

Sustentabilidade na aquicultura moderna: estratégias para redução dos impactos ambientais e otimização do uso dos recursos hídricos

Sustainability in modern aquaculture: strategies for reducing environmental impacts and optimizing water resource use

Sérgio Rodrigues da Silva; Luana da Costa; Jose Leocyvan Gomes; Ana Helena Carneiro; Hilton Amaral Junio

RESUMO

A crescente demanda por alimentos de origem aquática tem impulsionado a expansão da aquicultura em diferentes regiões do mundo, tornando necessária a adoção de estratégias que conciliam aumento da produção, preservação ambiental e uso eficiente dos recursos naturais. Nesse contexto, a sustentabilidade passou a ocupar posição central nas discussões sobre o futuro da atividade aquícola, especialmente diante dos desafios relacionados ao consumo de água, à geração de resíduos e aos impactos ambientais decorrentes da intensificação produtiva. O presente estudo teve como objetivo analisar as principais estratégias de sustentabilidade aplicadas à aquicultura moderna voltadas à redução dos impactos ambientais e à otimização do uso dos recursos hídricos. A pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica qualitativa, realizada a partir de publicações dos últimos dez anos, consultadas nas bases de dados Scielo, Google Scholar, Periódicos CAPES, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Frontiers, MDPI e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações. Os resultados evidenciaram que tecnologias como os Sistemas de Recirculação Aquícola (RAS), a Aquicultura Multitrófica Integrada (IMTA) e as práticas fundamentadas na economia circular contribuem significativamente para a redução do consumo de água, o reaproveitamento de nutrientes e a mitigação dos impactos ambientais. Conclui-se que a integração entre inovação tecnológica, gestão ambiental e planejamento sustentável representa um caminho essencial para fortalecer a eficiência produtiva e garantir a sustentabilidade da aquicultura em longo prazo.

Palavras-chave: aquicultura sustentável; recursos hídricos; impactos ambientais; inovação tecnológica.

ABSTRACT

The growing demand for aquatic-based foods has driven the expansion of aquaculture in different regions of the world, making it necessary to adopt strategies that reconcile increased production, environmental preservation, and the efficient use of natural resources. In this context, sustainability has come to occupy a central position in discussions about the future of aquaculture, especially in the face of challenges related to water consumption, waste generation, and environmental impacts resulting from production intensification. This study aimed to analyze the main sustainability strategies applied to modern aquaculture focused on reducing environmental impacts and optimizing the use of water resources. The research is characterized as a qualitative literature review, based on publications from the last ten years, consulted in the databases Scielo, Google Scholar, CAPES Journals, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Frontiers, MDPI, and the Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations. The results showed that technologies such as Recirculating Aquaculture Systems (RAS), Integrated Multitrophic Aquaculture (IMTA), and practices based on the circular economy contribute significantly to reducing water consumption, reusing nutrients, and mitigating environmental impacts. It is concluded that the integration of technological innovation, environmental management, and sustainable planning represents an essential path to strengthening productive efficiency and ensuring the long-term sustainability of aquaculture.

Keywords: sustainable aquaculture; water resources; environmental impacts; technological innovation.

1. INTRODUÇÃO

A aquicultura tem assumido papel estratégico na produção mundial de alimentos, impulsionada pelo crescimento populacional, pela ampliação da demanda por proteínas de origem aquática e pela necessidade de diversificação das atividades produtivas. Nas últimas décadas, o setor apresentou expressiva expansão em diferentes regiões do mundo, consolidando-se como uma importante alternativa para complementar a pesca extrativa e fortalecer a segurança alimentar (CALISI et al., 2026).

Nesse cenário, a sustentabilidade passou a ocupar posição central nos debates sobre o futuro da atividade, exigindo a adoção de estratégias capazes de equilibrar produtividade, viabilidade econômica e conservação ambiental. Estudos recentes apontam que a implementação de sistemas produtivos mais eficientes e ambientalmente responsáveis representa uma condição indispensável para a continuidade do crescimento da aquicultura em bases sustentáveis, especialmente

diante das crescentes pressões ambientais e das mudanças climáticas que afetam os recursos hídricos em escala global (NINAWA; SHAKIR; SUBHASH, 2026).

A busca por modelos produtivos sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias e práticas inovadoras voltadas à redução dos impactos ambientais da aquicultura. Entre essas iniciativas destacam-se os sistemas de recirculação de água (RAS), a aquicultura multitrófica integrada (IMTA), o reaproveitamento de resíduos para geração de valor econômico e a utilização de abordagens fundamentadas nos princípios da economia circular. Essas estratégias permitem maior eficiência no uso da água, redução da emissão de poluentes e melhor aproveitamento dos nutrientes gerados durante o processo produtivo (ALAM et al., 2024; KNOWLER et al., 2020).

