo áreas de albufeira, embora com menor abundância (Collares Pereira et al., 2021). A presença dessa espécie é notável nas bacias hidrográficas do Douro, Tejo, Guadiana, Odiel e Guadalquivir, abrangendo tanto a Espanha quanto Portugal. Em território português, essa espécie apresenta uma ampla distribuição, concentrando-se principalmente na bacia do rio Douro e nas regiões ao sul, excluindo as pequenas bacias costeiras. Além disso, registos confirmam a presença desse peixe na pequena bacia hidrográfica da ribeira da Quarteira, localizada no Algarve (Alexandrino et al., 2005; Soares et al., 2023).



Figura 3. Peixe bordalo (*Squalius alburnoides*) (Alexandrino et al., 2005).

Apesar de uma preocupante tendência de redução no número de indivíduos adultos em algumas bacias (e.g. Guadiana) a espécie *Squalius alburnoides*, classificado como vulnerável (VU) no anterior Livro Vermelho dos Vertebrados (Alexandrino et al., 2005) foi recentemente classificada como Pouco Preocupante (LC) na recente revisão do Livro Vermelho dos Peixes Dulciaquícolas e Diádromos de Portugal Continental (Magalhães et al., 2023).

Os principais fatores de ameaça da espécie *Squalius alburnoides* estão relacionados à degradação do habitat desses peixes, especialmente devido à construção de barragens, à

alteração do regime natural do caudal dos rios, à captação de água, à extração de inertes, à pior qualidade da água e à introdução de espécies não-nativas. Essas espécies invasoras podem ter efeitos significativos, como competição por recursos, predação ou até mesmo atuando como vias de disseminação de agentes patogênicos (Soares et al., 2023).

Diante desse desafio, é essencial considerar medidas que contribuam para a preservação dos valores naturais, especialmente das espécies endêmicas. A conservação ex-situ, por meio da reprodução em cativeiro de espécies nativas como o bordalo, é uma possibilidade a ser explorada. Além disso, o acoplamento da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos com sistemas produtivos inovadores, como a hidroponia e a aquaponia, pode promover um desenvolvimento integrado sustentável em diferentes escalas.

4. METODOLOGIA

O sistema de aquaponia desacoplado, sistemas de aquacultura e hidroponia independentes, foi instalado no Laboratório de Aquacultura e nas instalações Estufas e Viveiros, respetivamente, da Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, por um período de três meses, compreendido entre setembro de 2023 e janeiro de 2024.

4.1. Reagentes e amostras

A água destilada utilizada foi tratada num sistema de purificação MilliQ (Millipore, model A10, Billerica, MA, USA). As sementes de agrião (Rocalba, S.A., Taboada – Lugo, Espanha) usadas para germinação e colocação em crescimento no sistema de hidroponia, foram obtidas numa empresa de comércio de venda a retalho local, Bragança, Portugal. As amostras de partes vegetativas de agrião comercial (Vitacress) foram também obtidas numa empresa de comércio de venda a retalho local. Estas amostras foram pesadas, congeladas e liofilizadas para obtenção de um pó fino e seco (20 mesh), que foi armazenado em condições de humidade e luz controlada para posteriores análises do seu perfil nutricional.

4.2. Sistema de aquacultura

O sistema de tanques do Laboratório de Aquacultura (*Aquaneering Systems* ©) é composto por 5 filas, cada uma com 8 tanques PETG (Polietileno Tereftalato Glicol), um termoplástico transparente, resistente e não-tóxico, com uma capacidade de 16 L. Neste sistema fechado, existem quatro estágios de filtração, que fornecem água limpa, reciclada para os 40 tanques, de acordo com o esquema apresentado na **Figura 4**.

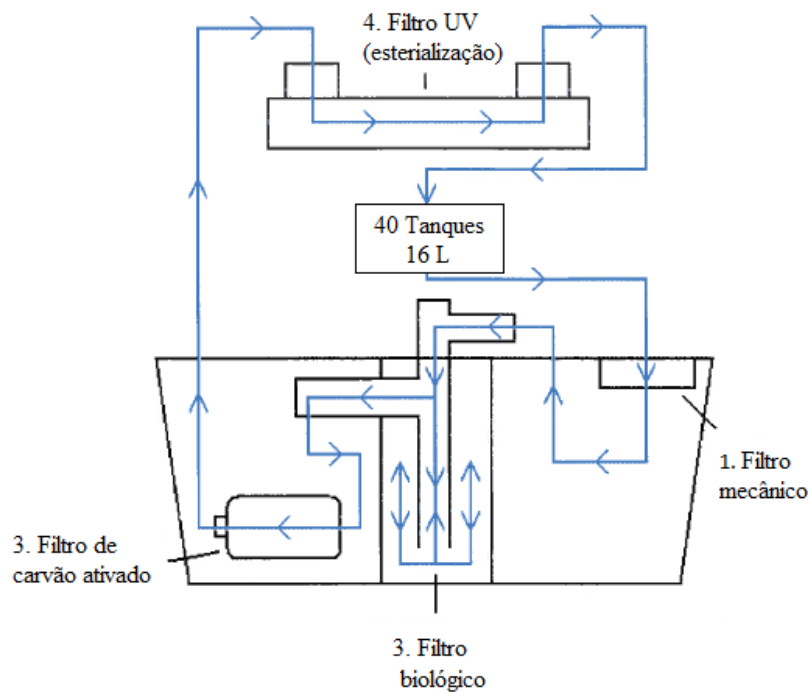


Figura 4. Esquema representativo do processo de filtração da água do sistema *Aquaneering* usado no estudo (adaptado de *Aquaneering*, 2010).

O funcionamento do sistema *Aquaneering* está dividido em quatro secções distintas: i) 1ª secção – estágio onde ocorre a filtração mecânica da água, em que a mesma é forçada a passar por um filtro onde são retidas as partículas de resíduos sólidas. A substituição do filtro foi realizada com alguma frequência, devido à grande deposição de detritos; ii) 2ª secção – estágio onde a água, depois de passar pelo filtro mecânico, é bombeada para o filtro biológico de leito fluidizado (FBB). Neste estágio, a água é pressionada para o fundo do FBB, induzindo agitação entre o filtro e a água. Esta dinâmica evita o bloqueio do sistema e maximiza a área de superfície para o crescimento de diversas bactérias nitrificantes. Estas bactérias irão converter substâncias nocivas para os peixes, como amónia e nitritos, em nitratos (substâncias menos prejudiciais) assegurando a estabilidade e a qualidade da água sem exigir a manutenção frequente, ao contrário de outros métodos de filtração (*Aquaneering*, 2010); iii) 3ª secção – após passar pelo FBB, a água flui novamente para a câmara do reservatório onde é purificada por um sistema constituído por dois filtros de carvão ativado e posteriormente direcionada para as linhas de abastecimento do *rack* composto por 40 tanques. iv) 4ª secção, antes de entrar nos tanques, a água é conduzida através de um reator

de luz ultravioleta (UV) de 40 watts, que contém uma lâmpada de esterilização dentro de uma manga de quartzo. Este processo fornece uma desinfecção final da água, atingindo um mínimo de 90.000 $\mu\text{watts.s/cm}^2$, de modo a eliminar as bactérias e microrganismos. Esta etapa é a última antes da água ser direcionada para os tanques, repetindo-se o processo num sistema fechado que pode ainda renovar 10% da água circulante.

O sistema dispõe ainda de um *Control Box* eletrónico e um *Aqualogic Chiller* que permitem o controlo e a manutenção constante da temperatura pré-definida para a água (Aquanearing, 2010).

Durante os três meses de funcionamento do sistema, foram monitorizados, com periodicidade semanal, os seguintes parâmetros físico-químicos da água dos tanques: temperatura, pH e condutividade (Milwaukee Instruments, EUA), oxigénio e saturação (Hach, Portugal). De ressaltar, que, nas situações onde a saturação de oxigénio da água atingia níveis abaixo de 70%, procedia-se à troca de água e limpeza do tanque. De forma generalizada, a limpeza dos tanques e filtros foi realizada, pelo menos, uma vez por semana.

4.2.1. *Captura da espécie piscícola*

A captura dos exemplares selvagens da espécie piscícola selecionada para o estudo, *Squalius alburnoides*, comumente denominado bordalo, foi baseada na metodologia descrita no Manual para a avaliação biológica da qualidade da água em sistemas fluviais segundo a Diretiva Quadro da Água - Protocolo de amostragem e análise para a fauna piscícola (INAG, 2008). De acordo com o protocolo, a captura dos exemplares foi efetuada com recurso à pesca elétrica (Hans Grassl™ ELT60II-GI; 300-600 V, DC, 2200W) (**Figura 5A**). A pesca elétrica é um método de amostragem direto e eficiente que resulta em taxas de mortalidade praticamente nulas.

O processamento dos peixes incluiu a manipulação cuidadosa e sua identificação, *in loco*, até à espécie (Collares-Pereira et al. 2021; Magalhães et al. 2023). Foram ainda obtidos dados biométricos dos peixes selecionadas, com determinação do comprimento total com recurso a um ictiómetro (precisão de 0,1 cm, Wiidco, EUA) e da biomassa, através do uso de uma balança portátil (precisão de 0,1 g, Kern, Portugal) (**Figura 5B**).



A



B

Figura 5. Pesca elétrica: amostragem da fauna piscícola, no rio Sabor (outono 2023) (**A**); obtenção de dados biométricos (outono 2023) (**B**).

4.2.2. *Desenho experimental*

Foram selecionados 240 exemplares de *S. alburnoides*, provenientes do rio Sabor, de dimensões semelhantes (Média \pm DP cm), e distribuídos de forma diferenciada pelos tanques disponíveis (nº total de tanques: 40). Os exemplares recolhidos foram transferidos para o sistema de alojamento individual de peixes *Aquaneering Systems* ©, descrito acima, de acordo com o seguinte desenho experimental de um fator (**Figura 6**): 1ª fila – sem peixes (controlo); 2ª fila – 2 peixes/tanque; 3ª fila – 4 peixes/tanque; 4ª fila – 8 peixes/tanque; e 5ª fila – 16 peixes/tanque, no qual o número de peixes é a variável independente (com 5 níveis distintos). O período inicial de aclimação dos peixes ao cativeiro e de adaptação ao alimento artificial foi de 15 dias, após o qual se deu início ao ensaio. Os peixes foram alimentados diariamente, recebendo uma porção de ração equivalente a 3% do seu peso corporal, conforme descrito por Boxman et al. (2018). Na eventualidade da morte de um exemplar, este peixe foi substituído por um de característica de peso e tamanho semelhante.



Figura 6. Desenho experimental de um fator (A); implementação real do sistema de aquacultura (B).

4.2.3. Avaliação do crescimento dos peixes

Para avaliar o crescimento dos peixes foram recolhidos os dados biométricos de comprimento e peso de todos os espécimes de peixes em estudo. Para evitar o stress animal foram obtidos os dados apenas no início e final da experiência. Para obtenção da correlação comprimento-peso, foi utilizada a **Equação 1** (Le Cren, 1951, Froese 2006):

Equação 1. Relação comprimento-peso.

$$W = a * L^b$$

Onde:

W: Peso do peixe em gramas (g)

L: Comprimento total do peixe em milímetros (mm)

a e b: Coeficientes da equação, sendo que $b = 3$ e $b \neq 3$ significam, respetivamente, isometria e alometria.

Quanto a condição física, determinou-se pelo Fator K de condição de Fulton (**Equação 2**) (Ricker, 1975):

Equação 2. Fator K de condição de Fulton.

$$K = \frac{(100 * W)}{L^b}$$

Onde:

K: Fator de condição ou coeficiente de condição física

W: Peso do indivíduo em gramas (g)

L: Comprimento total do peixe em centímetros (cm)

4.2.4. Análises químicas e microbiológicas das águas residuais

Durante o período experimental (3 meses) foram realizadas análises químicas e microbiológicas das águas residuais resultantes da produção de peixe nos tanques do sistema de aquacultura. A amostragem usada para ambas as análises, foi de apenas 3 tanques/fila. As análises químicas (nitratos, nitritos e fosfatos) foram avaliadas a cada duas semanas do período experimental, sendo recolhida água para rega (descrita abaixo) e ao mesmo tempo para análise. Relativamente às análises microbiológicas (coliformes totais e esporos de bactérias aeróbias), apenas foram realizadas em duas ocasiões, início e fim do período experimental. A recolha de água para as análises microbiológicas foi efetuada usando frascos de recolha de vidro submergíveis previamente autoclavados.

4.2.4.1. Análises químicas

i) Teor de nitratos

A determinação do teor de nitratos foi realizada conforme os procedimentos descritos por Rodier (1981). Inicialmente, 1 mL de cada amostra de água recolhida foi adicionada num almofariz de vidro, seguido da adição de 4 gotas de NaOH 0,1M e 1 mL de salicilato de sódio a 5%. Após cuidadosa homogeneização, as amostras, incluindo um branco preparado apenas por água destilada, foram submetidas à evaporação total até formação de um resíduo branco. Em seguida, 1 mL de H₂SO₄ concentrado foi adicionado às amostras, deixando arrefecer totalmente. Após este processo, foram adicionados 10 mL de água destilada e 10 mL de NO₃⁻. A obtenção do teor de nitrato foi efetuada por espectrofotometria programado a 415 nm, usando cuvettes de quartzo, e os resultados foram expressos em mg/L.

ii) Teor de nitritos

Para a análise do teor de nitritos foram acondicionados 10 mL de cada amostra de água em frascos Falcon, seguidos da adição de 0,4 mL do reagente Zambelli (Sigma-Aldrich, St. Louis, USA). Uma amostra de branco, água destilada, foi também preparada, seguindo o mesmo procedimento. Após a homogeneização das amostras, estas foram deixadas em repouso protegidas da luz por um período de 10 minutos. Em seguida, foi introduzido 0,4 mL de NH₃ concentrado às amostras. A obtenção do teor de nitritos foi efetuada por espectrofotometria programado a 435 nm, usando cuvettes de acrílico, e os resultados foram expressos em mg/L.

iii) Teor de fosfatos

A obtenção do teor de fosfatos foi realizada de acordo com Tolgyessy (1993). Inicialmente, 10 mL de cada amostra de água foram colocados em tubos Falcon, seguidos da adição de 0,2 mL de H₂SO₄ (11N), 0,4 mL de ácido ascórbico a 5% e 0,8 mL de solução de molibdato de amônio com 40 g/L. Uma amostra de branco, água destilada, foi também preparada, seguindo o mesmo procedimento. Após homogeneização e repouso durante 30 minutos ao escuro, as amostras foram analisadas por espectrofotometria a 800 nm, em cuvettes de acrílico, e os resultados foram expressos em mg/L.

