

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA E
SUSTENTABILIDADE DA PRODUÇÃO DE
LAMBARI-DO-RABO-AMARELO EM
MONOCULTIVO E CULTIVO INTEGRADO
COM CAMARÃO-DA-AMAZÔNIA E CURIMBATÁ**

Aline Marcari Marques

-Bióloga-

Jaboticabal, SP
2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA E
SUSTENTABILIDADE DA PRODUÇÃO DE
LAMBARI-DO-RABO-AMARELO EM
MONOCULTIVO E CULTIVO INTEGRADO
COM CAMARÃO-DA-AMAZÔNIA E CURIMBATÁ**

Aline Marcari Marques

Orientador: Wagner Cotroni Valenti

Jaboticabal, SP
2021

M357a Marques, Aline Marcari
Viabilidade técnica e econômica e sustentabilidade da produção de lambari-do-rabo-amarelo em monocultivo e cultivo integrado com camarão-da-amazônia e curimatã / Aline Marcari Marques. -- Jaboticabal, 2022
iii, 98 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura, 2022

Orientador: Wagner Cotroni Valenti

Banca examinadora: Felipe Pereira de Almeida Cohen, Carolina Mendes Costa, Fernando Henrique Agostinho dos Santos Barbosa Gonçalves, Ambrósio Paula Bessa Júnior

Bibliografia

1. Cultivo integrado. 2. Economia circular. 3. Indicadores de sustentabilidade. 4. Aquicultura sustentável. 5. Lambari. I. Título. II. Jaboticabal-Centro de Aquicultura.

CDU 639.31



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
Centro de Aquicultura da Unesp - CAUNESP



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Viabilidade Técnica e Econômica e Sustentabilidade da Produção de lambari-do-rabo-amarelo em Monocultivo e Cultivo Integrado com camarão-da-amazônia e curimatã

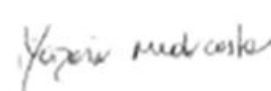
AUTORA: ALINE MARCARI MARQUES

ORIENTADOR: WAGNER COTRONI VALENTI

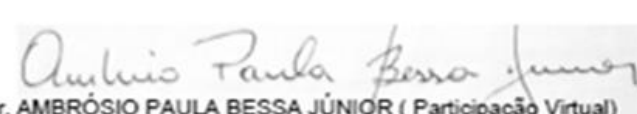
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AQUICULTURA, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. WAGNER COTRONI VALENTI (Participação Virtual)
Centro de Aquicultura da Unesp, Caunesp, Jaboticabal-SP


Prof. Dr. FELIPE PEREIRA DE ALMEIDA COHEN (Participação Virtual)
Universidade de São Paulo, São Paulo-SP / Instituto de Biociências, IB/USP


Dra. CAROLINA MENDES COSTA (Participação Virtual)
Secretaria de Aquicultura e Pesca / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento


Dr. FERNANDO HENRIQUE AGOSTINHO DOS SANTOS BARBOSA GONÇALVES (Participação Virtual) - Virginia Seafood Agricultural Research and Extension Center, Virginia Tech, EUA


Prof. Dr. AMBRÓSIO PAULA BESSA JÚNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Animais - DCA / Universidade Federal Rural do Semi-Árido, UFERSA, Mossoró-RN

Jaboticabal, 31 de maio de 2022

Centro de Aquicultura da Unesp
Coordenação do Programa de Pós-Graduação
Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n CEP 14884-900 Jaboticabal SP Brasil
Tel 55 16 32032110 rural 214 fax 55 16 32032268
psp@caunesp.unesp.br www.caunesp.unesp.br

Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já tem a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos que nos levam sempre aos mesmos lugares, é o tempo da travessia, e se não ousarmos fazê-la teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos.

Fernando Teixeira de Andrade

Dedico esta tese a todos que superaram e, principalmente, aqueles que tiveram suas vidas ceifadas e sua jornada abreviada, por conta da pandemia do Covid-19.

SUMÁRIO

Agradecimentos	I
Apoio Financeiro	III
Resumo Geral	4
Abstract.....	5
Introdução Geral.....	6
Referências	11
Apresentação do Trabalho	14
Capítulo 1: Improving the Efficiency of Lambari Production and Diet Assimilation Using Integrated Aquaculture with Benthic Species	15
Abstract.....	16
1. Introduction	17
2. Materials and Methods	19
2.1. Experimental Design	19
2.2. Feeding management	20
2.3. Water quality	20
2.4. Harvest and productivity data collection	22
2.5. Data Analysis	22
3. Results	23
4. Discussion.....	25
5. Conclusions.....	29
References.....	30
Capítulo 2: Viabilidade Econômica de Sistemas de Produção de <i>Astyanax lacustris</i>	34
Resumo.....	34
1. Introdução	36
2. Material e Métodos	38
2.1. Análise de Viabilidade Econômica	41
3. Resultados	45
4. Discussão	52

5. Conclusão.....	56
Referências.....	57
APÊNDICE A	60
APÊNDICE B	62
Capítulo 3: Avaliação da Sustentabilidade de Sistemas de Produção de <i>Astyanax lacustris</i>	66
Resumo.....	66
1. Introdução.....	68
2. Material e Métodos	71
2.1. Indicadores de Sustentabilidade Ambiental	73
2.2. Indicadores de Sustentabilidade Econômica.....	76
2.3. Indicadores de Sustentabilidade Social	77
2.4. Análise dos Indicadores de Sustentabilidade.....	78
3. Resultados.....	80
3.1. Indicadores de Sustentabilidade Ambiental	80
3.2. Indicadores de Sustentabilidade Econômica.....	82
3.3. Indicadores de Sustentabilidade Social	85
3.4. Sustentabilidade Geral.....	87
4. Discussão	88
5. Conclusão.....	93
Referências.....	94
APÊNDICE A	97
Considerações Finais	101

Agradecimentos

Esta tese somente foi realizada devido a ajuda e esforço de um grande grupo de pessoas, por isso agradeço profundamente:

Ao meu orientador Prof. Dr. Wagner Cotroni Valenti, pela confiança e pela oportunidade de realização e concretização deste grande sonho. Obrigada, por todos os ensinamentos, todas as nossas conversas e reuniões tão enriquecedoras. Obrigada por todas as oportunidades e por enxergar em mim a minha grande paixão pela docência.

Aos produtores Suely Marlene Rodrigues da Piscicultura comercial Projeto Peixes localizada no município de Sales Oliveira- SP, Brasil e Jomar Delefrate da Piscicultura comercial do Sítio Sobradinho localizada no município de Buritizal- SP, Brasil por apoiarem este estudo e cederem os alevinos de curimbatá (*Prochilodus lineatus*) e o lambari (*Astyanax lacustris*).

Aos meus colegas de experimento, André, Dalton, Igor, Júlia e Paulo. Obrigada por toda ajuda no decorrer deste trabalho. Obrigada pela convivência e por todas conversas e debates que tanto me fizeram amadurecer como pessoa e pesquisadora!

A todos os meus colegas de trabalho do setor de Carcinicultura por todas as conversas, debates, risadas, e momentos especiais que compartilhamos e que me fizeram bem durante estes anos.

Aos meus amigos, Tamara, Carol, Maicon e Fernanda Travaini que algumas vezes se disponibilizaram, e me ajudaram tanto na análise dos meus resultados. Deixo aqui minha singela gratidão.

Ao Roberto, técnico do laboratório, que sempre nos auxiliou com toda a parte técnica do experimento e análises.

Aos meus grandes amigos, que me acolheram, me deram palavras de incentivo e me auxiliaram de alguma forma na execução deste trabalho, em

especial ao Davi e a Rafa, quem me ajudaram na obtenção de alguns dados tão necessários para execução deste trabalho.

Ao meu amigo Rogério que me ajudou durante a parte de análise dos meus dados, me dando informações ou até mesmo discutindo e me questionando para me fazer compreender cada vez mais. Obrigada pela amizade e pelas grandes conversas enriquecedoras!

A minha amiga Camila, com quem compartilhei muitas conversas e momentos, quem me apoiou, me incentivou, me escutou, e acreditou em mim. Obrigada por sua amizade, por seu carinho e suas palavras de apoio.

A todos os meus parentes que sempre me apoiaram durante toda minha vida, em especial ao meu tio Ernane, quem não mediu esforços para me ajudar. À minha tia Terezinha que me socorreu quando eu tive tanta dificuldade em obter algumas informações. Aos meus sogros, S. Oswaldo e D. Fátima que sempre me ajudaram, me apoiaram e me incentivaram a continuar. Ao meu primo Tiago Santucci, por todas as conversas e esclarecimentos, mas também toda a sua linda família: Fernanda, Júlia e Davi que sei o quanto torcem por mim e por quem eu tenho tanto amor e gratidão em meu coração.

À minha psicóloga Fabiana, quem tanto me ajudou a acreditar e encontrar em mim mesma a força necessária para transpor as dificuldades que inevitavelmente apareceram em meu caminho. Obrigada por me escolher!

Ao meu marido Oswaldo Jonas, quem aguentou toda a barra durante esse período e me ajudou a tornar tudo isso realidade. Obrigada meu grande amor pela paciência, cumplicidade, amizade e pelo nosso amor.

À minha irmã que com seu jeito único, sei o quanto acredita em mim, me apoia e me incentiva. Te amo minha eterna pequena.

Ao meu Pai José e à minha Mãe Dulce, as pessoas mais importantes da minha vida que em toda a minha vida me deram força, incentivo e amor. Vocês são o melhor exemplo que eu poderia ter de garra, dedicação, determinação e competência. Eu não me canso de agradecer a vocês por escolherem a mim, por escolherem ser meus pais, por escolherem me amar, me acompanhar e me

apoiar em tudo e em qualquer momento de minha vida. Seja quando ou aonde for eu sempre vou amá-los.

Apoio Financeiro

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq por meio de Bolsa de Doutorado (Processo nº140911/2018-9), Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo nº 428628/2018-4) e Auxílio à Pesquisa (Processo nº 310688/2020-5).