Apesar dos avanços observados, diversos desafios ainda limitam a consolidação de uma aquicultura plenamente sustentável. Em muitas regiões, persistem problemas relacionados ao manejo inadequado dos efluentes, à degradação da qualidade da água, à elevada demanda hídrica e à insuficiente adoção de tecnologias ambientalmente eficientes. Assim, a questão norteadora desta pesquisa é: como as estratégias sustentáveis adotadas na aquicultura moderna podem contribuir para a redução dos impactos ambientais e para a otimização do uso dos recursos hídricos?

O presente estudo tem como **objetivo geral** analisar as principais estratégias de sustentabilidade aplicadas à aquicultura moderna voltadas à redução dos impactos ambientais e à otimização do uso dos recursos hídricos. Como **objetivos específicos**, busca-se: a) identificar os principais impactos ambientais associados aos sistemas aquícolas contemporâneos; b) descrever tecnologias e práticas sustentáveis utilizadas para aumentar a eficiência no uso da água e no gerenciamento de resíduos; e c) discutir as contribuições dos modelos produtivos inovadores para a promoção da sustentabilidade econômica, ambiental e social da atividade aquícola.

A relevância deste estudo está associada à crescente necessidade de fortalecer práticas produtivas capazes de responder simultaneamente às demandas por alimentos, à preservação ambiental e ao uso racional dos recursos hídricos. A discussão sobre sustentabilidade na aquicultura torna-se especialmente importante em um contexto marcado pela escassez hídrica, pelas exigências regulatórias e pela

busca por modelos econômicos mais resilientes (RANJAN et al., 2026; ZHAO; ZHANG; DING, 2026).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A sustentabilidade tornou-se um dos principais eixos de discussão no desenvolvimento da aquicultura contemporânea, especialmente em razão do crescimento da demanda mundial por alimentos de origem aquática e da necessidade de preservar os recursos naturais utilizados nos sistemas produtivos. O conceito de sustentabilidade aplicado à aquicultura envolve a capacidade de produzir alimentos de forma economicamente viável, ambientalmente responsável e socialmente justa, garantindo que os recursos utilizados atualmente permaneçam disponíveis para as futuras gerações (ANGEL; JOKUMSEN; LEMBO, 2019; NINAWÉ; SHAKIR; SUBHASH, 2026).

Os impactos ambientais associados à aquicultura têm sido amplamente discutidos na literatura científica, sobretudo em sistemas produtivos intensivos que demandam grande quantidade de água e insumos. O descarte inadequado de efluentes ricos em matéria orgânica, nutrientes e resíduos metabólicos pode comprometer a qualidade dos corpos hídricos receptores, favorecendo processos de eutrofização e alterações na biodiversidade local. Sob a perspectiva da abordagem One Health, os impactos da aquicultura devem ser compreendidos de forma integrada, considerando as relações entre saúde ambiental, saúde animal e saúde humana. Essa visão amplia a compreensão dos desafios enfrentados pelo setor e reforça a necessidade de práticas de manejo mais responsáveis e sustentáveis (FARIAS, 2024; MELAKU; MENGESTOU; GETAHUN, 2024).

Entre as alternativas desenvolvidas para minimizar os impactos ambientais destaca-se a aquicultura multitrófica integrada (*Integrated Multi-Trophic Aquaculture – IMTA*), considerada uma das estratégias mais promissoras para a sustentabilidade do setor. Esse modelo baseia-se na integração de diferentes organismos pertencentes a níveis tróficos distintos, permitindo que resíduos gerados por uma espécie sejam aproveitados por outras como fonte de nutrientes. Dessa forma, ocorre uma reciclagem natural dos recursos disponíveis no sistema produtivo,

reduzindo a carga poluidora dos efluentes e promovendo maior equilíbrio ecológico (ALAM et al., 2024; MAGONDU et al., 2026).

Além dos benefícios ambientais, a aquicultura multitrófica integrada apresenta importantes vantagens econômicas. A diversificação das espécies cultivadas possibilita a ampliação das fontes de renda dos produtores, reduzindo a dependência de um único produto e aumentando a resiliência econômica das propriedades aquícolas. Pesquisas sobre os aspectos financeiros da IMTA demonstram que a valorização dos subprodutos e a utilização mais eficiente dos recursos podem gerar ganhos de competitividade e reduzir custos operacionais relacionados ao tratamento de resíduos e à manutenção da qualidade da água (KNOWLER et al., 2020; PIPER; ARDUINI, 2025).

Outra tecnologia amplamente discutida na literatura é o Sistema de Recirculação Aquícola (RAS), que se caracteriza pelo reaproveitamento contínuo da água utilizada no cultivo por meio de processos de filtragem e tratamento. Esse sistema permite reduzir significativamente o consumo hídrico quando comparado aos modelos convencionais de produção, tornando-se especialmente relevante em regiões sujeitas à escassez de água ou a restrições ambientais. Além da economia hídrica, os sistemas RAS oferecem maior controle sobre parâmetros físicos, químicos e biológicos da água, favorecendo melhores condições para o desenvolvimento dos organismos cultivados (KABIR et al., 2026).