4.2.4.2. Análises microbiológicas

i) Contagem de microrganismos cultiváveis

A contagem das colónias de microrganismos a 22 °C e 37 °C seguiu o protocolo estabelecido pela ISO 6222:1999 (E). Inicialmente, foram realizadas as diluições necessárias, onde 1 mL de cada amostra de água recolhida foi transferido em duplicado para tubos contendo 9 mL de caldo de peptona (**Figura 7**). Após homogeneização, 1 mL de cada diluição foi retirado assepticamente e transferido para um novo tubo, repetindo-se esse procedimento até alcançar o número adequado de diluições. Posteriormente, 1 mL de cada tubo contendo a última diluição foi transferido para placas de Petri esterilizadas. Uma vez distribuído o inóculo de maneira uniforme pelas placas, foram adicionados assepticamente entre 15 a 20 mL do meio de cultura *yeast extract agar* (Himedia, Índia). Após cuidadosa homogeneização das placas

e solidificação do meio de cultura, estas foram incubadas em estufas a 22 °C e a 37 °C por 44 ± 4 horas. No final período de incubação, as colónias foram contadas e os resultados expressos em Unidades Formadoras de Colónias (UFC)/mL para cada temperatura de incubação.



Figura 7. Diluição das amostras em caldo de peptona.

ii) Análise de Clostridium perfringens pelo método da filtração por membrana

A deteção e quantificação de esporos de *C. perfringens* foi realizada de acordo com a metodologia descrita pela ISO 14189:2013. Inicialmente, foram transferidos 100 mL das amostras de água para tubos esterilizados e aquecidos em banho-maria a 80 ± 5 °C durante 10 minutos. Em seguida, após o arrefecimento dos tubos e utilizando uma pinça esterilizada, uma membrana filtrante de acetato de celulose (porosidade de 0,2 μm) foi cuidadosamente posicionada no suporte da rampa e os 100 mL de solução foram filtrados a vácuo. As membranas filtrantes foram retiradas e colocadas de forma invertida em placas de Petri estéreis, sobre as quais foi adicionada primeiro uma camada de 18 mL do meio TSC base de agar (PanReac AppliChem ITW Reagents, Barcelona), depois emulsão de gema de ovo (Himedia, Índia) e uma solução cicloserina à 4% (Acros Organics, China) para criar

condições anaeróbias antes da solidificação do meio. Finalmente, as placas foram incubadas a 37 °C por 20 ± 4 horas. Após o período de incubação, as colónias de coloração negra foram contabilizadas, e os resultados foram expressos em UFC/100 mL da amostra.

iii) Análise de *Enterococos* intestinais pelo método de filtração por membrana

A detecção e quantificação de *enterococos* intestinais seguiu a norma ISO 7899-2:200. Inicialmente, realizou-se a filtração a vácuo de 100 mL da amostra de água através de filtros de membrana com porosidade de 0,45 µm. Em seguida, os filtros foram cuidadosamente transferidos para placas de Petri contendo meio Slanetz-Bartley (Liofilchem, Itália), com o auxílio de uma pinça estéril. Após 48 horas de incubação a 37 °C e havendo formação de colónias, procedeu-se à confirmação por meio da coloração de Gram. Nesta etapa, as colónias foram transferidas para uma lâmina, em condições de assepsia, seguida pela aplicação de peróxido de hidrogénio. O resultado foi avaliado como positivo na ausência de formação de bolhas e negativo na presença de bolhas. Nos casos positivos, foi realizado um teste adicional, no qual as colónias foram transferidas para placas de Petri contendo Bile Esculina Azida Agar (Himedia, Índia) e incubadas a 44 °C durante 2 horas. A confirmação da presença de *enterococos* intestinais foi estabelecida pela observação de colónias com coloração escura. Os resultados foram expressos em UFC/100 mL de amostra.

*iv) Análise de coliformes totais, coliformes termotolerantes e *Escherichia coli* pelo método da estimativa do número mais provável (NMP)*

A detecção de coliformes totais, coliformes termotolerantes e *E. coli* seguiram o protocolo da ISO 9308-2:1990 (E). Para um teste inicial presuntivo, foram distribuídos, de cada amostra de água, 10 mL, 1 mL e 0,1 mL, em conjuntos distintos de tubos. O primeiro conjunto continha três tubos com 10 mL de dupla concentração de caldo laurel sulfato triptona (LST) (**Material Suplementar nº 1**); o segundo, três tubos com 9 mL de concentração simples de caldo de LST; o terceiro, três tubos com 9,9 mL de concentração simples de caldo LST. Após a homogeneização e a adição dos tubos de fermentação de Durham, procedeu-se à incubação a 37 °C por 24 a 48 horas. Para a análise dos resultados considerou-se positivos os tubos que apresentaram formação de gás dentro do tubo de Durham, sendo usados nas seguintes etapas de análise.

v) Análise de Coliformes totais

Para a análise de confirmação da presença/ausência de coliformes totais, 0,1 mL dos tubos positivos do teste presuntivo (acima descrito) foram transferidos para tubos contendo 9,9 mL de meio seletivo "*brilliant green lactose bile broth*" (BGLB) (Biokar Diagnostics, Beauvais) mais tubos de Durham, e depois incubados a 37 °C durante 48 horas. Para a análise dos resultados considerou-se positivo para coliformes totais os tubos que evidenciaram formação de gás dentro do tubo de Durham. Os resultados finais foram obtidos pela combinação dos tubos com resultados positivos, expressos em NPM/100 mL da amostra.

vi) Análise de coliformes termotolerantes (fecais) e *E. coli*

Para a confirmação da presença/ausência de coliformes fecais e *E. coli*, 0,1 mL dos tubos positivos do teste presuntivo foram transferidos para tubos contendo 9,9 mL de caldo EC (**Material Suplementar nº 2**), acrescidos de tubos de Durham, e incubados a $44,05 \pm 0,2^\circ\text{C}$ por 24 a 48 horas.

Nos tubos onde foi visualizado a formação de bolhas de gás, teste positivo, foi retirado 0,1 mL e de seguida colocado em novos tubos com caldo triptona e incubados por 24 ± 2 horas a 44 °C. Após este período, foi adicionado 0,2 – 0,3 mL do reagente Kovacs (Liofilchem, Itália), agitando-se suavemente e deixou-se repousar. Para a análise dos resultados considerou-se que a presença de um anel vermelho na superfície indicava teste positivo para a presença de *E. coli*. Os resultados foram determinados pela combinação dos tubos com resultados positivos, expressos em NPM/100 mL da amostra.

4.3. Sistema de hidroponia

4.3.1. Germinação do agrião

O processo de germinação ocorreu em placa de espuma fenólica (GroHo Hidroponia, Lisboa, Portugal) de 225 alvéolos, de 2,0 x 2,0 x 2,4 cm/alvéolo. A placa de espuma fenólica é um substrato estéril produzido à base de resina fenólica, usado essencialmente para germinação e enraizamento de plantas. A preparação da espuma foi efetuada seguindo as diretrizes da empresa fornecedora do material. Em detalhe, a espuma foi totalmente submersa em água da

torneira até saturação do substrato, após o qual foi retirado o excesso de água e colocada numa bandeja. Em cada alvéolo da espuma, foram inseridas duas sementes de agrião. Adicionou-se novamente água da torneira até atingir cerca de 1 cm de altura na bandeja; e de seguida, manteve-se em local protegido da luz até germinação das sementes de agrião (15 e 45 dias). A germinação epígea da semente foi controlada diariamente, sendo que, após rutura do tegumento com a protrusão da radícula (raiz embrionária) foi observado o surgimento de dois cotilédones, após o qual foram transferidas, com a espuma fenólica (**Figura 8**), para os perfis perfurados de hidroponia.



Figura 8. Agriões em fase de germinação com o crescimento das duas folhas embrionárias.

De notar, que durante o período de germinação houve a necessidade de repor a água na bandeja sempre que a altura d'água ficava abaixo de 1 cm.

4.3.2. Desenho experimental do sistema de hidroponia

Para cada um dos 40 tanques do sistema de aquacultura (seção 4.2.2), foi instalado um perfil de hidroponia correspondente com quatro perfurações tamponado (sistema fechado, **Figura 9**). O perfil hidropónico furado (GroHo Hidroponia, Lisboa, Portugal) de 80 mm (largura fundo: 7 cm; largura base: 8 cm; altura: 4,5 cm; e diâmetro orifício/planta: 5,5 cm) é o mais adequado para aplicação em linhas de produção de plantas, sendo constituído por material resinoso conforme o Regulamento CE 1935/2044 de 27 de Outubro de 2004.



Figura 9. Perfil de hidroponia com quatro perfurações tamponado.

Quatro plantas de agrião germinadas (de 45 e 15 dias) foram colocadas por perfil de hidroponia, com a espuma fenólica, e usando cestos de rede conforme indicado na **Figura 9** acima, e de acordo com o desenho experimental de um fator descrito na **Figura 10**.

Durante o período experimental de 3 meses a água de cada tanque foi recolhida semanalmente e utilizada para irrigar o perfil correspondente, retirando previamente a água restante do perfil. Como foi referido anteriormente (seção 4.2), foram monitorizados, com periodicidade semanal, e antes da recolha da água, os seguintes parâmetros físico-químicos da água dos tanques: temperatura, pH e condutividade (Milwaukee Instruments, EUA), oxigénio e saturação (Hach, Portugal). Para viabilizar o processo, as águas foram recolhidas para garrafas de coleta de 500 mL, dos quais 200 mL foram usados para irrigação e a restante foi reservada em câmara frigorífica (4 °C) para efetuar as análises químicas (descritas anteriormente). Para acompanhar o crescimento do agrião, foram realizadas medições da parte aérea da planta e contagem do número de folhas a cada duas semanas. No início e término do período experimental foi também realizada a medição do comprimento das raízes para complementar a análise do desenvolvimento da planta.



Figura 10. Desenho experimental de um fator (A); implementação real do sistema de hidroponia, de acordo com o desenho experimental do sistema de aquaponia (B).

Após três meses de ensaio experimental, a parte aérea do agrião foi recolhida, congelada e armazenada para posterior análise do seu perfil nutricional.

4.3.3. Perfil nutricional do agrião comercial e crescido em sistema de hidroponia

4.3.3.1. Humidade

A avaliação da humidade foi realizada de acordo com o procedimento oficial de análise número 925.45b (AOAC, 2016). Utilizando uma balança de humidade eletrónica (ADAM, PMB 163, Oxford, EUA) foram pesados cerca de 3 g de agrião comercial e crescido em sistema de hidroponia, até remoção total da humidade por radiação infravermelha. O cálculo de humidade foi obtido pela diferença de massa inicial e final da amostra e os valores foram expressos em percentagem.

4.3.3.2. Cinzas

O teor de cinzas foi determinado conforme descrito no método oficial de análise n° 935.42 (AOAC, 2016). Inicialmente, 0,250 g de agrião foram colocados em cadinhos de porcelana, previamente calcinados, pesados e identificados. As amostras foram então colocadas numa mufla (IVYMEN, N-8L, Barcelona, Espanha) a 550 °C durante 6 horas até obtenção de cinzas brancas (calcinação completa). Os cadinhos com as amostras calcinadas foram colocados num exsiccador até atingirem arrefecimento à temperatura ambiente (~25 °C), e posteriormente pesados até obtenção de peso constante. O cálculo de cinzas foi obtido pela diferença de massa inicial e final da amostra e os valores foram expressos em g/100g de peso seco (ps).

4.3.3.3. Gorduras totais

A determinação do teor de gorduras totais do agrião foi realizado segundo o método oficial de análise n° 989.05 (AOAC, 2016). Inicialmente, pesaram-se, aproximadamente, 3 g de amostra de agrião para um cartucho de papel colocado num equipamento extrator de gorduras do tipo Soxhlet (modelo), usando éter de petróleo para a extração, a uma temperatura de aproximadamente 120 °C, com um ciclo de 6 horas. Os resultados foram expressos em g/100g ps e calcularam-se por diferença gravimétrica da massa inicial e a massa de gordura obtida.

4.3.3.4. Proteína bruta

A obtenção do teor em proteína bruta seguiu o método de macro-Kjeldahl protocolado pelo método oficial de análise nº 991.02 (AOAC, 2016), empregando um fator de conversão de 6,25 para converter o teor de nitrogênio (N) em proteínas totais, conforme indicado por Xu et al. (2019). Inicialmente, em tubos de Kjeldahl, foram adicionados 0,25 g de agrião, duas pastilhas catalisadoras (Kjeltabs) e 15 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado. Os tubos foram colocados num bloco digestor a 400 °C durante 70 minutos, precedido por um período de arrefecimento, após o qual foram adicionados 25 mL de água destilada.

Usando o analisador de Kjeldahl (Velp Scientifica UDK 152), é adicionado NaOH aos tubos com a amostra digerida, por volumetria de retrocesso, que irá libertar o nitrogênio sob forma de NH₃, posteriormente coletado por destilação a vapor numa solução de H₂SO₄ 0,1N. Finalmente, é feita uma titulação com NaOH 0,1N, usando vermelho de metilo como indicador para calcular a quantidade de azoto, utilizando como fator de correção *N* (quantidade de nitrogênio) x 6,25, (**Equação 3**), e os resultados expressos em g/100 g ps.

Equação 3. Cálculo do teor de proteína bruta (g/100g ps).

$$\text{Proteína (g/100g ps)} = \% \text{ de nitrogênio (N)} \times \text{Fator de conversão}$$

4.3.3.5. Hidratos de carbono

O teor de hidratos de carbono totais foi estimado por diferença e expresso em g/100g ps de acordo com a **Equação 4**.

Equação 4. Cálculo do teor de hidratos de carbono (g/100g ps).

$$H. \text{ carbono } \left(\frac{g}{100g} \text{ ps} \right) = 100 - (\text{Humidade} + \text{Cinzas} + \text{Gorduras} + \text{Proteínas})$$

4.3.3.6. Valor energético

O valor energético foi calculado segundo o descrito pelo Regulamento (UE) n° 1169 (2011), e expresso em Kcal por 100 g de peso seco de acordo com a **Equação 5**.