Resumo Geral

O objetivo desta tese foi avaliar a viabilidade técnica e econômica, e a sustentabilidade da produção do lambari-do-rabo-amarelo (*Astyanax lacustris*) em sistema de monocultivo e comparar com sistemas de cultivo integrado. Um experimento com duração de um ciclo de cultivo de *A. lacustris*, em fase de engorda, foi realizado com três tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos testados foram: monocultivo de lambari, cultivo integrado de lambari e camarão (*Macrobrachium amazonicum*), e cultivo integrado do lambari, camarão e curimbatá (*Prochilodus lineatus*). Em todos eles, a alimentação com dieta comercial foi baseada na biomassa do lambari. A alimentação do camarão e do curimbatá foi baseada nos resíduos de alimento e fezes do lambari, e da biota natural do viveiro. A introdução do camarão e do curimbatá não afetaram o crescimento do lambari, mas aumentaram o rendimento total da produção e reduziram a taxa de conversão alimentar total. No estudo de viabilidade econômica, realizou-se uma simulação de implantação de fazendas hipotéticas localizadas em uma região subtropical do Brasil. Essas fazendas contariam com áreas de produção de 1 e 5 ha de espelho d'água, para cada sistema citado. Apenas o monocultivo de 1 ha não apresentou viabilidade econômica. Aumentar a produção desse cultivo para 5 ha e realizar a integração com espécies bentônicas, em ambas as escalas de produção, viabilizou a atividade com retorno de capital em 6 anos para o monocultivo, e menos de 5 anos para os cultivos integrados. Para a análise de sustentabilidade foram consideradas apenas as fazendas hipotéticas com 5 ha. A integração do cultivo de lambari com camarão, e com camarão e curimbatá tiveram bom desempenho nos indicadores dos pilares: ambiental e econômico da sustentabilidade, mas muitos dos indicadores sociais foram apontados como pontos fracos destes empreendimentos. Mesmo assim, maior sustentabilidade foi atribuída aos cultivos integrados. Assim, concluímos que a integração do cultivo de lambari-do-rabo-amarelo com espécies como camarão e o curimbatá aumenta a produtividade do sistema, a viabilidade econômica, e a sustentabilidade em relação ao monocultivo de lambari.

Palavras-chave: IMTA, *Astyanax lacustris*, *Macrobrachium amazonicum*, *Prochilodus lineatus*, economia circular, indicadores de sustentabilidade

Abstract

The aim of this thesis was to evaluate the technical and economic feasibility and sustainability of yellowtail lambari (*Astyanax lacustris*) production in monoculture and compare with integrated culture systems. An experiment was performed for one production cycle of *A. lacustris*, in growing phase, with three treatments and four replicates. The treatments used were: monoculture of lambari, integrated culture of lambari and prawn (*Macrobrachium amazonicum*), and integrated culture of lambari, prawn and curimbatá (*Prochilodus lineatus*). In all of them, the feeding with commercial diet was based on lambari biomass. The feeding of prawns and curimbatá was based on the food and feces waste from lambari, and the natural biota from pond. The introduction of prawns and curimbatá did not affect the lambari growth, but increased the total production yield, and reduced the total feed conversion ratio. For the economic feasibility study, a simulation of implementation of hypothetical farms located in a subtropical region of Brazil was carried out. These farms would have production areas with 1 and 5 ha of water surface, for each system mentioned. Only the monoculture 1 ha did not show economic feasibility. Increasing the production of this culture to 5 ha and performing the integration with benthic species, in both production scales, made the activity feasible with return on capital in 6 years for monoculture, and less than 5 years for integrated culture. For the sustainability analysis, only hypothetical farms with an area of 5 ha were considered. The integration of lambari culture with prawn, and with prawn and curimbatá had a good performance in the environmental and economic pillars of sustainability, but many of the social indicators were pointed out as weaknesses of these enterprises. Even so, greater sustainability was attributed to the integrated culture. Thus, we concluded that integrating lambari culture with species such as prawn and curimbatá increases system productivity, economic feasibility, and sustainability compared with lambari monoculture.

Key-words: IMTA, *Astyanax lacustris*, *Macrobrachium amazonicum*, *Prochilodus lineatus*, circular economy; indicator of sustainability

Introdução Geral

A produção de organismos predominantemente aquáticos é realizada há cerca de 4.000 anos por diferentes culturas ao redor do mundo (Costa-Pierce, 2010). Nos últimos anos, esta atividade tem crescido constantemente e, apesar da ligeira desaceleração que vem se desenhando atualmente, ainda vimos um aumento da produção mundial em 3,2% em 2018 (FAO, 2020). Este crescimento e expansão da aquicultura ocorreram devido à diminuição da pesca por captura, ao aumento da demanda por pescados, a preferência por esta proteína animal para consumo, e ao aumento da população e renda no planeta (Bosma e Verdegem, 2011; Barone et al., 2017). No Brasil, a aquicultura em escala industrial é relativamente nova, tendo sido iniciada apenas nos anos 1970 (Valenti et al., 2021). Em 2020, a produção de organismos aquáticos foi maior do que 600.000 toneladas, representando um aumento de 4,9% em relação ao ano anterior (IBGE, 2021). Apesar deste constante crescimento, a aquicultura no Brasil não é uma atividade sólida e sustentável, dependendo majoritariamente da produção de organismos de água doce, proveniente de pequenos produtores que utilizam sistemas de monocultivo intensamente arraçoados (Valenti et al., 2021). Esses sistemas são conhecidos como ineficientes na conversão de alimento em biomassa comercializável, resultando em elevadas perdas de material orgânico de alto valor (Boyd et al., 2020).

A busca por conhecimento nos trouxe questionamentos e preocupações acerca de temas como a deterioração da qualidade ambiental, sanidade e crescimento dos peixes, e baixa margem de lucro (Zhou et al., 2011; Kibria e Haque, 2018; Ahmed e Thompson, 2019) . Tais inquietações evidenciaram a necessidade de desenvolver e promover práticas de manejo que visem sistemas de produção mais sustentáveis, compatíveis aos princípios da Agenda 2030 (UN, 2015), e que atendem aos objetivos de desenvolvimento sustentável. É, portanto, de suma importância a compreensão do termo sustentabilidade, tão falado nos dias atuais. Este é um conceito antropocêntrico, relativo à contínua satisfação das necessidades humanas por meio do adequado manejo dos recursos naturais, financeiros, tecnológicos e institucionais (Valenti et al., 2011). A sustentabilidade é então norteadada por três pilares: (1) sustentabilidade ambiental; (2) sustentabilidade econômica; (3) sustentabilidade social (Boyd et al., 2020). O

conceito central desse tema baseia-se no uso mais eficiente de recursos disponíveis como energia, água, terra, alimento e fertilizante (Bosma e Verdegem, 2011; Boyd et al., 2020). No entanto, alcançar a sustentabilidade não é algo fácil e deve ser feito de modo gradual, baseando-se em intervenções sustentáveis nos sistemas já existentes (Valenti et al., 2018).

Toda atividade aquícola que visa uma produção sustentável tem o desafio incorporar equilibradamente os três pilares que amparam o conceito de sustentabilidade. Desse modo é preciso buscar o aumento da produtividade e da lucratividade, a otimização do uso de capital e recursos naturais, e a interação harmônica da atividade com o ambiente e a comunidade local (Valenti et al., 2018). Os sistemas integrados multitróficos (Integrated Multitrophic Aquaculture - IMTA) são uma das alternativas aos sistemas de monocultivo tradicionalmente arraçoados (Henares et al., 2020). Estes sistemas integrados são engenharias ecológicas que permitem contemplar os três pilares da sustentabilidade (Chopin, 2013). O IMTA é um tipo de policultivo muito flexível, que pode ser aplicado em diferentes sistemas, até mesmo em viveiros escavados de produção de organismos de água doce (Chopin, 2013).

A escolha das espécies a serem produzidas é um item importante para obter um sistema integrado multitrófico que seja funcional. Para tanto, deve-se considerar o potencial econômico das espécies bem como suas funções ecológicas (Chopin, 2013). Optar por espécies que ocupem diferentes nichos ecológicos e diferentes hábitos alimentares, permite a construção de um sistema mais equilibrado proporcionado pela compatibilidade e pela complementariedade das espécies para uso de recursos (Thomas et al., 2021). Deste modo, é possível limitar a competição, assegurar o bem estar e performance, possibilitar interação sinérgica entre as espécies e o processo de biomitigação ambiental (Chopin, 2013; Thomas et al., 2021). Entre as espécies escolhidas poderá haver aquelas que serão alimentadas e aquelas que serão extrativas. Essas últimas converterão resíduos alimentares, fezes, nutrientes e subprodutos, em fertilizantes, alimento e energia para seu próprio crescimento (Chopin, 2013). Assim, os recursos disponíveis serão compartilhados e consequentemente melhor aproveitados de modo a aumentar a eficiência dos viveiros de produção (Marques et al., 2016). Nesse sentido, optar por espécies de baixo nível trófico auxilia a reduzir impactos ambientais e a aumentar a sustentabilidade (Henares et al., 2020).

A produção de lambari é um exemplo de atividade promissora que tem se expandido como uma alternativa econômica de pequenos produtores rurais no Brasil. A lambaricultura apresenta uma produção estimada que ultrapassa 1.000 toneladas por ano (Valenti et al, 2021). Essa produção é majoritariamente feita em sistemas de monocultivo e sem um padrão estabelecido das estratégias de manejo (Fonseca et al., 2017). Apesar disso, a lambaricultura é uma atividade que tem potencial para ser desenvolvida em sistemas integrados (Fonseca et al., 2017). O lambari-do-rabo-amarelo (*Astyanax lacustris*, anteriormente conhecido como *A. bimaculatus*) (Lucena et al., 2016) é uma das espécies de lambari mais comercializadas e produzidas no Brasil. Esse peixe nativo é pelágico e com hábito alimentar onívoro, e apesar de pequena, essa espécie é uma ótima opção para cultivo e apresenta grande potencial para produção devido a sua alta taxa reprodutiva, ciclo de vida curto e fácil manejo (Ferreira et al., 2014; Fonseca et al., 2017). Sua comercialização pode ser feita como aperitivos para consumo humano ou como isca viva para a pesca esportiva. Este último modo, juntamente com o aumento do turismo no Brasil, proporcionou o crescimento e expansão da produção desta espécie principalmente no estado de São Paulo, se tornando um mercado muito significativo (Ferreira et al., 2014; Fonseca et al., 2017; Valladão et al., 2018; Valenti et al., 2021).