A análise da viabilidade econômica dos sistemas de recirculação tem demonstrado resultados promissores, sobretudo em empreendimentos que buscam produção intensiva com elevado controle ambiental. Embora os custos iniciais de implantação sejam superiores aos dos sistemas tradicionais, os benefícios relacionados à redução do uso de água, ao controle sanitário e à otimização da produção tendem a compensar os investimentos em médio e longo prazo. Estudos realizados em diferentes contextos produtivos indicam que a adoção de tecnologias voltadas à eficiência hídrica pode contribuir para a sustentabilidade financeira dos empreendimentos (ZHAO; ZHANG; DING, 2026; KABIR et al., 2026).

A economia circular também tem ganhado destaque como referência para o desenvolvimento sustentável da aquicultura. Diferentemente dos modelos lineares tradicionais, baseados na lógica de extração, utilização e descarte, a economia circular busca promover o reaproveitamento contínuo dos recursos e a valorização dos resíduos gerados durante o processo produtivo. Nesse contexto, subprodutos da

aquicultura podem ser transformados em fertilizantes, fontes de energia, ingredientes para rações ou insumos para outras cadeias produtivas. Essa abordagem reduz a geração de resíduos, aumenta a eficiência dos sistemas produtivos e contribui para a construção de modelos econômicos mais sustentáveis (KURNIAWAN et al., 2025; RANJAN et al., 2026).

No contexto brasileiro, as discussões sobre sustentabilidade na aquicultura têm sido impulsionadas pelo crescimento da produção de tilápia e pela expansão da carcinicultura em diversas regiões do país. Embora essas atividades apresentem relevância econômica significativa, também geram preocupações relacionadas aos impactos ambientais e à qualidade dos recursos hídricos. Pesquisas recentes evidenciam a necessidade de fortalecer práticas de monitoramento ambiental, ampliar os investimentos em inovação tecnológica e incentivar modelos produtivos alinhados aos princípios da sustentabilidade (ARAÚJO; SOUSA; FERREIRA, 2025; SILVA, 2024).

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa, desenvolvida com o propósito de reunir, analisar e interpretar produções científicas relacionadas à sustentabilidade na aquicultura moderna, com ênfase nas estratégias voltadas à redução dos impactos ambientais e à otimização do uso dos recursos hídricos. Segundo Gil (2019), esse tipo de investigação possibilita ao pesquisador estabelecer uma visão ampla sobre o tema estudado, favorecendo a construção de análises fundamentadas em diferentes perspectivas científicas.

O levantamento dos estudos foi realizado entre os meses de janeiro e fevereiro de 2026, utilizando bases de dados nacionais e internacionais reconhecidas pela relevância acadêmica e pela ampla cobertura de publicações científicas. Foram consultadas as plataformas Scielo, Google Scholar, Periódicos CAPES, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Frontiers, MDPI, Repositórios Institucionais de Universidades Brasileiras e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD).

Para a localização dos materiais, empregaram-se os descritores em português e inglês combinados por operadores booleanos, tais como: “aquicultura sustentável”, “sustentabilidade na aquicultura”, “recursos hídricos”, “impactos ambientais”, “aquicultura multitrófica integrada”, “sistemas de recirculação de água”, “economia circular na aquicultura”, “sustainable aquaculture”, “water resource management”, “environmental impacts of aquaculture”, “integrated multitrophic aquaculture” e “recirculating aquaculture systems”. A utilização desses descritores permitiu localizar estudos alinhados ao objetivo da pesquisa e contemplar diferentes abordagens relacionadas à sustentabilidade dos sistemas aquícolas.

Como critérios de inclusão, consideraram-se artigos científicos, dissertações, teses e capítulos de livros publicados nos últimos dez anos (2016–2026), disponíveis integralmente em meio eletrônico, revisados por pares ou vinculados a instituições de pesquisa reconhecidas, e que abordassem diretamente temas relacionados à sustentabilidade aquícola, gestão de recursos hídricos, mitigação de impactos ambientais, sistemas produtivos sustentáveis e inovação tecnológica aplicada à aquicultura. Por outro lado, foram excluídos trabalhos duplicados, publicações sem acesso ao texto completo, estudos com foco exclusivo em aspectos zootécnicos sem relação com sustentabilidade ambiental, documentos de caráter opinativo e materiais que não apresentavam aderência ao tema proposto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos estudos selecionados permitiu identificar um conjunto de estratégias que vêm sendo apontadas pela literatura científica como fundamentais para o fortalecimento da sustentabilidade na aquicultura moderna. Os trabalhos analisados convergem para a compreensão de que o crescimento da produção aquícola precisa estar associado ao uso racional dos recursos naturais, especialmente da água, bem como à redução dos impactos ambientais decorrentes da intensificação produtiva.