Equação 5. Cálculo do valor energético (Kcal/100g ps).

$$\text{Energia} \left(\frac{\text{kcal}}{100 \text{ g ps}} \right) = 4 \times (\text{g Proteína} + \text{g Hidratos de carbono}) + 9 \times (\text{g Gordura})$$

4.4. Análise estatística

Todos os ensaios químicos e nutricionais foram realizados em triplicado e os valores expressos como média \pm desvio padrão (DP). As diferenças significativas entre amostras foram analisadas através do teste t-student com um nível de significância de 95%, utilizando o IBM SPSS Statistics for Windows, Versão 23.0 (IBM Corp., Armonk, Nova York, EUA). No caso de haver mais do que dois fatores a serem analisados, foi usada uma análise de variância unidirecional (ANOVA) seguida do teste HSD de Tukey com $\alpha = 0,05$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Monitorização do sistema de aquacultura

5.1.1. Análise dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água da produção de peixes

Durante o procedimento experimental de 10 semanas foram monitorizados semanalmente os parâmetros físico-químicos da água dos tanques, incluindo temperatura, pH, condutividade, concentração de oxigénio dissolvido e percentagem de saturação. Os dados referentes a estas análises encontram-se descritos na **Tabela 2** que apresenta os valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros nos tanques com 0, 2, 4, 8 e 16 peixes ao longo de 10 semanas. Na **Figura 11** é possível ver a tendência dos parâmetros ao longo de todo o procedimento experimental usando os valores globais das médias dos parâmetros/semana/40 tanques. O estudo e controlo de todos estes parâmetros é de extrema importância uma vez que têm um impacto direto na saúde e bem-estar dos peixes (Braña et al., 1992; Elliott, 1994; Metcalfe, 1994).

A temperatura afeta o metabolismo (Kraskura et al., 2023) enquanto o pH pode influenciar a absorção de nutrientes e a saúde das membranas mucosas dos peixes (Wurts & Durborow, 1992). Parâmetros como a condutividade e concentração de oxigénio dissolvido na água ajudam a garantir um ambiente adequado para os peixes, evitando condições de estresse que possam levar a doenças ou mortalidade. Ainda, níveis adequados de oxigénio dissolvido podem aumentar a taxa de crescimento dos peixes (El-Murr & Hasan, 2020).

Com as informações detalhadas na **Tabela 2** e **Figura 11** é possível verificar, de uma maneira geral, que todos os parâmetros ao longo das 10 semanas, e independentemente do número de peixes, se manteve estável.

O pH e a condutividade foram os parâmetros que apresentarem as menores diferenças estatísticas entre as 10 semanas do período experimental. De destacar que a faixa de pH tolerável para os peixes situa-se entre 4.0 e 9.0, com um índice ideal entre 6.5 e 8.0 (Wurts & Durborow, 1992). No que refere à condutividade, a água doce normalmente tem uma condutividade entre 20 e 1.550 $\mu\text{mho/cm}$ (Boyd, 1990). Ainda que não haja estudos específicos quanto ao limite de condutividade para a espécie *Squalius alburnoides*, segundo

Zimmermann et al. (2001), os valores desejáveis para a criação de peixes encontram-se entre 20 a 150 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Tabela 2. Valores médios dos parâmetros físico-químicos (temperatura, pH, condutividade, concentração de oxigênio e percentagem de saturação) monitorizados ao longo do período experimental para os tanques com 0, 2, 4, 8 e 16 peixes (Média \pm DP [Mín-Máx]).

	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Oxigênio dissolvido (mg/L)	Saturação (%)
<i>Semana 0 (tempo inicial)</i>					
0 peixe	20,96 [19,5-29]	8,3 [8,3-8,3]	573,5 [571-575]	6,67 [5,76-7,67]	81,03 [69,7-93,3]
2 peixes	19,99 [19,9-20]	8,25 [8,2-8,3]	534,75 [441-598]	7,29 [5,78-7,63]	88,94 [70-93,1]
4 peixes	18,85 [18-19,8]	8,33 [8,3-8,4]	564,88 [564-567]	5,94 [3,37-7,3]	71,86 [40-88,5]
8 peixes	19,73 [19,5-20]	8,3 [8,3-8,3]	551,13 [455-572]	4,35 [2,74-6,53]	51,63 [32,7-76,1]
16 peixes	19,51 [19,1-20]	8,3 [8,3-8,3]	561 [504-573]	3,35 [2,72-5,36]	39,83 [32,3-64,1]
Média/semana	19,81 [18-29]	8,29 [8,2-8,4]	557,05 [441-598]	5,55 [2,72-7,67]	67,04 [32,3-93,3]
<i>Semana 1</i>					
0 peixe	20,33 [20,1-20,5]	8,1 [8,1-8,1]	596 [594-598]	7,59 [7,28-7,9]	86,7 [86,3-87,1]
2 peixes	20,41 [20,1-20,6]	7,9 [7,6-8]	598,25 [595-600]	6,19 [5,45-6,93]	74,35 [65,3-83,4]
4 peixes	20,54 [20,2-20,7]	8,05 [8-8,2]	599 [597-601]	6,89 [6,52-7,12]	82,39 [73,83-85,8]
8 peixes	20,64 [20,6-20,7]	8 [8-8]	598,09 [590,7-600]	6,93 [6,75-7,03]	83,39 [81,2-84,7]
16 peixes	20,63 [20,6-20,7]	7,98 [7,9-8]	476,88 [249-599]	6,5 [5,68-7,04]	77,93 [68,1-84]
Média/semana	20,51 [20,1-20,7]	8,01 [7,6-8,2]	573,64 [249-601]	6,79 [5,45-7,9]	81,13 [65,3-87,1]
<i>Semana 2</i>					
0 peixe	20,94 [20,7-21,1]	8,29 [8,2-8,3]	616,5 [605-623]	7,74 [7,65-7,98]	93,09 [92,1-95,9]
2 peixes	20,89 [20,6-21]	8,25 [8,2-8,3]	618,38 [617-621]	7,4 [6,9-7,73]	89,18 [83-93,2]
4 peixes	20,84 [20,7-21]	8,25 [8,2-8,3]	618,25 [615-622]	7,33 [6,68-7,75]	88,44 [80,1-93,4]
8 peixes	20,98 [20,8-21,1]	8,24 [8,2-8,3]	605,13 [557-621]	7,27 [6,53-7,74]	87,41 [78,5-93,1]
16 peixes	20,88 [20,7-21]	8,21 [8-8,3]	620 [615-626]	6,87 [5,15-7,54]	82,83 [62,1-91,2]
Média/semana	20,9 [20,6-21,1]	8,25 [8-8,3]	615,65 [557-626]	7,32 [5,15-7,98]	88,19 [62,1-95,9]
<i>Semana 3</i>					
0 peixe	20,33 [20,2-20,4]	8,23 [8,2-8,3]	584,75 [480-609]	7,06 [6,66-7,27]	84,8 [79,9-87,5]
2 peixes	21,03 [20,9-21,1]	8,2 [8-8,6]	587,88 [557-617]	6,83 [6,27-7,25]	82,25 [74,5-87,5]
4 peixes	21,05 [21-21,1]	8,11 [8,1-8,2]	522,38 [476-583]	6,86 [6,68-7]	82,8 [80,6-84,4]
8 peixes	21,01 [20,9-21,1]	8,06 [8-8,1]	596,13 [547-615]	6,44 [5,68-6,9]	77,4 [68,1-82,8]
16 peixes	21,13 [21-21,2]	8,05 [8-8,1]	616,5 [616-617]	6,16 [5,07-6,65]	74,21 [61,2-80,1]
Média/semana	20,91 [20,2-21,2]	8,13 [8-8,6]	581,53 [476-617]	6,67 [5,07-7,27]	80,29 [61,2-87,5]
<i>Semana 4</i>					
0 peixe	18,44 [18,1-18,8]	8,19 [8,1-8,2]	601,13 [587-613]	6,08 [5,05-6,71]	71,25 [58,9-78,5]
2 peixes	18,4 [17,6-18,7]	8,13 [8,1-8,2]	604,63 [600-612]	5,8 [5,21-6,31]	68,11 [60,9-74,1]

4 peixes	18,68 [18,2-19,1]	8,1 [8,1-8,1]	606 [598-615]	6,06 [5,47-6,89]	71,14 [64,6-81,6]
8 peixes	18,61 [18,3-18,9]	8,06 [8-8,2]	601,25 [592-608]	5,06 [1,8-6,43]	59,71 [21,1-76,1]
16 peixes	18,51 [18,1-18,9]	8,04 [7,9-8,1]	574,38 [444-607]	4,59 [2,46-5,83]	54,01 [28,6-68,9]
Média/semana	18,53 [17,6-19,1]	8,1 [7,9-8,2]	597,48 [444-615]	5,52 [1,8-6,89]	64,85 [21,1-81,6]
<i>Semana 5</i>					
0 peixe	19,18 [19,1-19,2]	8,03 [8-8,1]	600,88 [594-604]	5,74 [5,3-6,04]	67,45 [62,2-70,6]
2 peixes	19,24 [19,2-19,3]	8 [7,9-8,1]	510,88 [446-604]	4,94 [4,27-5,68]	58,16 [52,7-65,2]
4 peixes	19,28 [19,2-19,3]	7,99 [7,9-8]	600,38 [594-605]	5,17 [4,54-5,71]	60,79 [53,3-67,3]
8 peixes	19,2 [19,1-19,3]	7,89 [7,8-8]	600 [577-605]	4,8 [4,2-5,35]	55,08 [49,5-63,1]
16 peixes	19,14 [19-19,2]	7,73 [7,6-7,9]	442,13 [270-602]	4,34 [3,44-5,06]	51,23 [40,7-59,8]
Média/semana	19,21 [19-19,3]	7,93 [7,6-8,1]	550,85 [270-605]	5 [3,44-6,04]	58,54 [40,7-70,6]
<i>Semana 6</i>					
0 peixe	19,36 [19,3-19,5]	8 [8-8]	614,25 [614-615]	6,93 [6,72-7]	81,03 [78,7-82]
2 peixes	19,39 [19,3-19,5]	7,9 [7,9-7,9]	613,88 [613-615]	6,22 [5,76-6,62]	72,65 [67,2-77,5]
4 peixes	19,39 [19,3-19,5]	7,96 [7,9-8]	613,88 [613-615]	6,56 [6,41-6,74]	76,7 [74,8-78,7]
8 peixes	19,29 [19,1-19,4]	7,84 [7,8-7,9]	604,5 [588-615]	5,76 [4,82-6,65]	67,35 [56,2-77,9]
16 peixes	19,4 [19,3-19,5]	7,8 [7,8-7,8]	614,38 [613-615]	5,19 [0,85-6,31]	60,63 [9,8-73,9]
Média/semana	19,37 [19,1-19,5]	7,9 [7,8-8]	612,18 [588-615]	6,13 [0,85-7]	71,67 [9,8-82]
<i>Semana 7</i>					
0 peixe	17,36 [17,3-17,4]	8,03 [8-8,1]	580,25 [563-583]	6,58 [6,05-7,5]	72,79 [67-81,6]
2 peixes	17,35 [17,3-17,4]	7,99 [7,9-8]	579,5 [559-584]	5,66 [4,97-6,49]	62,71 [54,9-72,3]
4 peixes	17,2 [16,7-17,3]	8 [8-8]	583,13 [582-585]	5,93 [5,4-6,36]	65,68 [59,7-70,6]
8 peixes	17,16 [16,5-17,6]	7,84 [7,5-8]	583,5 [582-586]	4,23 [1,03-5,83]	46,75 [11,2-64,9]
16 peixes	17,39 [17-17,5]	7,89 [7,8-8]	583,63 [580-585]	4,79 [4,13-5,16]	53 [45,8-57,3]
Média/semana	17,29 [16,5-17,6]	7,95 [7,5-8,1]	582 [559-586]	5,44 [1,03-7,5]	60,19 [11,2-81,6]
<i>Semana 8</i>					
0 peixe	15,5 [15,5-15,5]	8,15 [8,1-8,3]	602,5 [602-603]	7,71 [7,24-8,25]	82,93 [77,9-88,8]
2 peixes	15,78 [15,7-15,8]	8,1 [8,1-8,1]	600,25 [599-602]	5,68 [5,32-6,38]	60,8 [57,5-66,8]
4 peixes	15,78 [15,7-15,8]	8,08 [8-8,1]	591,25 [560-603]	6,24 [5,33-6,85]	68,33 [61,2-74,1]
8 peixes	15,8 [15,8-15,8]	8,05 [8-8,1]	601,25 [601-602]	6,22 [6,04-6,47]	67,18 [65,4-70]
16 peixes	15,78 [15,7-15,8]	8,03 [8-8,1]	601,5 [600-603]	5,33 [4,76-6,04]	57,53 [51,5-65,1]
Média/semana	15,73 [15,5-15,8]	8,08 [8-8,3]	599,35 [560-603]	6,24 [4,76-8,25]	67,35 [51,5-88,8]
<i>Semana 9</i>					
0 peixe	15,45 [15,4-15,5]	8,18 [8,1-8,2]	594 [590-596]	8,55 [8,43-8,72]	92,7 [91,4-94,5]
2 peixes	16,9 [16,8-17]	8,1 [8,1-8,1]	570,75 [563-580]	8,38 [7,47-8,82]	93,58 [83,2-98,7]
4 peixes	16,9 [16,8-17]	8,08 [8-8,1]	578,25 [577-580]	8,56 [8,19-8,73]	95,8 [91,6-97,8]
8 peixes	16,28 [15,8-16,7]	7,78 [7,6-8]	580,25 [575-585]	8,62 [7,93-8,95]	96,5 [88,7-99,7]
16 peixes	16,95 [16,9-17]	7,9 [7,9-7,9]	582,25 [581-584]	7,9 [7,66-8,12]	88,53 [85,9-91,1]
Média/semana	16,5 [15,4-17]	8,01 [7,6-8,2]	581,1 [563-596]	8,4 [7,47-8,95]	93,42 [83,2-99,7]