Uma ótima opção de escolha para compor os cultivos integrados é o camarão de água doce. As espécies pertencentes a esse grupo apresentam distribuição espacial bem definida e aproveitam os resíduos alimentares que se depositam no fundo dos viveiros, evitando deste modo a competição com muitas espécies de peixes (Marques et al., 2016). O camarão-da-amazônia (*Machrobrachium amazonicum*) é uma espécie nativa do Brasil e pode ser comercializada em diferentes mercados, tais como: o mercado para consumo humano, o mercado de ornamentais, de alimento para peixes carnívoros ornamentais e como isca viva (Marques e Moraes-Valenti, 2012). Apesar de seu uso em sistemas de cultivo integrado com peixes proporcionar redução de nutrientes, alguns trabalhos demonstram que a quantidade de nutrientes remanescente ainda é grande, sugerindo a inclusão de mais uma espécie de hábito alimentar detritívoro (David et al., 2017a; 2017b; Flickinger et al., 2019; 2020a; 2020b). Uma espécie promissora para compor cultivos integrados de peixes pelágicos e camarão de água doce é o curimatá (*Prochilodus lineatus*).

Essa espécie proporcionou o aumento do rendimento de viveiros de cultivos integrados com tambaqui (*Colossoma macropomum*) e o camarão *M. amazonicum* (Franchini et al., 2020). O *P. lineatus* é iliófago, essa espécie explora e consome o perifíton de sedimentos e macrófitas, sedimento inorgânico, detritos orgânicos e ração acumulados no fundo de ambientes naturais (Castagnolli, 1992; De Resende et al., 1996; Fugi et al., 1996). Em virtude disso, é possível presumir que o curimatá pode ser uma opção a integrar o cultivo de *A. lacustris* e *M. amazonicum* visando a redução de nutrientes acumulados no fundo de viveiros de cultivo de modo a promover a biomitigação ambiental e o aumento da produtividade do sistema. O *P. lineatus* apresenta importante representatividade na aquicultura nacional, podendo ser comercializado tanto para consumo humano como para iniciativas de repovoamento de bacias no sudeste do Brasil (Valenti et al. 2021). Em 2020, a produção de curimatá foi superior a 3.000 toneladas, representando 0,48% de toda a produção aquícola daquele ano (IBGE, 2021).

Para avaliar a prática de uma aquicultura sustentável é essencial medir a sustentabilidade dos sistemas de produção. Deste modo, é possível identificar as fortalezas e fraquezas de cada sistema, bem como a eficiência de cada nova intervenção realizada em busca da sustentabilidade (Valenti et al., 2018). Explorar e analisar os sistemas de aquicultura de modo holístico, contemplando todas as dimensões da sustentabilidade e as variáveis de natureza diferentes que compõem o processo de produção, é a principal dificuldade em se avaliar a sustentabilidade (Valenti et al., 2011; Valenti et al., 2018). Uma ferramenta que possibilita a avaliação da sustentabilidade de sistemas de produção aquícolas de um modo mais simplificado é o conjunto de indicadores desenvolvidos por Valenti et al. (2018). Este conjunto de indicadores é uma ferramenta quantitativa, abrangente, viável e fácil de ser compreendida e interpretada, que pode ser utilizada para caracterizar a sustentabilidade, possibilitando comparações (Valenti et al., 2018).

Em face aos argumentos expostos, o objetivo desta tese é avaliar a viabilidade técnica e econômica e a sustentabilidade do cultivo de *A. lacustris* em monocultivo e cultivo integrado com espécies bentônicas. Este trabalho foi desenvolvido em conjunto com outros quatro projetos que analisaram (1) o balanço de nitrogênio, (2) de fósforo e (3) de energia dos sistemas estudados, medindo quanto de cada nutriente (nitrogênio e fósforo) e energia se acumula em

cada compartimento, e (4) a contribuição das fontes de alimento disponíveis para as espécies cultivadas, por meio do uso de isótopos estáveis. Dessa forma, os sistemas poderão ser compreendidos como um todo por meio de trabalhos que se complementam e otimizam o uso das instalações e dos recursos destinados a pesquisa. A tecnologia desenvolvida referente ao cultivo integrado de *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *P. lineatus* foi patenteada na base de patentes Brasileira (INPI) # BR 10 2020 005641 7; em 20 março de 2020.

Referências

- Ahmed, N.; Thompson, S. The blue dimensions of aquaculture: A global synthesis. **Science of the Total Environment**, v. 652, p. 851–861, 2019.
- Barone, R. S. C.; Lorenz, E. K.; Sonoda, D. Y.; Cyrino, J. E. P. Fish and fishery products trade in Brazil, 2005 to 2015: A review of available data and trends. **Scientia Agricola**, v.74, n.5, p. 417-424, 2017.
- Bosma, R. H.; Verdegem, M. C. J. Sustainable aquaculture in ponds: Principles, practices and limits. **Livestock Science**, v. 139, n. 1–2, p. 58–68, 2011.
- Boyd, C. E.; D'abramo, L. R.; Glencross, B. D.; Huyben, D. C.; Juarez, L. M.; Lockwood, G. S.; Mcnevin, A. A.; Tacon, A. G.J.; Teletchea, F.; Tomasso, J. R.; Tucker, C. S.; Valenti, W. C. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 51, n. 3, p. 578–633, 2020.
- Castagnolli, N. Piscicultura de água doce. Jaboticabal: **Funep**, 1992.
- Chopin, T. Integrated Multi-Trophic Aquaculture. Ancient, Adaptable Concept Focuses On Ecological Integration. **Global Aquaculture Advocate**, v. 16, p. 16–19, 2013.
- Costa-Pierce, B. A. Sustainable ecological aquaculture systems: The need for a new social contract for aquaculture development. **Marine Technology Society Journal**, v. 44, n. 3, p. 88–112, 2010.
- David, F. S.; Proença, D. C.; Valenti, W. C. Nitrogen budget in integrated aquaculture systems with Nile tilapia and Amazon River prawn. **Aquaculture International**, v. 25, n. 5, p. 1733–1746, 2017a.
- David, F. S.; Proença, D. C.; Valenti, W. C. Phosphorus Budget in Integrated Multitrophic Aquaculture Systems with Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, and Amazon River Prawn, *Macrobrachium amazonicum*. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 48, n. 3, p. 402–414, 2017b.
- De Resende, E. K.; Catella, A. C.; Nascimento, F. L.; Palmeira, S. da S.; Pereira, R. A. C.; Lima, M. de S.; Almeida, V. L. L. Biologia do curimatá (*Prochilodus lineatus*), pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) e cachara (*Pseudoplatystoma fasciatum*) na bacia hidrográfica do rio Miranda, Pantanal do Mato Grosso do Sul, Brasil. **EMBRAPA-CPAP. Boletim de Pesquisa**, v. 02, 1996.
- FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome. **Nature and Resources**, p. 1-206 Disponível em: <<https://doi.org/10.4060/ca9229en>>
- Ferreira, P. de M. F.; Nascimento, L. da S.; Dias, D. C.; Moreira, D. M. da V.; Salaro, A. L.; de Freitas, M. B. D.; Carneiro, A. P. S.; Zuanon, J. A. S. Essential oregano oil as a growth promoter for the yellowtail tetra, *Astyanax altiparanae*. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 45, n. 1, p. 28–34, 2014.
- Flickinger, D. L.; Costa, G. A.; Dantas, D. P.; Moraes-Valenti, P.; Valenti, W. C. The budget of nitrogen in the grow-out of the Amazon river prawn

- (*Macrobrachium amazonicum* Heller) and tambaqui (*Colossoma macropomum* Cuvier) farmed in monoculture and in integrated multitrophic aquaculture systems. **Aquaculture Research**, v. 50, n. 11, p. 3444–3461, 2019.
- Flickinger, D. L.; Dantas, D. P.; Proença, D. C.; David, F. S.; Valenti, W. C. Phosphorus in the culture of the Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum*) and tambaqui (*Colossoma macropomum*) farmed in monoculture and in integrated multitrophic systems. **Journal of the World Aquaculture Society**, n. May, p. 1–22, 2020a.
- Flickinger, D. L.; Costa, G. A.; Dantas, D. P.; Proença, D. C.; David, F. S.; Durborow, R. M.; Moraes-Valenti, P.; Valenti, W. C. The budget of carbon in the farming of the Amazon river prawn and tambaqui fish in earthen pond monoculture and integrated multitrophic systems. **Aquaculture Reports**, v. 17, n. September 2019, p. 100340, 2020b.
- Fonseca, T.; Costa-Pierce, B. A.; Valenti, W. C. Lambari Aquaculture as a Means for the Sustainable Development of Rural Communities in Brazil. **Reviews in Fisheries Science and Aquaculture**, v. 25, n. 4, p. 316–330, 2017.
- Franchini, A. C.; Costa, G. A.; Pereira, S. A.; Valenti, W. C.; Moraes-Valenti, P. Improving production and diet assimilation in fish-prawn integrated aquaculture, using *iliophagus* species. **Aquaculture**, v. 521, n. October 2019, p. 735048, 2020.
- Fugi, R.; Hahn, N. S.; Agostinho, A. A. Feeding styles of five species of bottom-feeding fishes of the high Paraná River. **Environmental Biology of Fishes**, v. 46, n. 3, p. 297–307, 1996.
- Henares, M. N. P.; Medeiros, M. V.; Camargo, A. F. M. Overview of strategies that contribute to the environmental sustainability of pond aquaculture: rearing systems, residue treatment, and environmental assessment tools. **Reviews in Aquaculture**, v. 12, n. 1, p. 453–470, 2020.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa da Pecuária Municipal, 2020. Acesso em: 13 de junho de 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3940>
- Kibria, A. S. M.; Haque, M. M. Potentials of integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in freshwater ponds in Bangladesh. **Aquaculture Reports**, v. 11, p. 8–16, 2018.
- Lucena, C. A.; Soares, H. G. Review of species of the *Astyanax bimaculatus* “caudal peduncle spot” subgroup sensu Garutti & Langeani (Characiformes, Characidae) from the rio La plata and rio São Francisco drainages and coastal system of southern Brazil and Uruguay. **Zootaxa**. Auckland, New Zealand, v.4072, n. 1, p. 101-125, 2016.
- Marques, H. L. D. A.; Moraes-Valenti, P. M. C. Current status and prospects of farming the giant river prawn (*Macrobrachium rosenbergii* (De Man 1879) and the Amazon river prawn *Macrobrachium amazonicum* (Heller 1862)) in Brazil. **Aquaculture Research**, v. 43, n. 7, p. 984–992, 2012.
- Marques, H. L.A.; New, M. B.; Boock, M. V.; Barros, H. P.; Mallasen, M.; Valenti, W. C. Valenti Integrated freshwater prawn farming: State-of-the-art and future