As evidências encontradas demonstram que tecnologias inovadoras, modelos produtivos integrados e abordagens baseadas na economia circular vêm contribuindo para tornar a atividade mais eficiente, resiliente e ambientalmente responsável.. A partir da análise realizada, os resultados foram organizados em três

categorias temáticas que discutem os principais impactos ambientais da atividade, as estratégias de otimização dos recursos hídricos e as perspectivas futuras para uma aquicultura sustentável.

4.1 Impactos ambientais da aquicultura e desafios para a sustentabilidade

O crescimento acelerado da aquicultura nas últimas décadas consolidou essa atividade como uma das principais fontes de produção de proteína animal no mundo, contribuindo significativamente para a segurança alimentar e para o desenvolvimento econômico de diversas regiões. Entretanto, a expansão dos sistemas produtivos também trouxe desafios importantes relacionados à sustentabilidade ambiental, especialmente em empreendimentos caracterizados por elevada densidade de cultivo e intenso uso dos recursos naturais. A literatura analisada demonstra que a ampliação da produção aquícola tem sido acompanhada pelo aumento da geração de resíduos orgânicos, nutrientes dissolvidos, restos de ração e metabólitos oriundos da atividade biológica dos organismos cultivados. Quando esses resíduos não são adequadamente gerenciados, podem provocar alterações significativas na qualidade da água e comprometer o equilíbrio ecológico dos ambientes aquáticos.

A análise desenvolvida por Angel, Jokumsen e Lembo (2019) demonstra que as interações entre os sistemas de produção aquícola e o meio ambiente são complexas e influenciadas por diversos fatores, incluindo a espécie cultivada, o método de produção utilizado, as características ecológicas da área de instalação e as práticas de manejo adotadas pelos produtores. Os autores destacam que sistemas intensivos apresentam maior potencial produtivo, porém tendem a exercer pressão mais elevada sobre os recursos naturais devido à maior necessidade de alimentação artificial, renovação hídrica e controle sanitário. Essa realidade reforça a necessidade de adoção de práticas que promovam maior equilíbrio entre produção e conservação ambiental, reduzindo os efeitos negativos associados ao crescimento do setor.

Os impactos provocados pelo lançamento de resíduos em ambientes aquáticos são amplamente discutidos por Melaku, Mengestou e Getahun (2024), que apontam a eutrofização como uma das principais consequências da gestão

inadequada dos efluentes aquícolas. Esse fenômeno ocorre quando há excesso de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, nos ecossistemas aquáticos, favorecendo o crescimento excessivo de algas e microorganismos. Como consequência, ocorre redução dos níveis de oxigênio dissolvido, comprometendo a sobrevivência de diversas espécies e alterando o funcionamento natural dos ecossistemas

A perspectiva apresentada por Farias (2024) amplia a compreensão desses impactos ao adotar a abordagem One Health, que considera a interdependência existente entre a saúde ambiental, a saúde animal e a saúde humana. Sob essa ótica, os problemas ambientais decorrentes da aquicultura não afetam apenas os ecossistemas naturais, mas também podem influenciar diretamente a qualidade de vida das populações humanas que dependem dos recursos hídricos para abastecimento, lazer e atividades econômicas. O estudo evidencia que a contaminação da água por resíduos orgânicos, agentes patogênicos ou substâncias químicas utilizadas no manejo aquícola pode desencadear riscos que ultrapassam os limites das áreas de produção.

No contexto brasileiro, os desafios ambientais relacionados à aquicultura tornam-se ainda mais relevantes em regiões onde a atividade apresenta forte expansão. A pesquisa realizada por Silva (2024) sobre a carcinicultura no Nordeste brasileiro demonstra que a utilização intensiva dos recursos hídricos e o descarte inadequado de efluentes figuram entre os principais fatores de preocupação ambiental associados ao setor. O estudo evidencia que determinadas áreas de cultivo têm potencial para alterar a qualidade da água de rios, estuários e ambientes costeiros, especialmente quando não existem mecanismos eficientes de monitoramento e controle ambiental.

Silva, Navoni e Oliveira (2025) corroboram essas observações ao demonstrarem que os impactos ambientais da carcinicultura constituem um dos temas mais recorrentes na produção científica brasileira sobre aquicultura. A análise bibliométrica realizada pelos autores revela um crescente interesse da comunidade acadêmica em investigar os efeitos da atividade sobre os recursos hídricos, os ecossistemas costeiros e a biodiversidade local. Entre os principais aspectos discutidos destacam-se a salinização dos solos, a alteração de habitats naturais e os desafios relacionados ao tratamento dos efluentes gerados pelos sistemas produtivos. Esses resultados indicam que a preocupação com a sustentabilidade

ambiental vem ocupando posição central nas discussões sobre o futuro da aquicultura nacional.