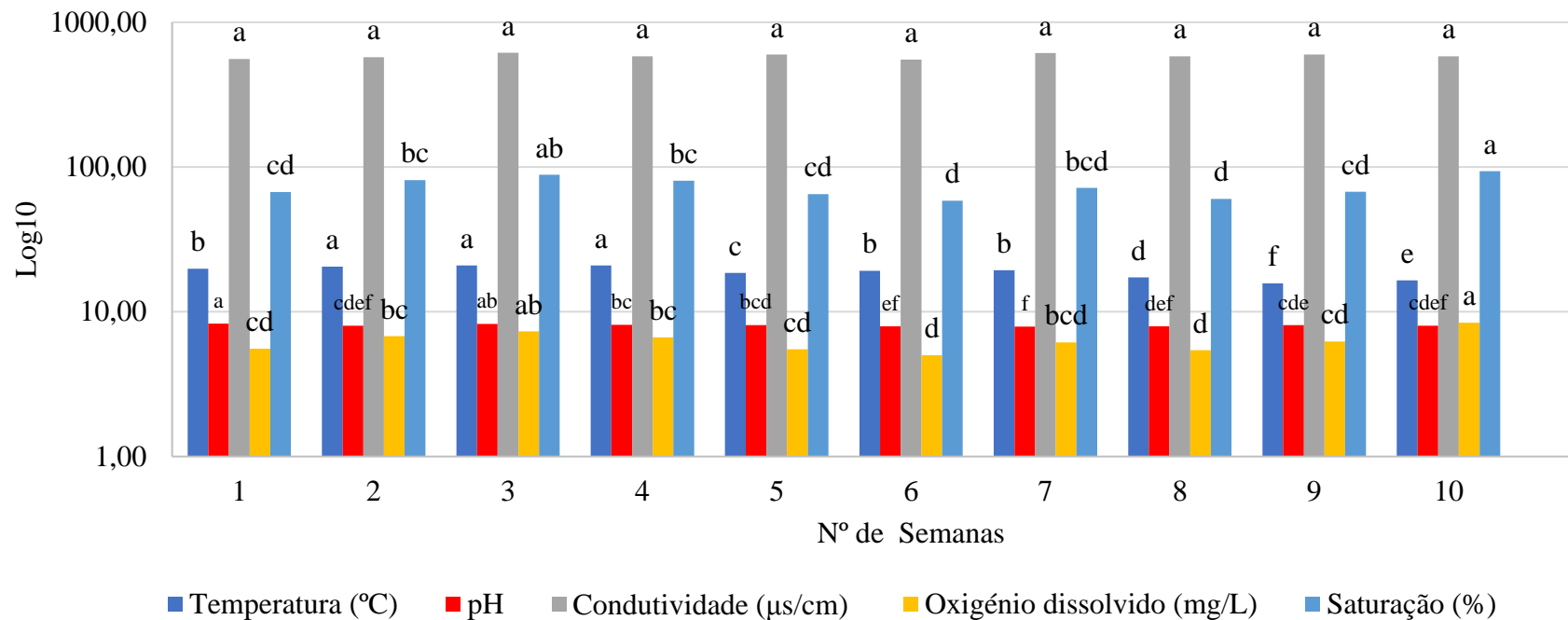


Figura 11. Tendência dos parâmetros físico-químicos nos tanques de crescimento durante 10 semanas usando os valores globais das médias dos parâmetros*/semana/40 tanques. *Parâmetros: temperatura, pH, condutividade, oxigénio dissolvido e percentagem de saturação. * letras diferentes nas linhas significam diferenças estatísticas significativas com $p > 0,05$.

Destacam-se a temperatura, concentração de oxigênio dissolvido e percentagem de saturação, onde foram observadas maiores variações ao longo do período experimental.

A variação média da temperatura da água, que apresentou uma tendência decrescente (1ª semana: 19,81 °C – 10ª semana: 16,50 °C) ao longo das 10 semanas, pode ser atribuída ao fato de o ensaio ter sido realizado entre o final do outono e inverno, e o sistema de aquacultura não ter um sistema de aquecimento de água instalado. Embora não tenha sido encontradas informações específicas disponíveis sobre a faixa de temperatura ideal para esta espécie em aquacultura, pode-se inferir algumas informações com base em seu habitat natural.

Considerando que o *Squalius alburnoides* é uma espécie de clima temperado, é provável que a temperatura ideal para a criação dessa espécie em aquacultura esteja entre 15 °C e 25 °C.

Quanto à percentagem de saturação, foram verificados valores abaixo de 70%, o que pode explicar a mortalidade dos peixes, ocorrida com maior frequência nos tanques das últimas filas, onde a densidade de peixes era mais elevada (8 peixes por tanque na 4ª fila e 16 peixes por tanque na 5ª fila).

Valores de oxigênio dissolvido menores que 2 mg/L representam uma condição perigosa, conhecida como hipoxia, que pode ser fatal para os peixes. Espécies diferentes têm tolerâncias variadas ao nível de oxigênio dissolvido necessário para sua sobrevivência. Por exemplo, as carpas podem suportar concentrações de OD de 3 mg/L, mas para as trutas, é necessário um nível mais alto, em torno de 8 mg/L (CETESB, 1997).

5.1.2. Avaliação do desempenho do crescimento e condição física dos peixes

A representação gráfica da relação comprimento-peso envolve traçar a forma logarítmica do comprimento e peso dos peixes. Quando os pontos plotados estão alinhados numa linha reta, mesmo com alguma dispersão devido a variações individuais, indica-se uma relação no comprimento-peso dos peixes (Froese, 2006). Caso a dispersão observada seja pequena, é possível ajustar essa linha reta pelo método da regressão, permitindo uma avaliação precisa do valor de b (Froese, 2006).

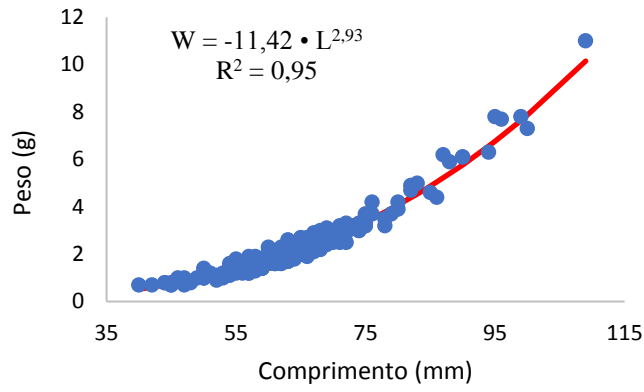
Desta maneira, as relações comprimento-peso dos peixes foram analisadas no início e no fim do período experimental de duas formas distintas: inicialmente, examinou-se o conjunto de todos os peixes; em seguida, analisou-se a relação para o total de peixes em cada uma das quatro filas de tanques que continham peixes. Conforme mencionado anteriormente, os peixes foram distribuídos nos tanques a partir da 2ª fila, seguindo a seguinte disposição: 2ª fila (8 tanques) – 2 peixes/tanque; 3ª fila (8 tanques) – 4 peixes/tanque; 4ª fila (8 tanques) – 8 peixes/tanque; e 5ª fila (8 tanques) – 16 peixes/tanque.

Na **Figura 12A** e na **Figura 12B**, é possível analisar a relação entre comprimento e peso em geral, no início e no fim do experimento, com valores de b iguais a 2,93 e 3,01, respectivamente. Observa-se uma melhoria na relação comprimento-peso dos peixes ao longo das 10 semanas do experimento. Uma vez que os valores obtidos para b estão muito próximos de 3, conclui-se que as variáveis comprimento e peso aumentaram proporcionalmente.

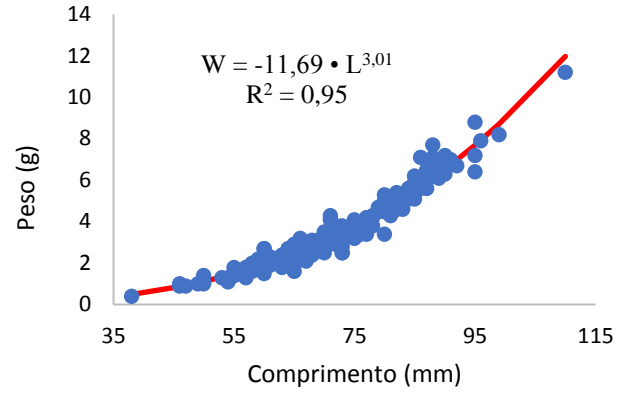
Quanto à análise das filas separadas, ao comparar os valores de b encontrados para o início e fim do período experimental para cada uma delas, verificou-se um aumento da relação comprimento-peso para a 2ª fila onde se obteve um valor de b inicial igual a 2,92 e um valor de b final igual a 3,08 (**Figura 12C** e **Figura 12D**, respectivamente); para a 3ª fila obteve-se um valor de b inicial igual a 2,90 e um b final igual a 3,16 (**Figura 12E** e **Figura 12F**, respectivamente); na 4ª fila obteve-se um valor de b inicial igual a 2,88 e um b final igual a 3 (**Figura 12G** e **Figura 12H**, respectivamente); e por último, na 5ª fila obteve-se um b inicial igual a 3,30 e um b final igual a 2,87 (**Figura 12I** e **Figura 12J**, respectivamente).

De uma forma geral, pela análise individual de cada fila observou-se que todos os valores de b se aproximam de 3, sendo possível inferir que a relação entre as variáveis comprimento e peso são simétricas, mantendo-se a proporção ao longo do tempo.

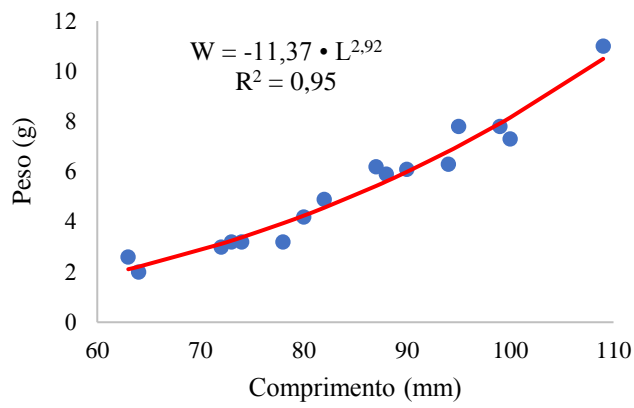
Quanto ao Fator K de condição de Fulton (**Tabela 3**), os valores encontrados para as condições iniciais e finais do ensaio, para o conjunto de todos os peixes, foram 0,89 e 0,87, respectivamente. Isto sugere que a condição corporal pode ser classificada como 'boa' e que se manteve ao longo do estudo. Entretanto, ao analisar as filas separadamente, observa-se que na 2ª fila, a condição corporal variou de 'razoável' para 'fraca'; na 3ª fila, de 'ótima' para 'fraca'; na 4ª fila, permaneceu 'razoável'; e na 5ª fila, variou de 'fraca' para 'ótima'.



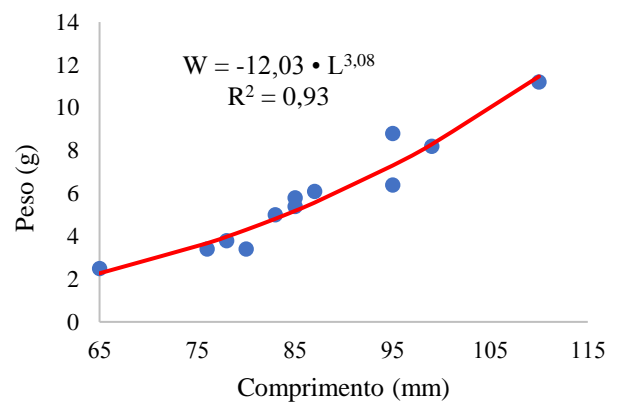
A



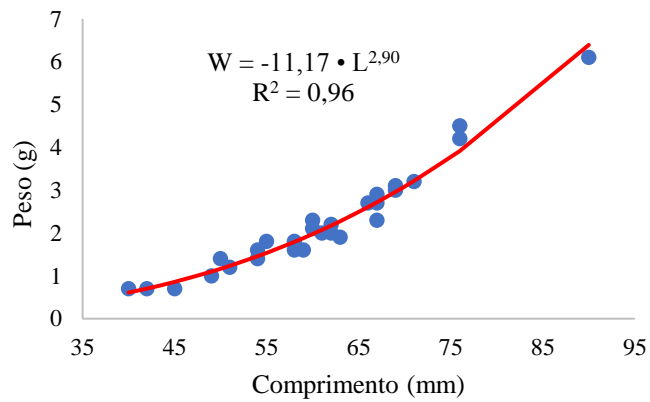
B



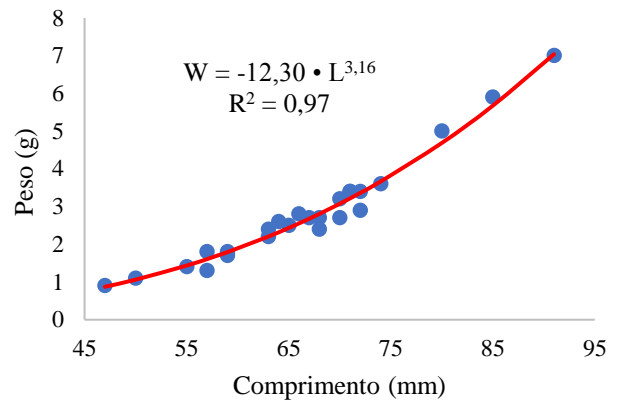
C



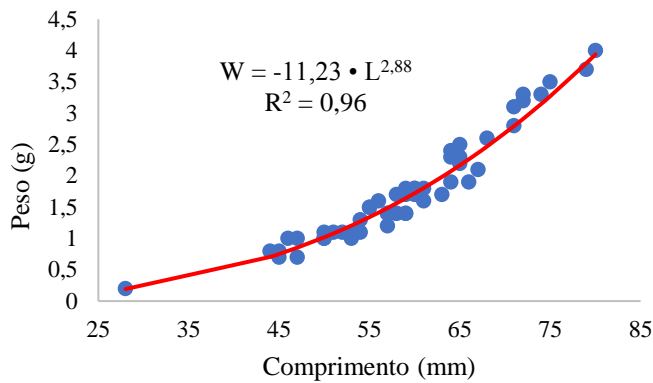
D



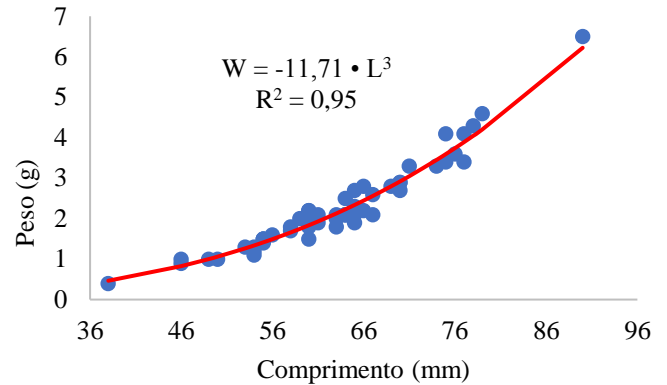
E



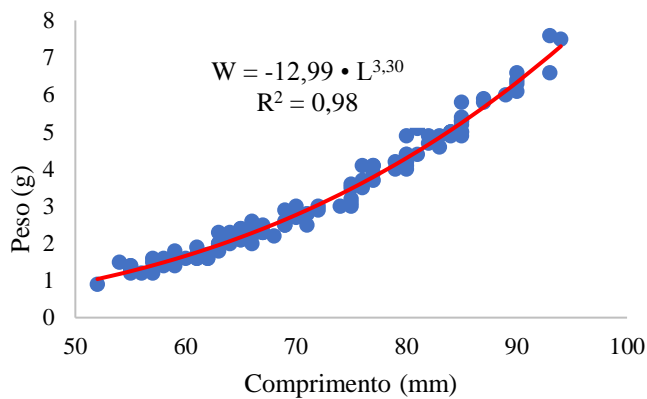
F



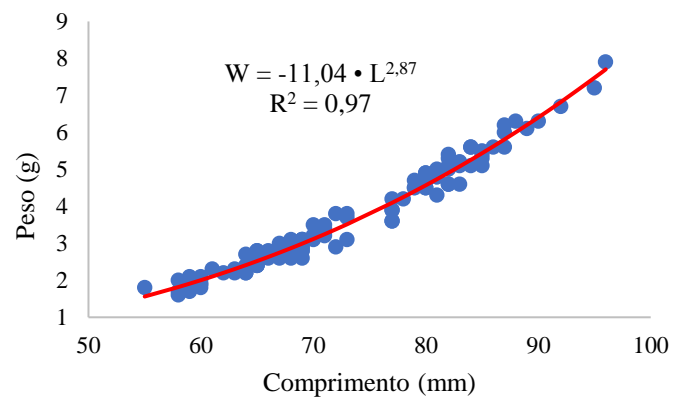
G



H



I



J

Figura 12. Relação Comprimento x Peso no: i) Geral início (**A**, $b = 2,93$) e fim (**B**, $b = 3,01$); ii) 2ª fila início (**C**, $b = 2,92$) e fim (**D**, $b = 3,08$); iii) 3ª fila início (**E**, $b = 2,90$) e fim (**F**, $b = 3,16$); iv) 4ª fila início (**G**, $b = 2,88$) e fim (**H**, $b = 3$); v) 5ª fila início (**I**, $b = 3,30$) e fim (**J**, $b = 2,87$). ● – W (g) e — – W (g) estimado.