- potential. **Reviews in Fisheries Science and Aquaculture**, v. 24, n. 3, p. 264–293, 2016.
- Thomas, M.; Pasquet, A.; Aubin, J.; Nahon, S.; Lecocq, T. When more is more: taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. **Biological Reviews**, v. 96, n. 2, p. 767–784, 2021.
- UN. United Nations General Assembly, Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development, United Nations, 1771, 21 outubro 2015, A/RES/70/1, Treaty Series, 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=111&nr=8496&menu=35>. Acessado em: 29/09/2021
- Valenti, W. C.; Kimpara, J. M.; Preto, B. D. L. Measuring aquaculture sustainability. **World Aquaculture**, v. 42, n. 3, p. 26–30, 2011.
- Valenti, W. C.; Kimpara, J. M.; Preto, B. de L.; Moraes-Valenti, P. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. **Ecological Indicators**, v. 88, p. 402–413, 2018.
- Valenti, W. C.; Barros, H. P.; Moraes-Valenti, P.; Bueno, G. W.; Cavalli, R. O. Aquaculture in Brazil: past, present and future. **Aquaculture Reports**, v. 19, p. 100611, 2021.
- Valladão, G. M. R.; Gallani, S. U.; Pilarski, F. South American fish for continental aquaculture. **Reviews in Aquaculture**, v. 10, n. 2, p. 351–369, 2018.
- Zhou, H. D.; Jiang, C. L.; Zhu, L. Q.; Wang, X. W.; Hu, X. Q.; Cheng, J. Y.; Xie, M. H. Impact of pond and fence aquaculture on reservoir environment. **Water Science and Engineering**, v. 4, n. 1, p. 92–100, 2011.

Apresentação do Trabalho

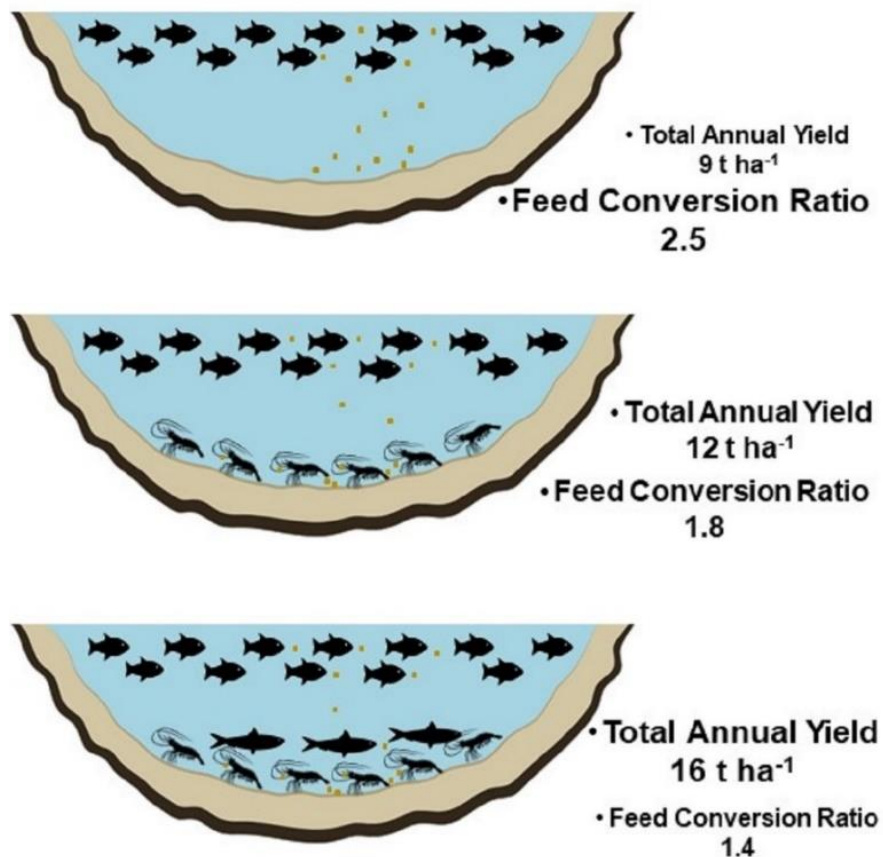
Com o intuito de caracterizar e comparar três sistemas de produção do *Astyanax lacustris* (lambari-do-rabo-amarelo) quanto a sua viabilidade técnica, viabilidade econômica e sustentabilidade, esta tese foi dividida em três capítulos. O primeiro capítulo foi publicado na revista *Sustainability* (<https://doi.org/10.3390/su131810196>) e, portanto, está escrito de acordo com suas normas. No segundo capítulo, foi abordado a viabilidade econômica dos sistemas de produção estudados, e no terceiro capítulo foi discorrido a respeito da sustentabilidade dos sistemas de produção do *A. lacustris*, quanto ao aspecto ambiental, econômico e social.

Capítulo 1:

Improving the Efficiency of Lambari Production and Diet Assimilation Using Integrated Aquaculture with Benthic Species

Aline M. Marques¹, André Z. Boaratti¹, Dalton Belmudes¹, Julia R. C. Ferreira¹, Paulo V. L. Mantoan¹, Patricia Moraes-Valenti¹ and Wagner C. Valenti¹

¹ Aquaculture Center, UNESP—São Paulo State University, São Paulo 14884-900, Brazil; am.marques@unesp.br (A.M.M.); andre.z.boaratti@unesp.br (A.Z.B.); dalton.belmudes@gmail.com (D.B.); julia.raquel@unesp.br (J.R.C.F.); paulovictormantoan@hotmail.com (P.V.L.M.); moraes.valenti@unesp.br (P.M.-V.)



Abstract

A single farmed fish species assimilates about 20% of the nutrients in the supplied diet. This study evaluated if the culture of complementary ecological-function species can recover nutrients dispersed into the water and transform them into high-valued biomass. A completely randomized experiment was designed with three treatments and four replications of each production system: monoculture of lambari (*Astyanax lacustris*); integrated aquaculture of lambari and Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum*); and integrated aquaculture of lambari, Amazon river prawn, and curimbatá (*Prochilodus lineatus*). Fingerlings of lambari (0.8 ± 0.8 g) were stocked in twelve earthen-ponds (0.015 ha) at the density of 50 fish m^{-2} . Eight ponds, were stocked with juveniles of Amazon river prawn (1.1 ± 0.2 g) at the density of 25 prawn m^{-2} . Four of these eight ponds were stocked with curimbatá fingerlings (0.2 ± 0.1 g) at a density of 13 fish m^{-2} . Only lambari was fed twice a day with an extruded commercial diet. The experiment lasted 60 days when lambari attained commercial size. The inclusion of prawn increased the total species yield from 1.8 to 2.4 t ha^{-1} cycle $^{-1}$ and reduced the feed conversion ratio (FCR) from 2.5 to 1.8. The inclusion of prawn and curimbatá increased the total yield to 3.2 t ha^{-1} cycle $^{-1}$ and reduced the FCR to 1.4. Therefore, the integrated culture of lambari, prawn, and curimbatá improves the use of space, water, feed, and benthic species can recover the large quantity of nutrients accumulated in the bottom of lambari pond production, converting them into high-nutritional and monetary-valued biomass.

Keywords: *Astyanax*; *Macrobrachium*; *Prochilodus*; IMTA; resources optimization; integrated aquaculture

1. Introduction

Worldwide aquaculture production surpassed 120 million tonnes and USD 275 billion in 2019 [1]. This activity is one of the fast-growing food-producing sectors, increasing about 6% yearly in the past three decades, employing more than 20 million people [2]. Aquaculture is essential to meet the increase in animal protein demand and provide food security [3]. Recently, animal aquaculture based on allochthone diets (fed aquaculture) surpassed unfed aquaculture [2]. Diet is the major operating cost in fed monoculture systems [4]. Besides, it is the primary waste source in fish and shrimp monocultures [5-7]. This situation is because a single species is not able to assimilate most diet nutrients and energy. In monocultures, the farmed species assimilates only ~20% of the diet nutrients, while almost 80% are dispersed into the water as particulate matter or dissolved nutrients and transform into pollution [4].

Integrated systems are based on farming more than one species per pond, and then it is possible to occupy the three spatial dimensions and different ecological niches [4]. These systems promote synergistic interactions between farmed species. The available resources can be more efficiently used, shared, recycled, and converted into biomass of high commercial value, based on the economic circularity concept. These systems also promote animal welfare and reduce environmental impact [8,9]. The integrated multitrophic aquaculture (IMTA) system is based on the farming of species with different trophic levels and/or with complementary functions and economic potential. The IMTA systems generally combine fed species with extractive species. These species use food waste and residues from the production of the fed species to grow; thus, it is possible to recover nutrients and increase yield without increasing inputs [10]. Therefore, choose suitable species that showed compatibility and complementarity is crucial to improving aquaculture sustainability [8,9].

Lambari is a group of small native fish from Brazil common in natural freshwater. They have gained visibility and good acceptance in very profitable market niches, such as human food and live bait for sport fishing [11,12]. The yellow tail lambari (*Astyanax lacustris*, former *A. bimaculatus*) [13] has opportunistic omnivorous feeding habits, high reproductive rate, short life cycle, and easy management, showing high qualities for aquaculture [14,15]. Despite the

recent increasing production, reaching 1,000 t in 2019 [12], and significant interest, there are no established standard raising systems and practices for farming this specie. Fonseca et al. [15] recommend the IMTA to improve the sustainability of the yellow tail lambari production in Brazil. Amazon river prawn, *Macrobrachium amazonicum*, is another species with great potential for aquaculture and described as an excellent alternative to composing IMTA systems. This species is detritivore and omnivorous, ingesting macrozoobenthos, algae, dead plants, and other residues deposited on lakes and river bottoms [16], and has a benthic habit, which avoids competition with pelagic species. However, studies carried out previously showed that the nutrients accumulated on the pond bottom at the end of the integrated farming of pelagic fish and Amazon river prawn are still large, making it possible to include another bottom detritivorous species [17-22]. Therefore, the addition of a third detritivorous species should improve nutrient recovery in the integrated system composed of a fed pelagic fish and a benthic prawn.