Segundo Valente (2025), os microrganismos desempenham funções essenciais nos ciclos biogeoquímicos, atuando na decomposição da matéria orgânica, na reciclagem de nutrientes e na manutenção da qualidade ambiental dos sistemas de cultivo. Alterações provocadas pelo excesso de resíduos ou pelo desequilíbrio das condições ambientais podem modificar significativamente a composição dessas comunidades, afetando processos ecológicos fundamentais para a estabilidade dos ecossistemas. A autora destaca que a compreensão dessas dinâmicas é indispensável para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

As reflexões apresentadas por Calisi et al. (2026) reforçam a necessidade de uma abordagem integrada para enfrentar os desafios ambientais da aquicultura contemporânea. Os autores argumentam que a sustentabilidade do setor não pode ser alcançada apenas por meio da adoção de tecnologias isoladas, sendo necessária uma transformação mais ampla que envolva inovação, governança ambiental, planejamento estratégico e compromisso com a conservação dos recursos naturais. O estudo destaca que a busca por sistemas produtivos mais sustentáveis deve considerar simultaneamente aspectos ecológicos, econômicos e sociais, promovendo soluções capazes de atender às necessidades atuais sem comprometer a capacidade de suporte dos ecossistemas.

De maneira geral, a análise dos estudos evidencia que os impactos ambientais permanecem entre os principais desafios para o desenvolvimento sustentável da aquicultura moderna. Contudo, os trabalhos também demonstram que o avanço do conhecimento científico, aliado à adoção de práticas de manejo mais eficientes e ao desenvolvimento de tecnologias inovadoras, oferece oportunidades concretas para reduzir esses impactos. A construção de modelos produtivos mais equilibrados depende da integração entre pesquisa, inovação, gestão ambiental e conscientização dos diferentes atores envolvidos na cadeia produtiva.

4.2 Estratégias para otimização do uso dos recursos hídricos na aquicultura moderna

A gestão eficiente da água tornou-se um dos principais desafios para a sustentabilidade da aquicultura contemporânea. Embora a atividade dependa diretamente desse recurso para a manutenção dos organismos cultivados, a crescente pressão sobre os mananciais e os impactos das mudanças climáticas têm exigido a adoção de práticas capazes de reduzir o consumo hídrico sem comprometer os níveis de produção. A literatura analisada demonstra que a otimização do uso da água deixou de ser apenas uma preocupação ambiental e passou a representar uma questão estratégica para a viabilidade econômica e operacional dos empreendimentos aquícolas.

Entre as principais inovações identificadas na literatura destacam-se os Sistemas de Recirculação Aquícola (RAS), considerados uma das tecnologias mais promissoras para o uso racional dos recursos hídricos. De acordo com Kabir et al. (2026), esses sistemas funcionam por meio da reutilização contínua da água utilizada nos tanques de cultivo, que passa por processos de filtragem física, biológica e química antes de retornar ao sistema produtivo. Essa dinâmica reduz drasticamente a necessidade de captação constante de água nova, tornando possível a manutenção da produção mesmo em regiões onde a disponibilidade hídrica é limitada.

Além da economia hídrica, os sistemas de recirculação apresentam vantagens relacionadas ao controle da qualidade da água e à redução dos riscos sanitários. Segundo Kabir et al. (2026), o monitoramento constante dos parâmetros físico-químicos possibilita maior estabilidade ambiental dentro das unidades produtivas, favorecendo o crescimento dos organismos e reduzindo a incidência de enfermidades. Essa característica contribui para diminuir a dependência de intervenções corretivas e reduzir o uso de produtos químicos, o que gera benefícios tanto para o ambiente quanto para a eficiência produtiva. A adoção dos sistemas RAS ainda enfrenta desafios relacionados aos custos de implantação, ao consumo energético e à necessidade de mão de obra especializada para operação e manutenção das estruturas.

Os aspectos econômicos relacionados à utilização de tecnologias voltadas à economia de água também são discutidos por Zhao, Zhang e Ding (2026). Ao

analisarem a viabilidade financeira de sistemas de recirculação aplicados à criação de linguado na China, os autores observaram que, embora os investimentos iniciais sejam superiores aos dos sistemas convencionais, os benefícios obtidos em longo prazo tendem a compensar os custos de implementação. A redução do consumo de água, o melhor aproveitamento dos insumos e o maior controle produtivo contribuem para aumentar a eficiência operacional e reduzir desperdícios.

Outra estratégia amplamente destacada nos estudos refere-se à Aquicultura Multitrófica Integrada (IMTA), modelo que busca promover o aproveitamento dos nutrientes presentes nos resíduos gerados durante o cultivo. Diferentemente dos sistemas tradicionais, a IMTA integra organismos pertencentes a diferentes níveis tróficos, permitindo que os subprodutos de uma espécie sejam utilizados como recurso por outra. Segundo Alam et al. (2024), essa abordagem favorece uma utilização mais eficiente dos recursos naturais, reduzindo a necessidade de renovação constante da água e diminuindo a carga poluidora dos efluentes. O reaproveitamento dos nutrientes dentro do próprio sistema produtivo contribui para manter o equilíbrio ambiental e melhorar a eficiência global da produção.