As condições de Fulton observadas nas filas com menos peixes (2ª e 3ª, 'fraca') podem ser explicadas pelo fato de que, com menos peixes, existe um maior acúmulo de matéria orgânica não consumida. Este fenômeno pode ter ocasionado uma degradação da qualidade da água, visto que a matéria orgânica em contato com o oxigênio presente na coluna de água, leva à sua decomposição e conseqüentemente ocorre a queda nas concentrações de oxigênio dissolvido no meio (CETESB, 1997). A menor oxigenação da água, pode ter afetado negativamente o desenvolvimento dos peixes.

Tabela 3. Fatores K de condição de Fulton no início e fim do período experimental.

Tanques	Fator K da condição de Fulton (Início)	Fator K da condição de Fulton (Fim)
Geral	0,89	0,87
2ª fila	0,98	0,72
3ª fila	1,11	0,66
4ª fila	1	0,84
5ª fila	0,45	1,18

5.1.3. *Análise dos parâmetros químicos e microbiológicos das águas da produção de peixes*

Os iões nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-) encontram-se naturalmente presentes no meio ambiente, originando-se de rochas ígneas, vulcânicas, da decomposição de animais e vegetais, e do metabolismo dos peixes, participando ativamente no ciclo do azoto. Estes iões, pouco reativos e altamente solúveis em água, encontram-se totalmente dissociados na água, onde o nitrito é imediatamente oxidado para a sua forma química mais estável, o nitrato. Quer na natureza ou no corpo humano, o nitrato e o nitrito desempenham funções essenciais nos processos biológicos. No entanto, em concentrações elevadas, o nitrato pode-se tornar tóxico, estando associado a fontes de contaminação como efluentes industriais, atividades agroindustriais e agropastoris, além de má gestão de fossas sépticas e de aterros sanitários (Environment Canada, 2003; WHO, 2007; IARC, 2010; CETESB, 2022). Outro importante elemento é o fósforo (P), elemento essencial na natureza pois circula do solo para as plantas, animais e, por fim, para os sistemas de água. O fósforo é um dos elementos químicos presentes nos ácidos nucleicos, fosfolipídios e nos polímeros constituintes das paredes celulares; enquanto que na água, existe sob a forma de fosfatos, polifosfatos e fosfatos orgânicos (Monte et al., 2017).

5.1.3.1. *Nitratos*

Conforme estabelecido pelo Decreto-Lei nº 236/98, a concentração máxima permitida de nitratos para a água de rega é de 50 mg/L, uma vez que teores elevados podem impactar a produção e qualidade das culturas mais sensíveis a este ião. Com base nesta premissa, ao analisar a **Figura 13** abaixo, observa-se que, embora cada fila apresente padrões distintos ao

longo das datas analisadas, algumas revelam variações mais pronunciadas, enquanto outras mantêm concentrações relativamente estáveis.

É possível verificar, por exemplo, que na sexta semana, a 4ª fila destaca-se por exibir uma concentração notavelmente mais alta em comparação com as demais (41,37 mg/L). Mesmo assim, os dados de concentração de nitratos nas diferentes datas e filas indicam que todas as amostras permaneceram dentro da faixa considerada segura. Desta forma, os níveis de nitratos ao longo do período analisado são considerados aceitáveis, contribuindo assim para um ambiente propício ao crescimento das plantas.

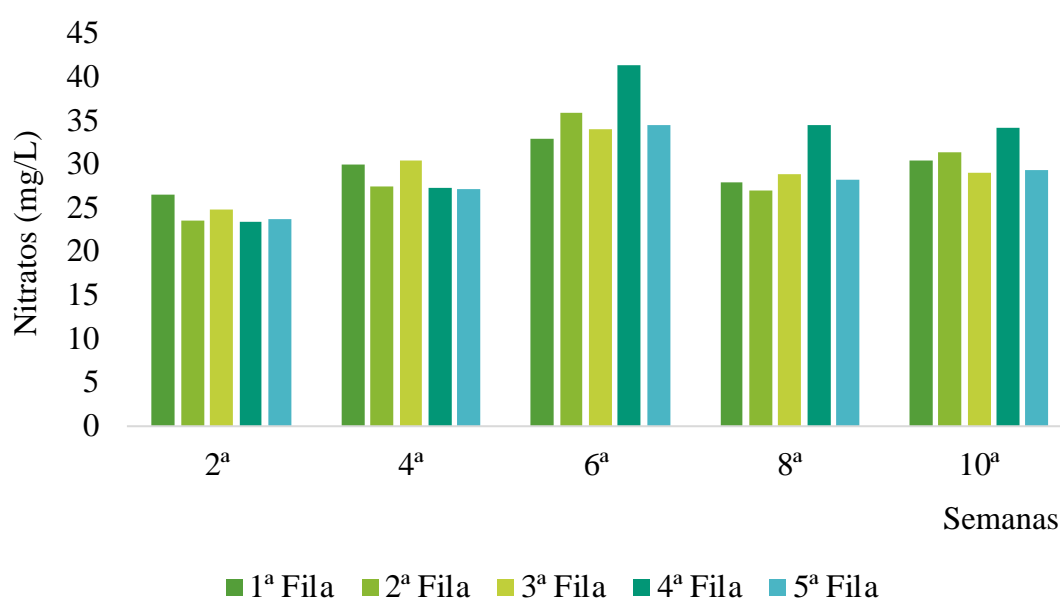


Figura 13. Concentração de nitratos (mg/L) nas águas residuais de produção de peixes, em filas com diferentes densidades, ao longo do período experimental de 10 semanas.

5.1.3.2. Nitritos

Os iões de nitritos estão, na água, geralmente em menor concentração do que os iões de nitratos. Ainda que o nitrito não esteja nas listas de parâmetros relacionados com a qualidade das águas para rega, é importante a avaliação dos seus teores, uma vez que, em altas concentrações, pode ser potencialmente tóxico para plantas e animais. No caso dos seres humanos os iões nitritos interferem com o transporte de oxigénio para os tecidos (WHO, 2007). Para além disso, considerando que o nitrito pode ser convertido em nitrato através de

processos de oxidação, e que os nitratos são uma forma mais estável e menos tóxica para as plantas, a análise dos nitritos proporciona *insights* sobre a eficiência desta conversão, influenciando, assim, a disponibilidade de azoto para as plantas. Pelos dados apresentados na **Figura 14** é observável uma tendência de diminuição da presença de nitritos, passando mesmo por ser indetetável ou a estar em concentrações extremamente baixas durante o período avaliado. Essa tendência sugere resultados consistentes, com exceções pontuais, como variações temporais para a 2ª fila e flutuações ao longo das datas para a 5ª fila. A interpretação dos dados obtidos aponta para condições favoráveis, com presença baixa ou ausência de nitritos nas águas residuais do cultivo de peixes destinadas à irrigação de agrião.

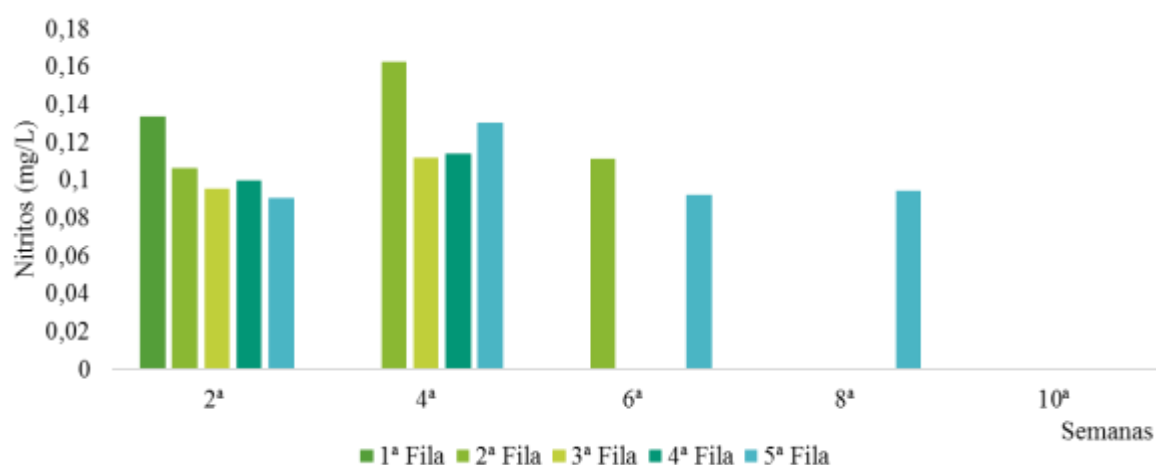


Figura 14. Concentração de nitritos (mg/L) nas águas residuais de produção de peixes, em filas com diferentes densidades, ao longo do período experimental de 10 semanas.

5.1.3.3. *Fosfatos*

Assim como ocorre com os nitritos, também não há parâmetros mínimos para o teor de fosfatos em águas de rega. No entanto, por ser uma das fontes de fósforo é importante monitorizar o seu teor em águas residuais de forma a avaliar a disponibilidade desse nutriente para as plantas. Na **Figura 15** é possível perceber, ao longo do período experimental de 10 semanas, a inexistência de fosfatos em determinados momentos, havendo também a possibilidade de o método analítico ter alto limite de deteção.

As exceções pontuais ocorrem em algumas semanas e filas, onde valores baixos, mas detetáveis, foram registados. Por exemplo, na 2ª fila, na 4ª semana, há um pequeno aumento

com a leitura de 0,09 mg/L de fosfato, enquanto na 4ª fila, na 10ª semana, há uma leitura de 0,05 mg/L de fosfato. Estes resultados sugerem que, em geral, as águas residuais do cultivo de peixes destinadas à irrigação de agriões apresentam bons níveis de fosfatos.

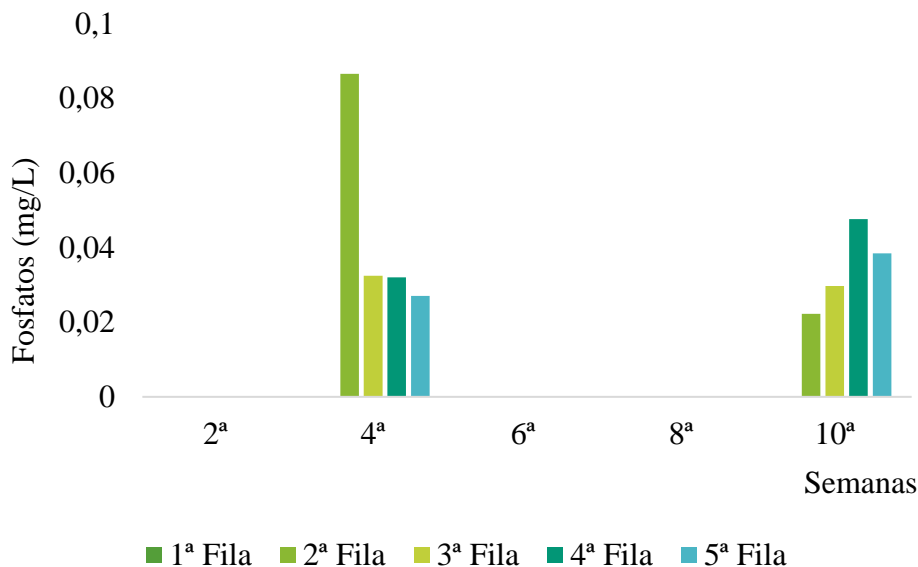


Figura 15. Concentração de fosfatos (mg/L) nas águas residuais de produção de peixes, em filas com diferentes densidades, ao longo do período experimental de 10 semanas.

5.1.4. Análises microbiológicas das águas residuais dos peixes

Relativamente aos parâmetros microbiológicos, as águas destinadas à rega devem ter em conta o valor máximo de 100 NMP/100 mL para coliformes fecais, conforme o Decreto-Lei nº 236/98. Assim, mesmo que fosse necessário analisar apenas a presença desses coliformes na água, optou-se por verificar se nas águas residuais da produção de peixe haveria microrganismos contáveis à 22 °C e à 37 °C, *enterococos* intestinais e *Clostridium perfringens*.

Deste modo, foram realizadas análises apenas no início e fim do ensaio. Nas análises, foram examinadas a água de torneira (sem sistema de filtração do sistema *Aquaneering*) e as águas de um tanque/fila (excepto a 5ª fila, que por apresentar uma maior densidade de peixes, foi realizada uma amostragem em dois tanques durante a primeira análise).