Curimatá, *Prochilodus lineatus*, is another indigenous species in Brazil also known as curimba or curimatã. This species is exploited by fisheries and aquaculture in different regions of South America [12, 23-27]. This is an iliophagus fish that feeds predominantly on fine-particle organic matter and periphyton over the bottom of rivers and lakes [28, 29]. Thus, curimatá can be an excellent option for the IMTA system with yellow tail lambari and Amazon river prawn. Curimatá was introduced in China and Vietnam, where it has been farmed in integrated culture [29].

Considering the above rationale, this study aimed to evaluate if the introduction of benthic species with complementary niche trophic in the culture of a pelagic fish would recover lost nutrients and increase the yield, improving the utilization of the supplied diet. Yellow tail lambari, Amazon river prawn, and curimatá are excellent models to test this hypothesis because they have complementary food habits and occupy different spaces inside ponds. Yellow tail lambari swims in the water column close to the surface, curimatá close to the bottom, and the Amazon river prawn walk on the bottom. In addition, they have economic importance, and thus, results can be applied to develop farm technology.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental Design

An experiment of monoculture and integrated cultures was carried out at the Crustacean Sector of Aquaculture Center (CAUNESP), São Paulo State University, Jaboticabal, São Paulo, Brazil (21°15'22' 'S, 48°18'48''W) from 04 February 2019 to 04 April 2019. This period was necessary for the fish *Astyanax lacustris* to achieve the size for commercialization. The study was conducted in twelve earthen ponds with an area of ~0.015 ha and a depth of 1 m. Pond characteristics and general management match the current practice performed in commercial yellow tail lambari farms. The ponds were initially drained, air-dried, and cleaned by removing the sediment accumulated on the bottom, resulting from previous cultures. Then, the ponds were filled with nutrient-rich water from two reservoirs that receive aquaculture effluents. The water was supplied throughout the culture to compensate for losses for seepage and evaporation.

The experimental design was completely randomized with three treatments and four replications. The treatments were monoculture of yellow tail lambari (*A. lacustris*) (LM), integrated culture of yellow tail lambari and Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum*) (LP), and integrated culture of yellow tail lambari, Amazon river prawn, and curimbatá (*Prochilodus lineatus*) (LPC). The Amazon river prawn juveniles (5.4 ± 0.4 cm; 1.1 ± 0.2 g) were obtained from CAUNESP, which broodstock originated in the state of Pará, Amazonia (01°14'30''S, 48°19'52''W). They were stocked in the ponds at a density of 25 prawns m⁻² for the LP and LPC treatments (Figure 1). After 15 days, the curimbatá fingerlings (2.5 ± 0.3 cm; 0.2 ± 0.1 g) were stocked at a density of 13 fish m⁻² for LPC treatment. Then, the yellow tail lambari fingerlings (3.4 ± 0.8 cm; 0.8 ± 0.8 g) were stocked at a density of 50 fish m⁻² in all treatments. The fingerlings of both fish species were obtained from commercial hatcheries in the state of São Paulo, Brazil. The yellow tail lambari stocking density matches the usual practices in Brazilian commercial farms, while the other species were stocked in lower densities than usually are used in monocultures.

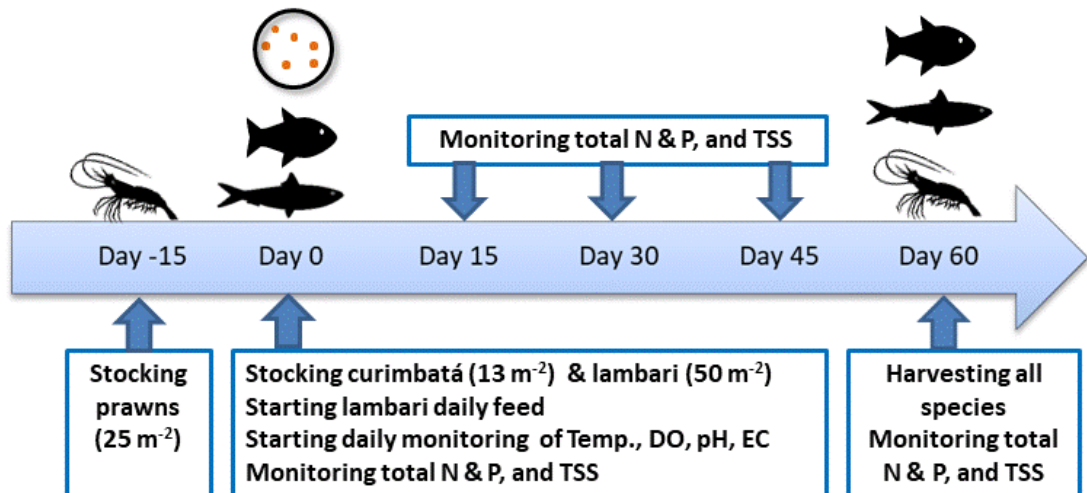


Figure 1. Timeline showing the sequence of actions from animal stocking to harvesting. Four ponds were stocked with lambari, four with lambari and prawn and four with lambari, prawn and curimbatá. Temp. = temperature; DO = dissolved oxygen; EC = Electric conductivity; N = total nitrogen; P = total phosphorus; TSS = total suspended solids.

2.2. Feeding management

The feeding for all treatments began after the stocking of the yellow tail lambari (Figure 1). Before that, the Amazon river prawn and curimbatá fed on natural biota [30-32]. A commercial diet recommended for omnivorous fish juveniles was provided. Primary ingredients were soybean, corn and fishmeal. The proximate composition was 36% of crude protein, 7% lipids, 3% fiber and 12% of mineral matter; the pellets had 2.3 mm. Feed was supplied just for yellow tail lambari twice a day at 10 a.m. and 04:30 p.m. Initially, the feeding rate was 10% of the yellow tail lambari biomass. When this fish attained mean biomass of 3.8 ± 0.3 g (day 34), it was reduced to 5% of the biomass until the experiment's conclusion. The prawns and curimbatás fed on the diet remain and the wastes produced by the yellow tail lambari and natural biota.

2.3. Water quality

The water variables temperature, dissolved oxygen (DO), pH, and conductivity were monitored daily at 08:00 a.m. (Figure 1), using a probe YSI Professional Plus (Yellow Springs Instruments Company, Yellow Springs, USA) and maintained within the recommendations described in Boyd [33] for general

aquaculture pond systems (Table 1). Aerators (Bernauer, model B-500 Aquahobby-monophasic) were used in all ponds only in emergencies to maintain adequate levels of dissolved oxygen. The aerators were turned on just when the dissolved oxygen was less than 3 mg L⁻¹. No significant differences among treatments were observed in all variables, except for DO.

Table 1. The mean $\pm$ standard deviation of the water quality variables, measured in each treatment during culture. Inlet water had $534 \pm 284 \mu\text{g L}^{-1}$ of total nitrogen and $142 \pm 37 \mu\text{g L}^{-1}$ of total phosphorus. LM = lambari monoculture; LP = lambari and prawn integrated culture; LPC = lambari, prawn and curimatá integrated culture. DO = Dissolved oxygen, TSS = Total Suspended Solids.

Variables		Treatment			P*
		LM	LP	LPC	
Temperature	°C	27.6 ± 0.2	27.9 ± 0.2	27.9 ± 0.2	0.252
DO	mg L ⁻¹	4.8 ± 0.3^b	6.0 ± 0.5^a	5.4 ± 0.2^b	0.006
pH	-	8.0 ± 0.1	8.1 ± 0.4	8.1 ± 0.2	0.546
Conductivity	$\mu\text{S cm}^{-1}$	136 ± 1	134 ± 1	136 ± 1	0.162
TSS	mg L ⁻¹	17.2 ± 8.1	15.7 ± 4.9	14.9 ± 5.2	0.768
Nitrogen	$\mu\text{g L}^{-1}$	425 ± 186	477 ± 135	462 ± 136	0.554
Phosphorous	$\mu\text{g L}^{-1}$	164 ± 54	192 ± 58	173 ± 52	0.216

*P-value compare just water quality variables from treatments. Means followed by different letters in the same line indicate a significant difference between the treatments by ANOVA followed by the Fisher-LSD test ($P < 0.05$).

The water of each pond was sampled every 15 days at 7 a.m. to measure total nitrogen and phosphorus concentrations, and the total suspended solids (Figure 1). The total nitrogen and the total organic carbon were determined using oxidation catalytic combustion (Elementar—Vario TOC Select, Langensfeld, Hesse, Germany). The total phosphorus was determined by the persulfate digestion method (4500-P B5) [34] to liberate orthophosphates associated with organic material (Table 1). The inlet water and the water inside the ponds during the culture were classified as eutrophic water, according to the classification of Brow and Simpson [35] because total nitrogen and total phosphorus concentration were within the ranges $390\text{--}6100 \mu\text{g L}^{-1}$ and $16\text{--}390 \mu\text{g L}^{-1}$, respectively. Total suspended solids was determined by water filtration in glass-fiber filter and drying the residue at 105°C (method 2540-D) [34].

2.4. Harvest and productivity data collection

The ponds were drained 60 days after the yellow tail lambari stocking when all animals were harvested, and the survivors were counted (Figure 1). Samples of 100 prawns and 100 fish before and after the growth-out period were randomly sorted and measured using a caliper with a precision of 1 mm and weighed using a mass balance with a precision of 0.01 g (Marte, model AS2000C, São Paulo, SP, Brazil). The means of the final individual mass and length, survival, feed conversion ratio (FCR), and yield per hectare of pond were calculated for each species in each pond. The FCR was calculated by dividing the total amount of commercial diet supplied in each pond during the experiment by the total biomass gain harvested in the same pond. The FCR was calculated based on the harvested biomass gain of the lambari, and, in the IMTA treatments, FCR was also computed based on the sum of the harvested prawn and fish biomass gain. The annual yield was estimated by presuming 5 production cycles per year because the preparation of ponds, prawns and fish stocking can take less than 10 days in commercial farms.