Magondu et al. (2026) reforçam o potencial da aquicultura multitrófica integrada como alternativa sustentável para diferentes contextos produtivos. Ao analisarem experiências desenvolvidas em áreas costeiras do Quênia, os autores identificaram ganhos significativos relacionados à qualidade da água, à redução dos resíduos e à diversificação da produção. Os resultados demonstram que a integração entre espécies permite maior aproveitamento dos recursos disponíveis, reduzindo desperdícios e fortalecendo a resiliência dos sistemas produtivos diante das oscilações ambientais e econômicas.

Valente (2025) destaca a importância das relações ecológicas existentes nos sistemas multitróficos para a manutenção do equilíbrio microbiológico dos ambientes de cultivo. A autora argumenta que o reaproveitamento dos nutrientes e a redução do acúmulo de matéria orgânica favorecem condições mais estáveis para o desenvolvimento das comunidades microbianas responsáveis por processos essenciais de decomposição e ciclagem de nutrientes. Dessa forma, a eficiência hídrica não depende apenas da quantidade de água utilizada, mas também da capacidade do sistema de manter sua qualidade ao longo do processo produtivo.

Kurniawan et al. (2025) defendem que a valorização dos resíduos gerados pela aquicultura pode contribuir significativamente para a redução da pressão sobre

os recursos naturais. Ao transformar subprodutos em insumos para outras atividades econômicas, torna-se possível diminuir perdas, reduzir a geração de poluentes e aumentar a eficiência dos sistemas produtivos. Essa perspectiva amplia a compreensão da sustentabilidade hídrica, demonstrando que a gestão da água deve estar associada a estratégias mais abrangentes de aproveitamento dos recursos e redução dos desperdícios.

Tecnologias de recirculação, sistemas integrados de produção e abordagens fundamentadas na economia circular demonstram elevado potencial para reduzir o consumo hídrico, melhorar a qualidade ambiental e fortalecer a viabilidade econômica dos empreendimentos. A convergência dessas estratégias evidencia que a sustentabilidade da aquicultura depende da capacidade de integrar inovação tecnológica, conhecimento ecológico e gestão eficiente dos recursos naturais, criando condições para uma produção mais responsável e preparada para os desafios futuros.

4.3 Perspectivas futuras e inovação para uma aquicultura sustentável

A análise da literatura evidencia que o futuro da aquicultura está diretamente relacionado à capacidade do setor de incorporar inovação, eficiência produtiva e responsabilidade ambiental em seus modelos de produção. O crescimento contínuo da demanda mundial por pescado exige que os sistemas aquícolas ampliem sua capacidade produtiva sem aumentar proporcionalmente a pressão exercida sobre os recursos naturais. Os estudos analisados demonstram que as tendências mais promissoras para os próximos anos envolvem a integração de tecnologias avançadas, práticas de manejo ambientalmente responsáveis e estratégias voltadas à valorização dos recursos já disponíveis dentro dos sistemas produtivos.

Entre as principais perspectivas identificadas na literatura está o fortalecimento dos modelos produtivos baseados na integração ecológica dos cultivos. A Aquicultura Multitrófica Integrada tem sido apontada como uma das alternativas mais consistentes para promover maior equilíbrio entre produção e conservação ambiental. Alam et al. (2024) destacam que a integração entre espécies pertencentes a diferentes níveis tróficos permite o aproveitamento mais eficiente dos nutrientes presentes nos sistemas de cultivo, reduzindo desperdícios e

minimizando impactos ambientais. A expansão desse tipo de abordagem representa uma mudança importante na forma como a aquicultura é concebida, priorizando relações ecológicas que favorecem a sustentabilidade de longo prazo.

Knowler et al. (2020) observam que a diversificação produtiva promovida pela aquicultura multitrófica pode gerar novas oportunidades de mercado e ampliar as fontes de receita dos produtores. Em vez de depender exclusivamente de uma única espécie, os empreendimentos passam a comercializar diferentes produtos obtidos dentro do mesmo sistema produtivo. Essa característica reduz riscos financeiros e fortalece a estabilidade econômica da atividade. O avanço das pesquisas sobre viabilidade econômica e modelos de negócio sustentáveis será fundamental para ampliar a adoção dessas estratégias em diferentes contextos produtivos.

Piper e Arduini (2025) reforçam essa discussão ao demonstrarem que a sustentabilidade pode ser incorporada como elemento central dos modelos de negócio aquícolas. Os autores argumentam que a inovação não deve ser compreendida apenas como desenvolvimento tecnológico, mas também como transformação organizacional e estratégica. Empresas que integram práticas sustentáveis em seus processos produtivos tendem a construir vantagens competitivas duradouras, fortalecendo sua imagem perante consumidores, investidores e órgãos reguladores. Essa perspectiva sugere que a sustentabilidade não representa apenas uma exigência ambiental, mas também uma oportunidade para geração de valor econômico e fortalecimento institucional.