Na **Tabela 4** estão descritos os resultados referentes à quantidade de coliformes totais e *E. coli* na água de torneira e nas águas residuais do sistema de produção de peixes no início e fim do período experimental. De referir que não foi observado crescimento, no início e fim do período experimental, de *enterococos* intestinais e *Clostridium perfringens* em nenhuma das amostras de água em estudo (água de torneira e água dos tanques, com e sem peixes).

Quanto aos coliformes totais e *E. coli* foi observado crescimento nas amostras de águas em estudo, no entanto os valores obtidos apresentaram-se sempre dentro do limite permitido pela legislação (<100 NMP/100 mL).

Tabela 4. Quantificação (NMP/100 mL) de coliformes totais e *E. coli* na água de torneira e nas águas residuais do sistema de produção de peixes no início e fim do período experimental.

Amostra/Fila	Coliformes totais (NMP)		<i>E. coli</i> (NMP)	
	Início	Fim	Início	Fim
Água da torneira	0	4	4	4
1ª Fila	9	9	0	4
2ª Fila	0	0	0	0
3ª Fila	4	0	0	0
4ª Fila	93	4	4	0
5ª Fila	75	39	4	0
	3	Não analisado	0	Não analisado

A presença destes coliformes na água dos tanques de produção de peixes pode ser justificada devido a esta ter a mesma origem da água da torneira, amostra que inclusive revelou resultados positivos. No início do período experimental, os tanques com maior densidade de peixes, 4ª e 5ª fila, revelaram o maior número de colónias de microrganismos, como era expectável, sobretudo para os coliformes totais, 93 e 75 NMP/100 mL, respetivamente. No entanto, no final do período experimental, houve uma redução destes microrganismos, possivelmente atribuível à renovação das águas quando estas apresentavam níveis de saturação baixos. Esta tendência, apesar de mais acentuada, foi também observada para os restantes dos tanques quanto a *E. coli*.

Os resultados da quantificação dos microrganismos cultiváveis a 22 °C e a 37 °C podem ser consultados na **Tabela 5**. No início não foi possível contabilizar os microrganismos a 22 °C. Por essa razão, na segunda análise, as amostras foram diluídas para permitir a contagem dos mesmos a essa temperatura. Em geral, os valores encontrados foram baixos. Entretanto, os números de microrganismos a 37 °C no final do período experimental foram significativamente maiores do que os observados no início nas mesmas amostras. Essa discrepância pode ser atribuída a variações nas condições climáticas, ao ciclo de vida dos peixes (incluindo o acúmulo de fezes e comida nas águas) e ao manuseio dos tanques. Estudos futuros poderão abordar metodologias para diminuir a incidência e aparecimento deste tipo de microrganismos no sistema de aquacultura.

Tabela 5. Quantificação (UFC/100 mL) de microrganismos cultiváveis a 22 °C e 37 °C na água de torneira e nas águas residuais do sistema de produção de peixes no início e fim do período experimental.

Amostra/Fila	22 °C		37 °C	
	Início	Fim	Início	Fim
Água da torneira	Incontáveis	2,5	7	5×10^{-1}
1ª Fila	Incontáveis	$1,7 \times 10^3$	$4,6 \times 10^2$	$2,6 \times 10^2$
2ª Fila	Incontáveis	$2,2 \times 10^3$	$1,3 \times 10^2$	$1,9 \times 10^3$
3ª Fila	Incontáveis	$3,5 \times 10^3$	$1,7 \times 10^2$	1×10^3
4ª Fila	Incontáveis	$6,6 \times 10^4$	$2,4 \times 10^2$	$2,8 \times 10^5$
5ª Fila	Incontáveis	$1,4 \times 10^5$	$4,9 \times 10^2$	$1,4 \times 10^4$
	Incontáveis	Não analisado	$2,7 \times 10^2$	Não analisado

5.2. Monitorização do sistema de hidroponia

5.2.1. Avaliação do crescimento das plantas

Os agriões foram germinados em duas espumas fenólicas com tempos diferentes. As mudas provenientes da primeira espuma fenólica foram transplantadas para os perfis de hidroponia após atingirem uma idade aproximada de 45 dias, enquanto as mudas provenientes da segunda espuma fenólica foram transplantadas com cerca de 15 dias de vida.

Em virtude da discrepância na idade das mudas, os perfis relacionados aos quatro primeiros tanques de cada fila receberam as mudas mais jovens, enquanto os perfis relacionados aos quatro últimos tanques de cada fila receberam as mudas mais velhas (Esquema explicativo na seção 4.3.2, **Figura 10**).

Aproximadamente dois meses após o início da irrigação das plantas com água residual dos peixes, observou-se a morte de alguns agriões nos perfis que receberam as mudas mais antigas de agrião (**Figura 16**). Acredita-se que a mortalidade ocorreu devido à escassez de nutrientes, uma vez que essas plantas foram irrigadas exclusivamente com água de torneira durante aproximadamente 45 dias. Deste modo, pode-se afirmar que o tempo em que as mudas ficam desprovidas de nutrientes influencia diretamente em seu desenvolvimento, mesmo tendo acesso a quantidade correta de água para irrigação.



Figura 16. Mortalidade observada nos perfis de hidroponia correspondentes às plantas de agrião transplantadas com 45 dias após germinação.

Perante esta constatação, e após 9 semanas, o ensaio prosseguiu apenas com os perfis de hidroponia irrigados com os quatro primeiros tanques de cada fila da aquacultura.

A monitorização das plantas foi realizada a cada duas semanas de ensaio e consistiu na medição da parte aérea (cm) e nº de folhas; foi também medida a raiz (cm) no início e fim do ensaio experimental. Esta monitorização foi realizada não só para controlo da mortalidade e crescimento das plantas, mas também para perceber quando poderiam ser recolhidas as plantas para análise. Na **Figura 17** pode-se verificar que nas últimas duas semanas do período

experimental houve uma estabilização do crescimento das plantas, mais concretamente da parte aérea; paralelamente, o número de folhas apresentou uma tendência sempre crescente.

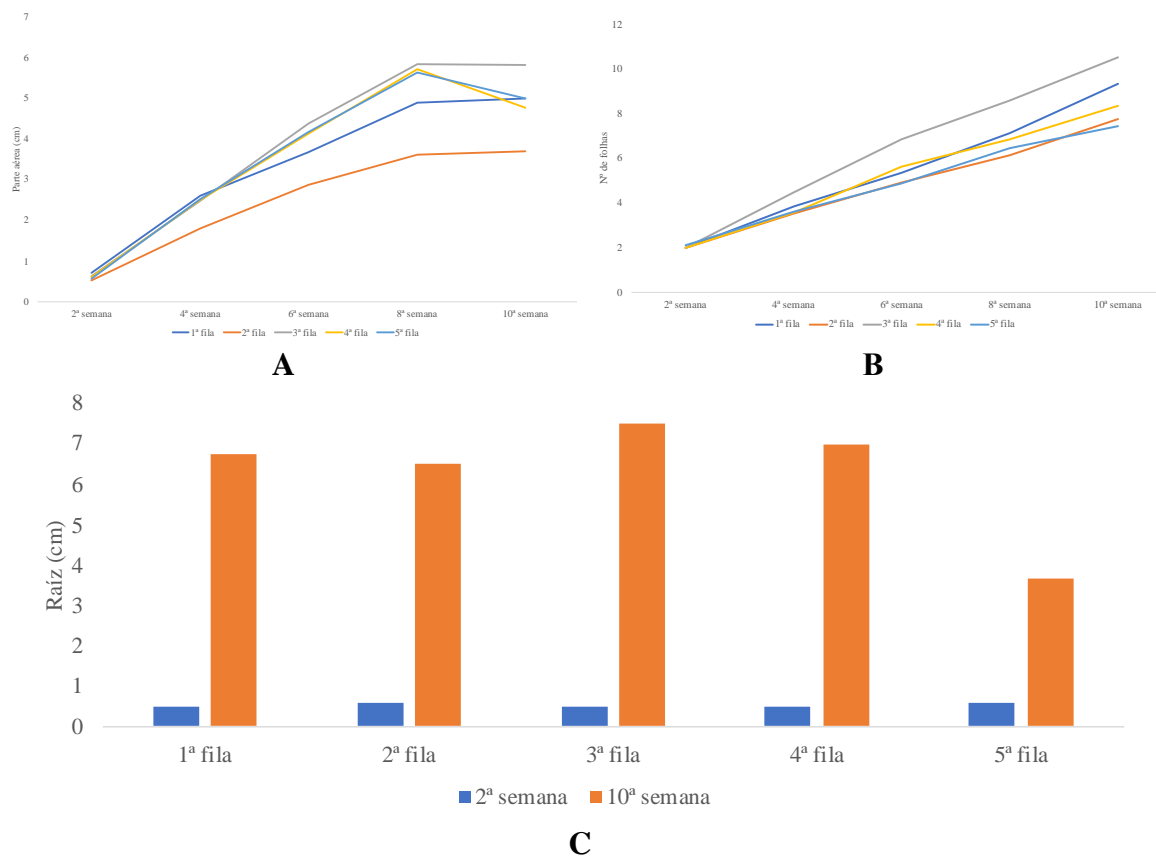


Figura 17. Monitorização do crescimento das plantas em hidroponia durante 10 semanas, relativamente ao tamanho da parte aérea (A); nº de folhas (B); tamanho da raiz (C).

Ao analisar os dados, destaca-se o significativo aumento na parte aérea das plantas da 1ª e 2ª filas, enquanto a 5ª fila apresentou um crescimento mais moderado. Quanto às raízes, todas as fileiras demonstraram um aumento, indicando desenvolvimento ao longo do ensaio. O número de folhas também registou um incremento em todas as filas, sendo a 3ª fila notavelmente superior, passando de 2 para 11 folhas.

De maneira geral, a variação no desenvolvimento das plantas entre as filas sugere possíveis diferenças nas condições de crescimento ou nos tratamentos aplicados. Considerando que o ensaio foi realizado nos meses de outono e inverno, as baixas temperaturas, dias chuvosos e nublados podem ser um dos motivos para que os agriões não tenham desenvolvido conforme o esperado. No entanto, uma análise mais aprofundada dos fatores externos, como a

disponibilidade de nutrientes nas águas residuais dos peixes, pode fornecer mais informações para compreender as razões das variações observadas.

Com a estabilização do crescimento, as plantas foram recolhidas do sistema de hidroponia, para processamento e posterior análise nutricional. O tamanho das plantas obtidas na final da 10ª semana de período experimental fica muito aquém do tamanho do agrião comercial. Mas as condições climáticas, com baixas temperaturas, não permitiram um crescimento abundante das plantas. No entanto, as plantas recolhidas estavam em perfeitas condições de salubridade, não apresentando sinais de amarelecimento, manchas, ou outros sinais indicadores da existência de pragas ou doenças (**Figura 18**).



Figura 18. Agrião obtido após 10 semanas de crescimento em sistema de hidroponia.

5.2.2. Caracterização nutricional do agrião crescido em hidroponia e comercial

Conforme mencionado anteriormente, foi observada alguma percentagem de mortalidade dos agriões nos perfis de hidroponia irrigados com a água dos quatro últimos tanques de cada fila do sistema e aquacultura. Perante isto, essas amostras de agrião foram descartadas do estudo, tendo sido realizada apenas a caracterização nutricional dos agriões colocados em hidroponia com apenas 15 dias de germinação. O objetivo primordial seria a comparação do perfil nutricional dos agriões crescidos em hidroponia com os agriões comerciais e, ao mesmo tempo, verificar a existência ou não de alguma correlação com a densidade dos peixes nos tanques.

Dados relativos à percentagem de humidade e perfil nutricional do agrião comercial e do produzido em hidroponia com diferentes densidades de peixes estão descritos na **Tabela 6**.

O estudo do teor de humidade nas plantas como o agrião, maioritariamente composto por água (Santos et al., 2012), é fundamental. Esta análise não fornece apenas informações sobre a quantidade de água e outras substâncias voláteis presentes no alimento (Silva et al., 2020), mas também é essencial para compreender a influência direta do teor de humidade na concentração de nutrientes na matéria seca da amostra em estudo.

Tabela 6. Teor de humidade, perfil nutricional e valor energético do agrião comercial e produzido em hidroponia com diferentes densidades de peixes (Média ± DP).

	Agrião hidroponia					
	Comercial	1ª Fila	2ª Fila	3ª Fila	4ª Fila	5ª Fila
Humidade (%)	92,68 ^a	70,59 ^e	77,90 ^e	45,81 ^f	72,45 ^d	81,19 ^b
Cinzas (g/100g ps)	0,49±0,07 ^e	0,63±0,02 ^d	0,92±0,01 ^a	0,73±0,03 ^b	0,23±0,02 ^f	0,69±0,02 ^c
Gordura total (g/100g ps)	0,8±0,1 ^c	0,99±0,03 ^b	0,8±0,04 ^c	1,63±0,08 ^a	1,03±0,03 ^b	0,65±0,01 ^d
Proteína (g/100g ps)	2,82±0,25 ^a	1,54±0,01 ^c	1,3±0,02 ^d	2,41±0,04 ^b	1,6±0,01 ^c	1,3±0,01 ^d
Hidratos de Carbono (g/100g ps)	43,86±0,16 ^f	89,24±0,06 ^c	86,35±0,16 ^d	91,19±0,02 ^a	89,63±0,05 ^b	85,99±0,18 ^e
Valor energético (Kcal/100g ps)	427±0,13 ^a	408±0,42 ^d	401±0,62 ^f	410±0,7 ^c	415±0,33 ^b	403±0,1 ^e

ps – peso seco; letras diferentes nas linhas significam diferenças estatísticas significativas com $p > 0,05$.

Ao analisar o teor de humidade dos agriões, tanto os comerciais quanto os produzidos em hidroponia, destaca-se que o agrião comercial registou o maior valor, atingindo 92,68%, em contraste com a média de 69,59% dos agriões de aquaponia. Ao comparar os teores de humidade específicos dos agriões de hidroponia de cada fila, observa-se uma variação estatística significativa. Notavelmente, os agriões da 5ª fila apresentaram o maior teor de humidade, atingindo 81,19%, enquanto os da 3ª fila registaram o menor valor, com 45,81%. A disparidade expressiva deste último valor em relação aos demais levanta a possibilidade de algum erro nas análises. Entretanto, como não havia mais massa de agrião de hidroponia, não foi possível repetir a análise.