2.5. Data Analysis

The data were analyzed for normality and homoscedasticity of variances using Shapiro-Wilk and Levene tests, respectively. Then, the data were subjected to one-way ANOVA (*F*-test). For significant differences, means were compared using the *Fisher-LSD* test. Differences were assumed as significant when $p < 0.05$. Statistical analyses were performed on SigmaStat for Windows (Systat Software Inc., version 3.5, San Jose, CA, USA).

3. Results

The final mean individual mass, total length, and survival of the yellow tail lambari showed no differences between treatments. In all treatments, the yellow tail lambari reached an average of 7.7 g and 7.4 cm of total length; survival was about 50%, and the yield was about 1.9 t ha⁻¹ (Table 2).

Table 2. Mass, length, survival, yield and FCR obtained in each treatment. Total annual yield was estimated presuming 5 production cycles. Initial size: yellow tail lambari (*A. lacustris*) = 3.4 ± 0.8 cm; 0.8 ± 0.8 g; Amazon river prawn (*M. amazonicum*) = 5.4 ± 0.4 cm; 1.1 ± 0.2 g; curimatá (*P. lineatus*) = 2.5 ± 0.3 cm; 0.2 ± 0.1 g. LM = lambari monoculture; LP = lambari and prawn integrated culture; LPC = lambari, prawn and curimatá integrated culture; FCR= Feed Conversion Ratio

	LM	LP	LPC
Total yield (t ha ⁻¹ cycle ⁻¹)	1.8 ± 0.4 ^c	2.4 ± 0.2 ^b	3.2 ± 0.5 ^a
Total annual yield (t ha ⁻¹)	9	12	16
Total FCR	2.5 ± 0.8 ^a	1.8 ± 0.3 ^{ab}	1.4 ± 0.3 ^b
<i>Astyanax lacustris</i>			
FCR	2.5 ± 0.8	2.2 ± 0.3	2.0 ± 0.6
Mean final mass (g)	7.7 ± 0.8	7.8 ± 0.9	7.7 ± 0.8
Mean final length (cm)	7.3 ± 0.2	7.4 ± 0.3	7.4 ± 0.1
Survival (%)	46 ± 8	48 ± 9	56 ± 14
Yield (t ha ⁻¹)	1.8 ± 0.4	1.8 ± 0.2	2.1 ± 0.5
<i>Macrobrachium amazonicum</i>			
Mean final mass (g)	-	2.7 ± 0.2	2.4 ± 0.2
Mean final length (cm)	-	6.8 ± 0.2	6.6 ± 0.2
Survival (%)	-	80 ± 4	81 ± 3
Yield (t ha ⁻¹)	-	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.0
<i>Prochilodus lineatus</i>			
Mean final mass (g)	-	-	6.1 ± 2.2
Mean final length (cm)	-	-	7.3 ± 0.7
Survival (%)	-	-	70 ± 10
Yield (t ha ⁻¹)	-	-	0.5 ± 0.1

Different letters on the same line indicate the difference between treatments by ANOVA followed by the Fisher-LSD test ($P < 0.05$).

The Amazon river prawn's final mean mass and length, survival, and yield have no statistical difference among the integrated culture treatments. The prawn's final size was about 2.6 g and 6.7 cm, the mean survival was about 81%, and the yield was 0.6 t ha⁻¹. The curimatá attained the final size of 6.1 g and 7.3 cm, and

the survival and yield were 70% and 0.5 t ha⁻¹, respectively. The total yield (biomass of all species) increased with the addition of Amazon river prawn and curimbatá, being significantly higher in the LPC than other treatments. It ranged from 1.8 t ha⁻¹ in LM to 3.2 t ha⁻¹ in LPC. The yellow tail lambari feed conversion ratio (FCR) was similar between all treatments (Table 2). For the integrated culture system, the FCR decreased with the addition of prawn and curimbatá. It was significantly lower in the LPC than in the LM treatment, but there was no difference to the LP treatment. The FCR ranged from 2.5 in LM to 1.4 in LPC.

4. Discussion

The integrated culture of yellow tail lambari, Amazon river prawn, and curimbatá showed to be technically feasible, efficient, and productive. No adverse effect on the growth, survival, and yield of the yellow tail lambari was produced by the benthic species. Similarly, curimbatá did not affect the prawn's performance. All species developed well in stagnant earthen ponds using nutrient-rich water, corroborating previous results [31,32,36]. Total annual high-value biomass produced increased from 9 t ha⁻¹ in lambari monoculture to 16 t ha⁻¹ in integrated culture, using the same space, amount of freshwater, feed, and other resources indicating a tremendous increase in system efficiency. Annually, 7 t ha⁻¹ of organic and mineral components were recovered from the environment and transformed into nutrient-rich human food and marketable product.

The yellow tail lambari is typically farmed in small earthen ponds (0.03-0.3 ha) for 3 to 4 months to attain 3 to 8 cm and are sold by US\$ 3.00/kg to processing plants or US\$ 50.00 per thousand individuals to bait-fish market [12]. Generally, farmers have low control and records of the cultures [15]. A recent survey (unpublished yet) indicated that survival ranges at about 50-60%, productivity at ~2 t ha⁻¹ cycle⁻¹, and FCR from 1.6 to 2.1 in commercial farms. Therefore, the results obtained in the present study conform to the actual commercial-farm performance. Nevertheless, in one experiment conducted in small net-cages (160 L) during 45 days, Vilela and Hayashi [37] obtained 100% survival. Henriques et al. [38] suggested that the Atlantic forest lambari (*Deuterodon iguape*) can attain 80 to 90% of survival raised in indoor recirculating tanks during 60 days. These data indicate the potential to increase the survival and yield of lambari culture by improving management practices. Mortality of yellow tail lambari in the present study and commercial farms may be caused by predation by birds and aquatic insects, susceptibility of the species to management, and the lack of a scientific-based farming protocol.

In the present study, yellow tail lambari reached the commercial size in 60 days in monoculture or integrated culture. This time is relatively short when compared to what is usual in commercial farms, which is 3 to 4 months [12]. This difference may be due to the accelerated growth of yellow tail lambari in warm and rainy seasons, the high-quality diet, or more controlled management, as observed

in the present study. Therefore, performing 5 production cycles annually, as we simulated, seems feasible after minor improvements in the technology used in commercial farms. Amazon river prawns stocked as post-larvae in growth-out ponds generally spent about 120 days to reach the commercial size [39]. Thus, 2-months juvenile prawn should be stocked in integrated culture with yellow tail lambari as a strategy to combine and coincide both species cultivation periods. The curimbatá has a slow growth rate, but it should be traded as juveniles of different sizes to grow-out farms, bait-fish for the sportive fisheries market, or the environmental mitigation market [12,31]. Juveniles of different sizes produced in hatcheries are released annually into dam-impacted hydrological basins in Brazil, which support a massive artisanal fishery [12].

The present study corroborated that the Amazon river prawn can be raised with pelagic fishes in stagnant ponds filled with eutrophic or hypereutrophic water. Rodrigues et al. [36] demonstrated the feasibility of combining Amazon river prawn with Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), and Dantas et al. [32] demonstrated the same, combining the prawn with tambaqui (*Colossoma macropomum*). All these studies used nutrient-rich water in stagnant ponds. Nevertheless, the yield of the Amazon river prawn is about $0.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ cycle}^{-1}$, when eating only diet residues and wastes of a pelagic fish, which is half of that obtained when prawn is fed with a specific commercial diet in densities below 40 prawns m^{-2} [32,36,40]. In the present study, the use of inlet water rich in phosphorus and nitrogen lead to suitable pond water quality during the entire experiment and consequently did not impact the yield. This result is according to the finds of Kimpara et al. [41], which demonstrated the feasibility of producing Amazon river prawn using nutrient-rich waters. This eutrophic or hypereutrophic inlet water may represent a source of unpaid nutrients, avoiding the use of fertilizers. Part of these nutrients can be recovered in integrated culture systems through assimilation by the farmed species.

Curimbatá may compete with prawns by space and food on the pond bottom. However, no effect on prawn growth, survival, or yield was observed. These results indicate that the competition may be low, and no agonistic behaviors negatively impacted the culture when stocking 25 juvenile prawns and 13 fingerling curimbatás by m^2 . Probably, there is only a tiny overlap of trophic niches of both species. Curimbatá eats during the day [28], and Amazon river prawn eats

alike during the day or at night [42]. Amazon river prawn eats mainly benthic organisms and large organic matter particles [16], while curimbatá ingest mud containing fine-particle organic matter, most particles lower than 105 μm , and periphyton that grow over inorganic particles [28,43]. This periphyton is composed mainly of microbial biomass [29] that extract carbon, nitrogen, phosphorous, and other nutrients from water and sediment, making them available for heterotrophic food webs.

The number and proportion of the unfed components of an integrated aquaculture system depend on the pelagic species' mass density because it provides residues and wastes. A co-stocking experiment that lasted 2 months showed that the yield of the Amazon river prawn stocked at 11 prawns m^{-2} together to 4 g tambaqui (the pelagic fed species), stocked at 1.4 m^{-2} , decreased by 25% when 5 curimbatás m^{-2} were added [31]. However, total species biomass increased 35%, and FCR decreased 30%, showing that the yield of curimbatá compensates for the decrease in the prawn yield and the recovery of lost nutrients and energy increased. The higher biomass of lambari in the present experiment than the biomass of tambaqui in the study of Franchini et al. [31] was enough to provide the necessary wastes to support the density of Amazon river prawn and curimbatá with no adverse effect on the prawn growth.

We observed that adding Amazon river prawn to yellow tail lambari culture increased the annual yield from 9 to 12 t ha^{-1} and reduced FCR from 2.5 to 1.8. The addition of curimbatá, a second benthic species, with iliophagus food habit, increased annual yield to 16 t ha^{-1} e reduce FCR to 1.4. This remarkable increase in efficiency by adding species with complementary ecological functions represented an improvement in nutrient recovery of almost 80%. The present system is ranked as the maximum level of integration (level 5), according to the scale of Boyd et al. [4], which means that one cultivated species originates by-products, which are inputs for the others and vice versa. Yellow tail lambari produces wastes that down to the bottom, providing energy and nutrients for developing benthic communities. Amazon river prawn and curimbatá will feed on the aquatic biota or directly on the wastes contributing to the mineralization of organic matter. Their bioturbation creates an upwelling of nutrient-rich water, which will fertilize the water column, boosting the development of phytoplankton, which will be eaten by the zooplankton that is nutrient-rich food to the yellow tail

lambari. Therefore, the integrated system proposed creates a looping of nutrients, increasing recycling, assimilation, and the system's circularity. This scenario is provided by the compatibility of animals, which limits competition and agonistic behavior, and the complementarity exploited by the synergistic interaction between species leading to biomitigation and production processes [9,44].