Outra tendência amplamente discutida nos estudos refere-se à expansão dos sistemas de recirculação aquícola e das tecnologias voltadas ao monitoramento inteligente da produção. Kabir et al. (2026) destacam que os avanços recentes em sensores, automação e controle digital têm possibilitado maior precisão no gerenciamento dos parâmetros ambientais dos sistemas de cultivo. Essas tecnologias permitem identificar alterações na qualidade da água em tempo real, reduzindo riscos produtivos e favorecendo o uso mais eficiente dos recursos disponíveis.

Zhao, Zhang e Ding (2026) demonstram que, embora os investimentos iniciais possam ser elevados, os ganhos associados à redução do consumo hídrico, ao aumento da produtividade e à melhoria da eficiência operacional tendem a compensar os custos de implementação ao longo do tempo. À medida que novas tecnologias se tornam mais acessíveis e amplamente difundidas, espera-se que sua

adoção cresça em diferentes escalas de produção, ampliando as possibilidades de desenvolvimento sustentável do setor.

Segundo Kurniawan et al. (2025), a valorização dos resíduos gerados durante o processo produtivo representa uma oportunidade significativa para aumentar a eficiência dos sistemas e reduzir os impactos ambientais. O aproveitamento de subprodutos para a produção de fertilizantes, bioenergia e outros insumos contribui para diminuir desperdícios e criar novas fontes de renda para os produtores. Essa abordagem rompe com a lógica tradicional baseada no descarte e promove uma utilização mais racional dos recursos disponíveis, fortalecendo a sustentabilidade econômica e ambiental da atividade.

As reflexões apresentadas por Calisi et al. (2026) indicam que os avanços tecnológicos, por si só, não serão suficientes para garantir a sustentabilidade da aquicultura. Os autores destacam a importância de políticas públicas, investimentos em pesquisa científica, capacitação profissional e fortalecimento das estruturas de governança ambiental. O desenvolvimento sustentável do setor dependerá da articulação entre diferentes atores, incluindo produtores, pesquisadores, instituições governamentais e sociedade civil. A construção de soluções eficazes exige uma visão integrada que considere simultaneamente aspectos produtivos, ambientais, sociais e econômicos.

As evidências demonstram que tecnologias inovadoras, modelos produtivos integrados, princípios da economia circular e estratégias de gestão sustentável possuem potencial para transformar profundamente a atividade aquícola. Nesse contexto, a sustentabilidade deixa de ser um objetivo distante e passa a representar um caminho concreto para assegurar a continuidade da produção aquícola em um cenário marcado por desafios ambientais crescentes, exigências regulatórias mais rigorosas e maior conscientização sobre a importância da preservação dos recursos hídricos para as futuras gerações.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão bibliográfica possibilitou compreender que a sustentabilidade na aquicultura moderna constitui um dos principais desafios e, ao mesmo tempo, uma das maiores oportunidades para o desenvolvimento do setor

nas próximas décadas. O crescimento da produção aquícola precisa estar acompanhado de práticas capazes de reduzir os impactos ambientais, preservar a qualidade dos recursos hídricos e promover maior eficiência no uso dos insumos produtivos. A adoção de estratégias sustentáveis representa um elemento fundamental para garantir a viabilidade econômica e a competitividade da atividade em um cenário de crescente demanda por alimentos e de maior preocupação com a conservação dos ecossistemas.

Tecnologias como os sistemas de recirculação aquícola, a aquicultura multitrófica integrada e as abordagens fundamentadas na economia circular apresentam elevado potencial para transformar os modelos tradicionais de produção. Essas estratégias contribuem para a redução do consumo de água, para o reaproveitamento de nutrientes e resíduos e para a diminuição da carga poluidora lançada nos ambientes aquáticos. A integração entre inovação tecnológica, planejamento ambiental e gestão eficiente dos recursos naturais favorece a construção de sistemas produtivos mais resilientes, capazes de conciliar produtividade, rentabilidade e responsabilidade socioambiental.

O fortalecimento da sustentabilidade na aquicultura depende da ampliação dos investimentos em pesquisa, inovação e capacitação técnica, bem como da implementação de políticas públicas que incentivem a adoção de práticas ambientalmente responsáveis. O avanço de modelos produtivos mais eficientes e integrados representa um caminho promissor para atender às demandas alimentares futuras sem comprometer a disponibilidade dos recursos hídricos e a integridade dos ecossistemas.

REFERÊNCIAS

ALAM, M. M.; JØRGENSEN, N. O. G.; BASS, D. et al. Potential of integrated multitrophic aquaculture to make prawn farming sustainable in Bangladesh. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 8, 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2024.1412919/full>. Acesso em: 22 jan. 2026.