Segundo Zambiasi (2010), o teor de cinzas nos alimentos refere-se ao resíduo inorgânico ou mineral fixo, remanescente da queima da matéria orgânica em mufla a altas temperaturas. Ao avaliar o teor de cinzas no agrião, observa-se que o agrião comercial apresenta um valor de 0,49 g/100g ps, enquanto a média para os agriões de hidroponia é de 0,6 g/100g ps. Apesar

das discrepâncias nos valores entre os agriões das diferentes filas, especialmente os agriões da 2ª fila (0,9 g/100g ps) e da 4ª fila (0,2 g/100g ps), é notável que, de maneira geral, os teores de cinzas nos agriões de hidroponia foram comparáveis aos do agrião comercial. Essa consistência sugere uma uniformidade nas propriedades minerais entre os agriões cultivados no sistema de hidroponia em comparação com o agrião comercial.

Relativamente às gorduras, estas desempenham um papel crucial como principais fontes de energia e facilitadores da absorção das vitaminas A, D, E e K, sendo essenciais para o funcionamento saudável do organismo (BVMS, 2011). Ao analisar os teores de gorduras nos agriões, destaca-se que os agriões da 3ª fila apresentaram o maior teor, atingindo 1,63 g/100g ps, enquanto os agriões da 5ª fila demonstraram o menor valor, registrando 0,65 g/100g ps. Ao comparar os demais agriões, nota-se que o agrião comercial e os agriões da 3ª fila obtiveram valores próximos, 0,8 e 0,83 g/100g ps, respectivamente. Para além disso, os agriões da 1ª e 4ª fila também apresentaram valores bastante próximos entre si, registrando 0,99 g/100g ps e 1,03 g/100g ps, respectivamente. Ao analisar o teor de gordura do agrião comercial (0,8 g/100g ps) em relação à média dos valores dos agriões de hidroponia (1 g/100g ps), de um modo geral, conclui-se que os valores estão próximos, mesmo que os agriões de hidroponia tenham apresentado teores ligeiramente mais elevados.

As proteínas são importantes macronutrientes nos alimentos, sendo fonte de energia e aminoácidos, contribuindo para o crescimento e manutenção do organismo. Além disso, possuem diversas propriedades físico-químicas e sensoriais nos alimentos, atuando também como ingredientes funcionais e promotores da saúde (Shahidi & Zhong, 2008). No contexto das proteínas vegetais, estas proporcionam benefícios à saúde além dos nutrientes essenciais característicos de cada espécie. Nos últimos anos, houve um crescente interesse sobre a inserção de proteínas vegetais em produtos alimentares, devido às mudanças da dieta humana e a procura por opções mais saudáveis (Betoret et al., 2011). Nos vegetais, as proteínas estão presentes em diferentes partes de sua estrutura, como sementes, talos, nós, córtex, pecíolos, folhas, flores, frutos, raízes, rizomas e tubérculos (Bildanova et al., 2013).

Os dados revelam que o agrião comercial obteve o maior teor de proteína, com 2,82 g/100g ps, enquanto os agriões da 2ª e 5ª filas registaram os menores valores, ambos apresentando 1,3 g/100g ps. Notavelmente, entre os agriões de hidroponia, os produzidos na 3ª fila

alcançaram o maior teor de proteína, 2,4 g/100g ps. Estes resultados podem sugerir uma possível correlação entre a presença de 4 peixes nos tanques e os valores mais elevados de proteína nos agriões de hidroponia desta fila.

Nas plantas os hidratos de carbono são essenciais para o armazenamento de energia, integridade da parede celular, crescimento, desenvolvimento e respostas às mudanças e estresses ambientais (Trouvelot et al., 2014). Os hidratos de carbono vegetais também facilitam as interações com microrganismos benéficos e fornecem medidas defensivas contra microrganismos patogénicos associados às plantas. Nos humanos e animais, os hidratos de carbono são importantes fontes de energia (Low et al., 2023).

A análise do teor de hidratos de carbono nos agriões revela uma notável discrepância entre o agrião comercial e os agriões de hidroponia. O agrião comercial apresentou um valor de 3,22 g/100g ps, enquanto os agriões de hidroponia variaram de 16,14 g/100g ps a 49,41 g/100g ps, sendo o valor mais elevado registado na 3ª fila. Os resultados obtidos sugerem uma possível correlação entre a presença de 4 peixes nos tanques da 3ª fila e teores mais elevados de hidratos de carbono nos agriões aquapônicos desta fila, assim como verificado para os teores de gordura.

Finalmente, o valor energético representa o somatório da energia proveniente principalmente dos hidratos de carbono, proteínas e gorduras. O agrião comercial apresentou um valor energético de 427,46 Kcal/100g ps. No que se refere aos agriões de hidroponia, a média dos valores foi de 407,76 Kcal/100g ps, com variação entre 402,09 Kcal/100g ps e 415 Kcal/100g ps, correspondendo aos agriões da 2ª e 4ª filas, respetivamente. Estes dados indicam que os agriões de hidroponia, em média, não superaram o valor energético do agrião comercial.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir da monitorização do sistema de aquacultura e do sistema de hidroponia oferecem informações valiosas sobre a produção de peixes e vegetais em ambiente controlado. Na análise dos parâmetros físico-químicos da água utilizada na aquacultura, observou-se uma estabilidade geral ao longo das 10 semanas do estudo. Embora tenham sido identificadas variações significativas na temperatura, concentração de oxigénio dissolvido e percentagem de saturação, os níveis permaneceram dentro dos limites aceitáveis para a criação de peixes. No entanto, a mortalidade dos peixes em tanques com maior densidade populacional sugere a necessidade de atenção especial à oxigenação da água em situações de alta densidade.

A avaliação do crescimento e da condição física dos peixes revelou uma relação estável entre o comprimento e o peso ao longo do período experimental. Apesar das variações observadas nas diferentes filas de tanques, os valores médios do fator de condição de Fulton indicam uma boa condição corporal dos peixes ao longo do estudo. Por outro lado, a presença de coliformes nas águas residuais dos tanques, embora dentro dos limites legais, aponta para a necessidade de monitorização contínua e possíveis melhorias no sistema de tratamento de água. Na análise dos parâmetros químicos e microbiológicos das águas residuais, os níveis de nitratos, nitritos e fosfatos mantiveram-se dentro dos padrões de segurança ao longo do estudo.

Quanto à hidroponia, apesar da mortalidade inicial das plantas devido à escassez de nutrientes, aquelas irrigadas com água residual dos tanques de aquacultura demonstraram um crescimento satisfatório ao longo do período experimental. A análise nutricional dos agriões revelou teores comparáveis aos do agrião comercial, sugerindo o potencial da aquaponia como uma fonte sustentável de alimentos ricos em nutrientes.

Em conclusão, os resultados desta pesquisa fornecem uma base sólida para o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas integrados de aquacultura e hidroponia. Através da monitorização contínua dos parâmetros ambientais e da implementação de práticas de cultivo adequadas, é possível otimizar a produção de peixes e vegetais, promovendo a sustentabilidade e a segurança alimentar a longo prazo. No entanto, são

necessários mais estudos para entender completamente o potencial e os desafios desses sistemas em diferentes contextos e condições ambientais.

7. PERSPETIVAS FUTURAS

1) Sistema de aquaponia:

- Estudos futuros podem ser focados na otimização do sistema de filtração para reduzir a presença de coliformes e outros microrganismos na água dos tanques;
- Estudos sobre a influência de diferentes densidades populacionais de peixes nos parâmetros físico-químicos da água e no crescimento das plantas podem fornecer informações muito importantes sobre o manuseio eficiente do sistema.

2) Sistema de hidroponia:

- Estudos futuros podem explorar a implementação de sistemas de recirculação de nutrientes para melhorar a eficiência no uso de nutrientes e reduzir os custos de produção;
- A investigação sobre o uso de técnicas de cultivo controlado, como iluminação artificial e controlo climático, pode ajudar a minimizar os efeitos adversos das variações sazonais no crescimento das plantas;
- Estudos de mercado e aceitação do consumidor podem ser realizados para avaliar a viabilidade económica e a procura por produtos cultivados em sistemas de aquaponia e hidroponia, especialmente considerando a sua potencial vantagem em termos de sustentabilidade e segurança alimentar.

8. REFERÊNCIAS

- Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico. (2013). *Monitoramento da qualidade da água de rios e reservatórios*. Ministério do Meio Ambiente.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2023). *Solo e biodiversidade - produção em aquicultura*. <https://Rea.Apambiente.Pt/Content/Produ%C3%A7%C3%A3o-Em-Aquicultura>.
- Alexandrino, P., Almeida, P. R. A., Bochechas, J., Cortes, R., Domingos, F., Madeira, F., & Magalhães, F. (2005). *Squalius alburnoides* (Cabral M. J. et al., Ed.). Instituto da Conservação da Natureza.
- Ansari, A. A., Gill, S. S., & Khan, F. A. (2010). Eutrophication: threat to aquatic ecosystems. *Eutrophication: Causes, Consequences and Control*, 143–170. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9625-8_7
- AOAC. (1999). *Official methods of analysis of AOAC International: Vol. Volume 2* (16th edition). AOAC (Association of Official Analytical Chemists) International.
- AQUANEERING. (2010). Stand alone aquatic housing system. User's manual (version 4.0). San Diego, CA92126 USA. <http://www.aquaneering.com>
- Barbosa, Araújo, H. M., Bonfante, J. W., & Villela Junior, L. V. E. (2009). Avaliação de quatro cultivares de agrião cultivado hidroponicamente em Garça (SP). *Revista Científica Eletrônica de Agronomia*, 1(15), 1–7.
- Barros, L., Pereira, E., Calhella, R. C., Dueñas, M., Carvalho, A. M., Santos-Buelga, C., & Ferreira, I. C. F. R. (2013). Bioactivity and chemical characterization in hydrophilic and lipophilic compounds of *Chenopodium ambrosioides* L. *Journal of Functional Foods*, 5(4), 1732–1740. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.07.019>
- Betoret, E., Betoret, N., Vidal, D., & Fito, P. (2011). Functional foods development: Trends and technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 22(9), 498–508. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.05.004>
- Bildanova, L. L.; Salina, E. A., & Shumny, V. K. (2013). Main properties and evolutionary features of antifreeze proteins. *Russian Journal of Genetics: Applied Research*, 3(1), 66–82.
- Boxman, S. E., Nystrom, M., Ergas, S. J., Main, K. L., & Trotz, M. A. (2018). Evaluation of water treatment capacity, nutrient cycling, and biomass production in a marine

- aquaponic system. *Ecological Engineering*, 120, 299–310.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2018.06.003>
- Boyd, C. E. (1990). *Water Quality in Ponds for Aquaculture*. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University.
- Braña, F., A. G. Nicieza & M. M. Toledo. (1992). Effects of angling on population structure of brown trout, *Salmo trutta* L., in mountain streams of Northern Spain. *Hydrobiologia*, 237: 61–66.
- Braz Filho, M. S. P. (2000). *Qualidade na produção de peixes em sistemas de recirculação de água* [Monografia, Centro Universitário Nove de Julho].
- Braz, F., Figueiredo Neto, E., Sartori, R., Colovato, G., Manchini, L., & Vilella, L. (2008). Cultivo hidropônico de agrião d'água em Garça (SP). *Revista Científica Eletrônica de Agronomia*. www.revista.inf.br-www.editorafaef.com.br-www.faeef.br.
- BVSMS. (2011). Rótulos de alimentos: orientações ao consumidor. https://bvsms.saude.gov.br/bvs/dicas/246_rotulos_alimentos.html#:~:text=%2D%20Gorduras%20totais%3A%20as%20gorduras%20s%C3%A3o,de%20origem%20animal%20quanto%20vegetal.
- Cano, M. da P. V. P. (2019). *Avaliação do sistema de produção do agrião de água (*Nasturtium officinale*) na empresa VAISA, S.A.* [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa].
- Carneiro, P. C. F., Moraes, C. A. R. S., Nunes, M. U. C., Maria, A. N., & Fujimoto, R. Y. (2015). Produção integrada de peixes e vegetais em aquaponia. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Tabuleiros Costeiros, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*, 1, 1–27. www.embrapa.com.br
- Carrijo, O. A., & Makishima, N. (2000). Princípios de hidroponia. *Embrapa*, 1–27.
- Castellani, D., Fernando, A., Camargo, M., & Abimorad, E. G. (2009). Aquaponia: aproveitamento do efluente do berçário secundário do Camarão-da-Amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) para produção de alface (*Lactuca sativa*) e agrião (*Rorippa nasturtium aquaticum*) hidropônicos. *Bioikos – Título Não-Corrente*, 23(2), 67–75. <https://periodicos.puc-campinas.edu.br/bioikos/article/view/660>
- CETESB. (1997). *Apostila de Investigação de Mortandade de Peixes*.

- CETESB. (2022). Ficha de Informação Toxicológica. Nitrato e Nitrito. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental.
- Chaudhary, R., Kumar, S., Malik, J., Singh, G., & Siroliya, V. K. (2023). A review of the phytochemical and pharmacological potential of the watercress plant (*Nasturtium officinale*): a medicinal plant. *International Journal of Pharmaceutical and Biological Science Archive NLM*, 11. <https://plantic.in/products/water-cress-imported>
- Chen, R. Z., & Wong, M. H. (2016). Integrated wetlands for food production. *Environmental Research*, 148, 429–442. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2016.01.007>
- Collares-Pereira, M. J., Alves, M. J., Ribeiro, F., Domingos, I., Almeida, P. R., da Costa, L., Gante, H., Filipe, A. F., Aboim, M. A., Rodrigues, P. M., & Magalhães, M. F. (2021). Guia dos peixes de água doce e migradores de Portugal continental. Edições Afrontamento, Porto.
- Cometti, N. N. (2003). *Nutrição mineral da alface (Lactuca sativa L.) em cultura hidropônica - sistema NFT* [Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro]. <https://tede.ufrjr.br/handle/jspui/3846>
- Contini, G. G., Belo, L. R., & Branquinho, R. G. (2020). Produção consorciada de tilápias e vegetais em sistema de aquaponia. *Agropecuária Técnica*, 41(1–2), 41–46. <https://doi.org/10.25066/AGROTEC.V41I1-2.49804>
- Cozim-Melges, F., Ripoll-Bosch, R., Veen, G. F., Oggiano, P., Bianchi, F. J. J. A., van der Putten, W. H., & van Zanten, H. H. E. (2024). Farming practices to enhance biodiversity across biomes: a systematic review. *Npj Biodiversity*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.1038/s44185-023-00034-2>
- Decreto Lei nº 236/98 de 1 de Agosto do Ministério do Ambiente. Diário da República: I série A, nº 176 (1998). Acedido a 03 jan. 2024. Disponível em https://www.apambiente.pt/dqa/assets/16-decreto_lei-236_98.pdf.
- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water* 2016, 8(10), 467. <https://doi.org/10.3390/W8100467>
- Direção Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos. (2022). *Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa 2021-2030*.