The proposed integrated system also contemplates some important sustainability principles claimed by Valenti et al. [45], such as production based on the circular economy concept, reduction in using natural resources, increasing efficiency in assimilation nutrients, and allowing the producer to conquer different markets offering different products. The three species are native to Brazil, which brings some advantages, such as avoiding risks to biodiversity and exploring consolidated local markets [27, 46]. Furthermore, the experiment was performed in conditions equivalent to the commercial farms, and therefore, the results are directly applicable, requiring few management adaptations to the lambari monoculture farms. This technology was patented on the Brazilian patent basis # BR 10 2020 005641 7; 20 March 2020. Economic assessments of using this technology in different scenarios have been done, and preliminar results are positive. Thus, the adoption of this integrated system in the production sector is promising. Nevertheless, it depends on the extension services to spread this new conception and government policies to encourage farmers to move to a more sustainable way to produce fish and prawns.

5. Conclusions

The integrated system comprised of yellow tail lambari, Amazon river prawn and curimbatá showed efficiency in recovering nutrients spread in the water. Seven tonnes of minerals and organic matter per hectare can be annually recovered from the environment and transformed into nutrient-rich human food and marketable products. This system also increases yield using the same amount of feed, water, space and other natural resources used in monocultures. The system transforms pollution into high-value marketable biomass, reducing the nutrients discharged in the effluents. Future studies should focus on determining nutrient and energy contents in the different pond ecological compartments, the stocking densities, the proportion of each species, and improving the management of the three species cultured to maximize efficiency.

References

1. FAO. *Global Aquaculture Production. FAO Fisheries and Aquaculture Statistics*. FAO: Rome, Italy, **2021**. http://www.fao.org/figis/servlet/SQServlet?file=/usr/local/tomcat/8.5.16/figis/webapps/figis/temp/hqp_4125957264323673027.xml&outtype=html (Accessed on 29 July 2021).
2. FAO. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action*. FAO: Rome, Italy, **2020**.
3. Béné, C.; Barange, M.; Subasinghe, R.; Pinstруп-Andersen, P.; Merino, G.; Hemre, G. I.; Williams, M. Feeding 9 billion by 2050—Putting fish back on the menu. *Food Security*. **2015**, 7(2), 261-274.
4. Boyd, C. E.; D'Abramo, L. R.; Glencross, B. D.; Huyben, D. C.; Juarez, L. M.; Lockwood, G. S.; McNevin, A. A.; Tacon, A. G. J.; Teletchea, F.; Tomasso Jr, J. R.; Tucker, C. S.; Valenti, W. C. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*. **2020**, 51(3), 578-633.
5. Hardy, R.W.; Gatlin, D. Nutritional strategies to reduce nutrient losses in intensive aquaculture. In *Avances en Nutrición Acuícola VI. Proceedings of the VI Simposium Internacional de Nutrición Acuícola*, Cancun, Quintana Roo, Mexico, 3–6 September 2002; Cruz-Suárez, L.E., Ricque-Marie, D., Tapia-Salazar, M., Gaxiola-Cortés, M.G., Simoes, N., Eds.; Universidad Autónoma de Nuevo León: Monterrey, Mexico, 2002.
6. Tacon, A. G. J.; Forster, I. P. Aquafeeds and the environment: policy implications. *Aquaculture*. **2003**, 226, 181-189.
7. Mongirdas, V.; Žibienė, G.; Žibas, A. Waste and its characterization in closed recirculating aquaculture systems – a review. *Journal of water security*, vol. 3, article number: jws2017002, **2017**.
8. Henares, M. N.; Medeiros, M. V.; Camargo, A. F. Overview of strategies that contribute to the environmental sustainability of pond aquaculture: rearing systems, residue treatment, and environmental assessment tools. *Reviews in Aquaculture*. **2020**, 12(1), 453-470.
9. Thomas, M.; Pasquet, A.; Aubin, J.; Nahon, S.; Lecocq, T. When more is more: taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biological Reviews*. **2021**, 96(2), 767-784.
10. Chopin, T.; MacDonald, B.; Robinson, S.; Cross, S.; Pearce, C.; Knowler, D.; Noce, A.; Reid, G.; Cooper, A.; Speare, D.; Burrige, L.; Crawford, C.; Sawhney, M.; Ang, K. P.; Backman, C.; Hutchinson, M. The Canadian Integrated Multi-Trophic Aquaculture Network (CIMTAN) - A Network for a New Era of Ecosystem Responsible Aquaculture. *Fisheries*. **2013**, 38(7), 297-308.
11. Henriques, M. B.; Fagundes, L.; Pretesse, M. L.; Silva, N. J. R.; Rezende, K. F. O.; Barbieri, E. Lambari fish *Deuterodon iguape* as an alternative to live bait for

- estuarine recreational fishing. *Fisheries Management and Ecology*. **2018**, 25, 400-407.
12. Valenti, W. C.; Barros, H. P.; Moraes-Valenti, P.; Bueno, G. W.; Cavalli, R. O. Aquaculture in Brazil: past, present and future. *Aquaculture Reports*. **2021**, 19, 100611.
13. Lucena, C. A.; Soares, H. G. Review of species of the *Astyanax bimaculatus* “caudal peduncle spot” subgroup sensu Garutti & Langeani (Characiformes, Characidae) from the rio La plata and rio São Francisco drainages and coastal system of southern Brazil and Uruguay. *Zootaxa*. **2016**, 4072(1), 101-125.
14. Ferreira, P. M. F.; Nascimento, L. S.; Dias, D. C.; Moreira, D. M. V.; Salaro, A. L.; Freitas, M. B. D.; Carneiro, A. P. S.; Zuanon, J. A. S. Essential oregano oil as a growth promoter for the yellow tail tetra, *Astyanax altiparanae*. *Journal of the World Aquaculture Society*. **2014**, 45(1), 28-34.
15. Fonseca, T.; Costa-Pierce, B. A.; Valenti, W. C. Lambari Aquaculture as a Means for the Sustainable Development of Rural Communities in Brazil. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*. **2017**, 25(4), 316-330.
16. Kensley, B. and Walker, I. Palaemonid Shrimps from the Amazon Basin, Brazil (Crustacea: Decapoda: Natantia). *Smithsonian Contributions to Zoology*. **1982**, 362:1-27.
17. David, F. S.; Proença, D. C.; Valenti, W. C. Phosphorus budget in integrated multitrophic aquaculture systems with Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, and Amazon River prawn, *Macrobrachium amazonicum*. *Journal of the World Aquaculture Society*. **2017**, 48(3), 402-414.
18. David, F. S.; Proença, D. C.; Valenti, W. C. Nitrogen budget in integrated aquaculture systems with Nile tilapia and Amazon River prawn. *Aquaculture International*. **2017**, 25(5), 1733-1746.
19. David, F. S.; Proença, D. C.; Flickinger, D. L.; Bueno, G. W.; Valenti, W. C. Carbon budget in integrated aquaculture systems with Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum*). *Aquaculture Research*. **2021**, 52(6), 1-13.
20. Flickinger, D. L.; Costa, G. A.; Dantas, D. P.; Moraes-Valenti, P.; Valenti, W. C. The budget of nitrogen in the grow-out of the Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum* Heller) and tambaqui (*Colossoma macropomum* Cuvier) farmed in monoculture and in integrated multitrophic aquaculture systems. *Aquaculture Research*. **2019**, 50(11), 3444-3461.
21. Flickinger, D. L.; Dantas, D. P.; Proença, D. C.; David, F. S.; Valenti, W. C. Phosphorus in the culture of the Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum*) and tambaqui (*Colossoma macropomum*) farmed in monoculture and in integrated multitrophic systems. *Journal of the World Aquaculture Society*. **2020**, 51:1002–1023.
22. Flickinger, D. L.; Costa, G. A.; Dantas, D. P.; Proença, D. C.; David, F. S.; Durborow, R. M.; Moraes-Valenti, P.; Valenti, W. C. The budget of carbon in the farming of the Amazon river prawn and tambaqui fish in earthen pond

- monoculture and integrated multitrophic systems. *Aquaculture Reports*. **2020**, 17, 100340.
23. Wright, J. P.; Flecker, A. S. Deforesting the riverscape: the effects of wood on fish diversity in a Venezuelan piedmont stream. *Biological Conservation*. **2004**, 120, 439-447.
24. Taylor, B. W.; Flecker, A. S.; Hall Jr, R. O. Loss of a harvested fish species disrupts carbon flow in a diverse tropical river. *Science*. **2006**, 313, 833-836.
25. Sampaio, L. A.; Ono, E.; Routledge, E. A. B.; Correia, E. S.; Moraes-Valenti, P.; Martino, R. C. Brazilian aquaculture update. *World Aquaculture*. **2010**, 35, 41-68.
26. Freire, K. M. F.; Machado, M. L.; Crepaldi, D. Overview of inland recreational fisheries in Brazil. *Fisheries*. **2012**, 37 (11), 484-494.
27. Saint-Paul, U. Native fish species boosting Brazilian's aquaculture development. *Acta of Fisheries and Aquatic Resources*. **2017**, 5(1), 1-9.
28. Fugi, R.; Hahn, N. S.; Agostinho, A. A. Feeding styles of five species of bottom-feeding fishes of the high Paraná River. *Environmental Biology of Fishes*. **1996**, 46, 297-307.
29. Kalous, L.; Bui, A. T.; Petrtyl, M.; Bohlen, J.; Chaloupkova, P. The south American freshwater fish *Prochilodus lineatus* (Actinopterygii: Characiformes: Prochilodontidae): new species in Vietnamese aquaculture. *Aquaculture Research*. **2012**, 43, 955-958.
30. D'Abramo, L. R.; Sheen, S. S. Nutritional requirements, feed formulation, and feeding practices for intensive culture of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Reviews in Fisheries Science*. **1994**, 2:1, 1-21, DOI: 10.1080/10641269409388551.
31. Franchini, A. C.; Costa, G. A.; Pereira, S. A.; Valenti, W. C.; Moraes-Valenti, P. Improving production and diet assimilation in fish-prawn integrated aquaculture, using iliophagus species. *Aquaculture*. **2020**, 521, 735048.
32. Dantas, D. P.; Flickinger, D. L.; Costa, G. A.; Batlouni, S. R.; Moraes-Valenti, P.; Valenti, W. C. Technical feasibility of integrating Amazon river prawn culture during the first phase of tambaqui grow-out in stagnant ponds, using nutrient-rich water. *Aquaculture*. **2020**, 516, 734611.
33. Boyd, C. E. *Water quality: an introduction*. Springer Nature, Alburn, AL, USA, **2019**.
34. APHA (American Public Health Association). Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA, 23rd edition, Washington, DC, USA, **2017**.
35. Brown, T.; Simpson, J. Managing phosphorus inputs to urban lakes: I. Determining the trophic state of your lake. *Watershed Protection Techniques*, 2001, 3(4), 771.
36. Rodrigues, C. G.; Garcia, B. F.; Verdegem, M.; Santos, M. R.; Amorim, R. V.; Valenti, W. C. Integrated culture of Nile tilapia and Amazon river prawn in stagnant ponds, using nutrient-rich water and substrates. *Aquaculture*. **2019**, 503, 111-117.