ANGEL, D.; JOKUMSEN, A.; LEMBO, G. Aquaculture production systems and environmental interactions. In: *Organic Aquaculture: Impacts and Future Developments*. Cham: Springer, 2019. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-05603-2_6. Acesso em: 22 jan. 2026.

ARAÚJO, P. A.; SOUSA, D. N.; FERREIRA, P. R. Mapeamento da produção científica sobre tilápia nas instituições de pesquisa e desenvolvimento do estado do Tocantins (2020–2024). *Revista Sítio Novo*, 2025. Disponível em: <https://sitionovo.iftto.edu.br/index.php/sitionovo/article/view/1794>. Acesso em: 22 jan. 2026.

CALISI, A.; GUALANDRIS, D.; GAMALERO, E. et al. Eco-Sustainability in Aquaculture: Questions and Perspectives. *Environments*, v. 13, n. 4, 2026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/13/4/208>. Acesso em: 22 jan. 2026.

FARIAS, A. L. M. Os impactos da aquicultura sob a perspectiva de uma só saúde (One Health). 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal do Espírito Santo. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/7329>. Acesso em: 22 jan. 2026.

KABIR, A.; SHITU, A.; YE, Z. et al. Sustainable Recirculating Aquaculture Systems (RAS): Development and Challenges. *Water*, 2026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/18/9/1093>. Acesso em: 22 jan. 2026.

KNOWLER, D.; CHOPIN, T. et al. The economics of Integrated Multi-Trophic Aquaculture: where are we now and where do we need to go? *Reviews in Aquaculture*, v. 12, n. 3, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/raq.12399>. Acesso em: 22 jan. 2026.

KURNIAWAN, S. B.; AHMAD, A.; IMRON, M. F. et al. Achieving a biocircular economy in the aquaculture sector through waste valorization. *Toxics*, v. 13, n. 2, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2305-6304/13/2/131>. Acesso em: 22 jan. 2026.

MAGONDU, E.; MUTHOKA, M.; OKEMWA, D. et al. Unlocking the potential of integrated multi-trophic aquaculture in coastal Kenya. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2026. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jwas.70092>. Acesso em: 22 jan. 2026.

MELAKU, S.; MENGESTOU, S.; GETAHUN, A. Environmental impacts of wastes and contaminants from aquaculture and their remediation techniques. In: *Freshwater Fish – New Insights*. 2024. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/89159>. Acesso em: 22 jan. 2026.

MELO, G. A. F. Ácidos orgânicos na aquicultura: bibliometria e revisão sistemática. 2025. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal Goiano. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/5447>. Acesso em: 22 jan. 2026.

NINAWA, A. S.; SHAKIR, C.; SUBHASH, S. K. The Future of Aquaculture: Sustainable Development, Economic Growth, and Environmental Protection. *International Journal of Aquaculture*, 2026. Disponível em: <https://aquapublisher.com/index.php/ija/article/view/4013>. Acesso em: 22 jan. 2026.

PIPER, L.; ARDUINI, D. Business model and sustainability-led innovations: a case study on integrated multitrophic aquaculture. 2025. Disponível em: <https://www.torrossa.com/gs/resourceProxy?an=6166227&publisher=F61997>. Acesso em: 22 jan. 2026.

RANJAN, D.; SINGH, S.; SINGH, A. et al. Recent advancements in sustainable aquaculture: innovative techniques and future prospects. *Frontiers in Aquaculture*, 2026. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/aquaculture/articles/10.3389/faquc.2026.1770106/full>. Acesso em: 22 jan. 2026.

SILVA, S. A. Análise dos impactos sociais, ambientais e econômicos da carcinicultura no Brasil: um estudo da influência da atividade na qualidade dos recursos hídricos da região Nordeste. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstreams/d261670c-fb95-4e9a-bbdf-02c8247727f0/download>. Acesso em: 22 jan. 2026.

SILVA, S. A.; NAVONI, J. A.; OLIVEIRA, J. E. L. Impactos sociais, econômicos e ambientais da carcinicultura no Brasil: uma análise bibliométrica. *Revista de Geociências do Nordeste*, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/36668>. Acesso em: 22 jan. 2026.

VALENTE, J. P. Comparação da estrutura microbiana em sistemas de aquicultura monotrófica e multitrófica sob a perspectiva da teoria ecológica r/K: uma revisão bibliográfica. 2025. Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/8a0ff97e-3eef-4656-9739-11a23961b4ff>. Acesso em: 22 jan. 2026.

ZHAO, Z.; ZHANG, H.; DING, Q. Economic feasibility analysis of recirculating aquaculture systems for turbot farming: a case study of Qingdao in China. *Israeli Journal of Aquaculture*, 2026. Disponível em: <https://ija.scholasticahq.com/article/160029>. Acesso em: 22 jan. 2026.