- Diver, S. (2006). *Aquaponics-integration of hydroponics with aquaculture*.
www.aqua.ait.ac.th/
- Elliott, J. M. (1994). *Quantitative ecology and the brown trout*. University Press, Oxford. 286 pp.
- El-Murr, A. H., & Hasan, M. P. (2020). The importance of water quality parameters for fish health: a review. *Aquaculture International*, 28(1), 1-24.
- Environment Canada (2003). Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: nitrate ion. Ottawa (ON): Environment Canada, Water Policy and Coordination Directorate, National Guidelines and Standards Office; 1–115 (Report No. 1-6; <http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/En1-34-6-2003E.pdf>).
- Food and Agriculture Organization. (2022). The state of world fisheries and aquaculture 2022. In *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*.
<https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Froese (2006) Froese R. Cube law, condition factor and weight–length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*. 2006;22:241–253. doi: 10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x.
- Gabinete de Planejamento e Políticas. (2003). *Crop Production Yearbook*. Castel.
- Gabinete de Planejamento e Políticas. (2006). *Crop Production Yearbook*. Castel.
- Geraldes, A. M., & Calheiros, C. (2019). A importância de conhecer o funcionamento e os serviços ambientais prestados pelos ecossistemas aquáticos dulçaquícolas. In *Encontro Nacional de Educação em Ciências & III International Seminar of Science Education*. U. Porto Edições. <https://doi.org/10.24840/978-989-746-198-9>
- Goddek, S., & Keesman, K. J. (2018). The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. *Desalination*, 428, 76–85.
<https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2017.11.024>
- Guimarães, R. F. B., Nascimento, R. do, Ramos, J. G., Lima, S. C. de, Cardoso, J. A. F., & Melo, D. F. de. (2017). Acúmulo de fitomassa de cultivares de alface hidropônica submetidas à salinidade. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 11(8), 2141–2151.
<https://doi.org/10.7127/rbai.v11n800701>

- Hirata, A. C. S., & Hirata, E. K. (2015). Desempenho produtivo do agrião d'água cultivado em solo sob telas de sombreamento. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(10), 895–901. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001000005>
- Hussain, A., Iqbal, K., Aziem, S., Mahato, P., & Negi, A. K. (2014). A review on the science of growing crops without soil (soilless culture) - a novel alternative for growing crops. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences.*, 7(11), 833–842. www.ijagcs.com
- IARC (2010). Ingested nitrate and nitrite and cyanobacterial peptide toxins. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 1–464 (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 94).
- INAG I.P. (2008). Manual para a avaliação biológica da qualidade da água em sistemas fluviais segundo a Directiva Quadro da Água - Protocolo de amostragem e análise para a fauna piscícola. Ministério do Ambient. do Ordenam. do Territ. e do Desenvolv. Reg. Inst. da Água, I.P.
- ISO 14189:2013 – Water Quality – Enumeration of clostridium perfringens – method using membrane filtration. International Organization for Standardization (ISO), Suíça.
- ISO 6222:1999 (E) – Water Quality – Enumeration of culturable micro-organisms Colony count by inoculation in a nutrient agar culture medium. International Organization for Standardization (ISO), Suíça.
- ISO 7899-2:2000 – Water Quality – Detection and enumeration of intestinal enterococci – Part 2: Membrane filtration method. International Organization for Standardization (ISO), Suíça.
- ISO 9308-2:1990 (E) – Water Quality – Detection and enumeration of coliform organisms, thermotolerant coliform organisms and presumptive *Escherichia coli* - Part 2: Multiple tube (most probable number) method. International Organization for Standardization (ISO), Suíça.
- Kraskura, K., Hardison, E. A., & Eliason, E. J. (2023). Body size and temperature affect metabolic and cardiac thermal tolerance in fish. *Scientific Reports*, 13(1), 17900. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44574-w>
- Le Cren, E. D., 1951: The length–weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*). *J. Anim. Ecol.* 20, 201–219.

- Leal, M. C., Rocha, R. J. M., Rosa, R., & Calado, R. (2018). Aquaculture of marine non-food organisms: what, why and how? *Reviews in Aquaculture*, 10(2), 400–423. <https://doi.org/10.1111/RAQ.12168>
- Lennard, W. A. (2005). *Aquaponic integration of Murray Cod (Maccullochella peelii peelii) aquaculture and lettuce (Lactuca sativa) hydroponics* [Doctoral Dissertation, RMIT University].
- Lennard, W. A. (2017). *Commercial aquaponic systems: integrating recirculating fish culture with hydroponic plant production*. Wilson Lennard.
- Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: the basics. In *Aquaponics Food Production Systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future* (pp. 113–143).
- Levy, N., & Barreto, P. (2011). *As técnicas de hidroponia*, 8(9).
- Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67–74. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2014.09.023>
- Love, D. C., Uhl, M. S., & Genello, L. (2015). Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering*, 68, 19–27. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2015.07.003>
- Low, K. E., Tingley, J. P., Klassen, L., King, M. L., Xing, X., Watt, C., Hoover, S. E. R., Gorzelak, M., & Abbott, D. W. (2023). Carbohydrate flow through agricultural ecosystems: Implications for synthesis and microbial conversion of carbohydrates. *Biotechnology Advances*, 69, 108245. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108245>
- Magalhães, M. F., Amaral, S. D., Sousa, M., Alexandre, C. M., Almeida, P. R., Alves, M. J., Cortes, R., Farrobo, A., Filipe, A. F., Franco, A., Jesus, J., Oliveira, J. M., Pereira, J., Pires, D., Reis, M., Ribeiro, F., Robalo, J. I., Sá, F., Santos, C. S., Teixeira, A., & Domingos, I. (2023). Livro Vermelho dos Peixes Dulciaquícolas e Diádmomos de Portugal Continental. FCIências.ID & ICNF, I.P. Lisboa.
- McMurtry, M. (1990). *Performance of an integrated aquaculture-olericulture system as influenced by component ratio* [Doctoral dissertation, North Carolina State University].

- Melo, R. A. de C., Vendrame, L. P. de C., Madeira, N. R., Blind, A. D., & Vilela, N. J. (2017). *Caracterização e diagnóstico de cadeia produtiva de brassicas nas principais regiões produtoras brasileiras*. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1083914/caracterizacao-e-diagnostico-de-cadeia-produtiva-de-brassicas-nas-principais-regioes-produtoras-brasileiras>
- Metcalf, N. B. (1994). The role of behaviour in determining salmon growth and development. *Aquaculture and Fisheries Management*, 25: 67–76.
- Mhadhbi, H. (2012). Plant hydroponic cultivation: a support for biology research in the field of plant-microbe-environment interactions. In *Hydroponics: A Standard Methodology for Plant Biological Researches*.
- Monsees, H., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Decoupled systems on trial: eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. *PLOS ONE*, 12(9), e0183056. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0183056>
- Monsees, H., Suhl, J., Paul, M., Kloas, W., Dannehl, D., & Würtz, S. (2019). Lettuce (*Lactuca sativa*, variety Salanova) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer. *PLOS ONE*, 14(6), e0218368. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0218368>
- Monte, M. H. M. do; Santos, M. T. L. dos.; Barreiros, A. M. & Albuquerque, A. (2017). Tratamento de Águas Residuais - Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico. ESAR.
- Obodai, M., Narh Mensah, D., Fernandes, Â., Kortei, N., Dzomeku, M., Teegarden, M., Schwartz, S., Barros, L., Prempeh, J., Takli, R., & Ferreira, I. (2017). Chemical Characterization and Antioxidant Potential of Wild Ganoderma Species from Ghana. *Molecules*, 22(2), 196. <https://doi.org/10.3390/molecules22020196>
- Ohse, S., Carvalho, S. M., Rezende, B. L. A., Oliveira, J. B. de., Manfron, P. A., & Dourado Neto, D. (2012). Produção e composição química de hortaliças folhosas em hidroponia. *Biosci. j. (Online)*, 155–163. <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/10050/8473>
- Oliveira, D. R., De Oliveira, W. C., Da Silva, A. O., Da, B. G. M., Bezerra, C., De Sousa, G. G., & De Lacerda, C. F. (2023). Hydroponic watercress production through fish farming

- water reuse and varied nutrient solution recirculation times. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 27(12), 919–926. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V27N12P919-926>
- Orsini, F., Michelon, N., & Gianquinto, P. G. (2010). Simplified soilless systems for urban vegetable production. In *Hortis – Horticulture in towns for inclusion and socialisation*.
- Payne, A. C., Clarkson, G. J. J., Rothwell, S., & Taylor, G. (2015). Diversity in global gene expression and morphology across a watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.) germplasm collection: first steps to breeding. *Horticulture Research*, 2. https://doi.org/10.1038/HORTRES.2015.29/41956520/41438_2015_ARTICLE_BFHORTRES201529.PDF
- Rakocy, J. E. (1993). Integration of vegetable hydroponics with fish culture: a review. *Techniques for Modern Aquaculture*.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2016). *Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture*. <http://osufacts.okstate.edu>
- Rakocy, J., Masser, M., & Losordo, T. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics — integrating fish and plant culture*.
- Ramachandra, T. V., & Solanki, M. (2007). *Ecological assessment of lentic water bodies of Bangalore*.
- Regulamento (UE) n. o 1169/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Outubro de 2011, relativo à prestação de informação aos consumidores sobre os géneros alimentícios, Jornal Oficial (2011). <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/1169/oj>
- Ricker W. E. (1975). Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. Bull. 191 of the Depart. Of the Environment Fisheries and Marine Service, Ottawa, 382 pp.
- Sanchez, S. V. [UNESP]. (2007). *Avaliação de cultivares de alface crespa produzidas em hidroponia tipo NFT em dois ambientes protegidos em Ribeirão Preto (SP)* [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”]. <https://doi.org/10.17616/R31NJN39>
- Santos, J., Mendiola, J. A., Oliveira, M. B. P. P., Ibáñez, E., & Herrero, M. (2012). Sequential determination of fat - and water-soluble vitamins in green leafy vegetables during

- storage. *Journal of Chromatography A*, 1261, 179–188.
<https://doi.org/10.1016/J.CHROMA.2012.04.067>
- Scavone, O., & Panizza, S. (1973). Sobre a morfologia e anatomia do *Nasturtium officinale* E. Brown. *Boletim de Botânica*, 1(0), 117–148. <https://doi.org/10.11606/ISSN.2316-9052.V1I0P117-148>
- Shahidi, F., & Zhong, Y. (2008). Bioactive Peptides. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 91(4), 914–931. <https://doi.org/10.1093/jaoac/91.4.914>
- Shankar, S., Segaran, G., Sundar, R. D. V., & Sathiavelu, M. (2019). *Brassicaceae* - a classical review on its pharmacological activities. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 55(1), 107–113. www.globalresearchonline.net
- Silva, R. S., Silva, A. C. da, & Linhares, J. F. P. (2020). Determinação dos teores de umidade e cinzas totais em erva-cidreira (*lippia alba*) coletada na zona rural de São Luís – MA/ Determination of moisture content and total ash in lemon balm (*lippia alba*) collected in rural area of São Luís – MA. *Brazilian Journal of Development*, 6(9), 73800–73808. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-729>
- Soares, M. C., Cardoso, S. C., Fernandes, P., Alves, J. C., Anastácio, P. M., & Banha, F. (2023). First record of intraspecific cleaning behavior by the threatened leuciscidae *Squalius alburnoides* (Steindachner, 1866) at the Guadiana River basin (Portugal). *Journal of Fish Biology*. <https://doi.org/10.1111/JFB.15571>
- Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S., Scheibe, G., & Schmidt, U. (2016). Advanced aquaponics: evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. Conventional hydroponics. *Agricultural Water Management*, 178, 335–344. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.10.013>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(50), 20260–20264. https://doi.org/10.1073/PNAS.1116437108/SUPPL_FILE/PNAS.201116437SI.PDF
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>

- Trouvelot, S., Héloir, M.-C., Poinssot, B., Gauthier, A., Paris, F., Guillier, C., Combier, M., Trdá, L., Daire, X., & Adrian, M. (2014). Carbohydrates in plant immunity and plant protection: roles and potential application as foliar sprays. *Frontiers in Plant Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00592>
- Tyson, R. V., Treadwel, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1), 6–13. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6>
- Veloso, A., Sempiterno, C., Calouro, F., Rebelo, F., Pedra, F., Castro, I. V., Gonçalves, M. da C., Marcelo, M. da E., Pereira, P., Fareleira, P., Jordão, P., Mano, R., & Fernandes, R. (2022). *Manual de fertilização das culturas*, 3. Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, INIAV.
- WHO. (2007). Nitrate and nitrite in drinking-water – Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2007.
- Wurts, W. A., & Durborow, R. M. (1992). Interactions of pH, carbon dioxide, alkalinity and hardness in fish ponds. Aquaculture program. SRAC-public, (464), 1-4.
- Xu, M., Jin, Z., Simsek, S., Hall, C., Rao, J., & Chen, B. (2019). Effect of germination on the chemical composition, thermal, pasting, and moisture sorption properties of flours from chickpea, lentil, and yellow pea. *Food Chemistry*, 295, 579–587. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.16>
- Zambiasi, R. C. (2010). Análise físico química de alimentos. Pelotas: Editora Universitária/UFPEL, 202p.
- Zimmermann, S., Ribeiro, R. P., Vargas, L., & Moreira, H. L. M. (2001). Fundamentos da moderna aquíicultura. Canoas: Ed. ULBRA, 200 p.

Material Suplementar nº 1

Composição do caldo laurel sulfato triptona:

Triptona (Merck, Darmstadt)	20 g
Cloreto de sódio (Panreac, Barcelona)	5 g
Água destilada	1000 mL

Ajustar pH para 7,5. Distribuir 5 mL para tubos Durham e autoclavar.

Material Suplementar nº 2

Composição do caldo EC:

Tripcase ou triptose (Merck, Darmstadt)	20 g
Sais biliares (Oxoid, Reino Unido)	1,5 g
Lactose (Merck, Darmstadt)	5 g
K ₂ HPO ₄ (Merck, Darmstadt)	4 g
KH ₂ PO ₄ (Panreac, Barcelona)	1,5 g
NaCl (Panreac, Barcelona)	0,065 g
Água destilada	1000 mL

Ajustar pH para 6,9 ± 0,2. Distribuir 8 mL para tubos Durham e autoclavar.