37. Vilela, C.; Hayashi, C. Desenvolvimento de juvenis de lambari *Astyanax bimaculatus* (Linnaeus, 1758), sob diferentes densidades de estocagem em tanques-rede. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*. **2001**, 23, 491-496.
38. Henriques, M. B.; Caeneiro, J. S.; Fagundes, L.; Castilho-Barros, L.; Barbieri, E. Economic feasibility for the production of live baits of lambari (*Deuterodon iguape*) in recirculations system. *Boletim do Instituto de Pesca*. **2019**, 45(4), 516-524.
39. Marques, H. L. A.; Moraes-Valenti, P. Current status and prospects of farming the giant river prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De M an 1879) and the Amazon river prawn *Macrobrachium amazonicum* (Heller 1862)) in Brazil. *Aquaculture Research*. **2012**, 43(7), 984-992.
40. Moraes-Valenti, P.; Valenti, W. C. Effect of intensification on grow out of the Amazon River prawn, *Macrobrachium amazonicum*. *Journal of the World Aquaculture Society*, **2007**, 38(4), 516-526.
41. Kimpara, J. M.; Rosa, F. R. T.; Preto, B. L.; Valenti, W. C. Limnology of *Macrobrachium amazonicum* grow-out ponds subject to high inflow of nutriente-rich water and diferente stocking and harvest management. *Aquaculture Research*. **2011**, 42:1289-1297.
42. Ibrahim, A. N. A. F.; Karplus, I.; Valenti, W. C. Social interaction in males of the Amazon river prawn *Macrobrachium amazonicum* (Heller, 1862) (Decapoda, Palaemonidae). *Crustaceana*. **2021**, 94(3), 325–341.
43. Fugi, R.; Agostinho, A. A.; Hahn, N. S. Trophic morphology of five benthic feeding fish species of a tropical floodplain. *Revista Brasileira de Biologia*. **2001**, 61(1), 27-33.
44. Marques, H. L. A.; New, M. B.; Boock, M. V.; Barros, H. P.; Mallasen, M.; Valenti, W. C. Integrated freshwater prawn farming: state-of-the-art and future potential. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*. **2016**, 24(3), 264–293.
45. Valenti, W. C.; Kimpara, J. M.; Preto, B. L.; Moraes-Valenti, P. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecological Indicators*. **2018**, 88, 402-413.
46. Valladão, G. M. R.; Gallani, S. U.; Pilarski, F. South American fish for continental aquaculture. *Reviews in Aquaculture*. **2018**, 10(2), 351–369.

Capítulo 2:

Viabilidade Econômica de Sistemas de Produção de *Astyanax lacustris*

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade econômica do monocultivo de lambari (*Astyanax lacustris*), do cultivo integrado de lambari e camarão (*Macrobrachium amazonicum*), e do cultivo integrado de lambari, camarão e curimatã (*Prochilodus lineatus*). Simulações de cada sistema foram conduzidas, considerando fazendas com áreas 1 e 5 ha de viveiros de produção, e localizadas em uma região de clima subtropical do Brasil. Em todas as fazendas foi projetada uma área de produção de alevinos de lambari, além da área de viveiros de produção. Nas fazendas de cultivo integrado também foi planejada uma área de berçário de camarões. O mercado explorado foi o de isca viva para o lambari e o camarão, e o de repovoamento de bacias hidrográficas para o curimatã. O investimento para fazendas de monocultivo de 1ha foi de ~R\$ 515.000, e de ~R\$ 1.720.000 em fazendas de 5 ha. A integração com espécies como o camarão e o curimatã necessitou de um investimento de ~R\$ 570.000 e de ~R\$ 1.995.000 para fazendas de 1 e 5 ha, respectivamente. Os itens de investimento relacionados à construção e instalações, e os custos com ração, impostos e produção de alevinos de lambari foram os gastos mais representativos em todos os sistemas. Além desses, os gastos com produção de juvenis de camarão e compra de alevinos de curimatã também foram elevados nos cultivos integrados. O monocultivo (1 ha) foi inviável porque apresentou baixa taxa interna de retorno, valor presente líquido negativo e elevado período de recuperação do capital investido (PRC). O aumento da escala de produção nesse sistema trouxe viabilidade, economia de escala e PRC de 6 anos. A integração com espécies

bentônica em 1 ou 5 ha viabilizou a atividade, reduzindo o PRC para 2 anos em cultivo com três espécies em 5ha. Assim, concluímos que aumentar a escala de produção de monocultivo de lambari e integrar essa produção ao cultivo de espécies como o camarão e o curimatá aumenta a viabilidade econômica dos empreendimentos.

Palavras-chave: IMTA; economia circular; lambari-do-rabo-amarelo, escala de produção

1. Introdução

A produção de peixes em água doce representa cerca de 90% da aquicultura no Brasil, sendo realizada majoritariamente em sistemas tradicionais de monocultivo intensivamente arraçoados (Valenti et al., 2021). Esses tipos de cultivos têm se mostrado ao longo do tempo como sistemas muito produtivos, porém ineficientes quanto ao uso de recursos (Boyd et al., 2020), o que pode significar impacto de elevado custo para a própria atividade, para o meio ambiente e para a sociedade. Processos e ou equipamentos inovadores que promovam a reciclagem e reuso desses recursos não utilizados possibilitam a mudança da atividade em direção a sustentabilidade e a uma economia circular (Valenti et al., 2021). Em consequência de um melhor gerenciamento de recursos, alguns custos podem ser reduzidos, a lucratividade pode ser aumentada e oportunidades de mercado possam ser expandidas (Valenti et al., 2021).

Nessa perspectiva, a aquicultura integrada é uma alternativa de baixo custo aos sistemas de cultivos tradicionais (Henares et al., 2020). Essa engenharia segue os princípios da economia circular, os quais possibilitam o uso eficiente de recursos disponíveis por intermédio de interações sinérgicas entre espécies que ocupem todo o espaço tridimensional de um viveiro de produção (Boyd et al., 2020; Thomas et al., 2021). Deste modo, o uso de recursos ambientais e financeiros passam a ser otimizados resultando em um aumento da produção (Boyd et al., 2020; Chopin, 2013) e uma variação de produtos e mercados para comercialização, levando ao aumento da resiliência do empreendimento. Essa resiliência é um fator de grande importância para o sucesso de qualquer atividade estabelecida em um mundo em constante mudanças (Valenti et al., 2018).

A aquicultura do lambari é um exemplo de atividade que tem se expandido no interior do estado de São Paulo, sendo explorada de modo predominante em sistemas de monocultivo e apoiadas em práticas produtivas empíricas, sem muita informação científica e padronização (Fonseca et al., 2017). Apesar disso, a lambaricultura apresenta amplo potencial de ser desenvolvida de modo sustentável, sendo recomendada o uso de sistemas integrados (Fonseca et al., 2017). O lambari é uma espécie que ocupa a região pelágica do viveiro de produção e apresenta hábito alimentar onívoro oportunista (Ferreira et al., 2014; Fonseca et al., 2017). As espécies que compõem este grupo podem ser

comercializadas como aperitivo para consumo humano e como isca viva para a pesca esportiva, sendo o *Astyanax lacustris* (anteriormente descrito como *A. bimaculatus*) (Lucena et al., 2016) a espécie mais utilizada para produção e comercialização (Fonseca et al., 2017; Valladão et al., 2018).

A escolha das espécies para compor um sistema integrado depende, entre outras coisas, da viabilidade técnica e econômica dos sistemas produtivos, da existência de um pacote tecnológico e nichos de mercado para as espécies cultivadas (Marques et al., 2016). O camarão-da-amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) pode ser cultivado nas mesmas instalações que o *A. lacustris*, representando uma ótima oportunidade para os produtores aumentarem a produtividade do sistema, diversificarem sua produção, expandirem o mercado e aumentar os lucros utilizando uma mesma infraestrutura (Marques et al., 2021). Além disso, o peixe curimatã (*Prochilodus lineatus*) pode compor esse sistema integrado como terceira espécie cultivada de modo a aumentar a circularidade do sistema mantendo a viabilidade técnica e proporcionando maior diversidade de mercado (Marques et al., 2021). O *M. amazonicum* é uma espécie nativa e de hábito bentônico que pode ser comercializado como isca viva para pesca, alimento para consumo humano, alimento vivo para peixes carnívoros ornamentais, e em mercado de ornamentais (Marques e Moraes-Valenti, 2012). O peixe curimatã é uma espécie nativa que se alimenta de perifíton de sedimentos e macrófitas, da camada orgânica, inorgânica depositada como sedimento de ambientes naturais (Castagnolli, 1992; De Resende et al., 1996; Fugli et al., 1996). Essa espécie vem sendo produzida e comercializada para repovoamento de bacias hidrográficas impactadas por represas no sul e sudeste do Brasil (Valenti et al., 2021).

Implementar mudanças não garantem, por si só, maior viabilidade econômica, sendo necessário computar os reais impactos destas alterações no empreendimento. No entanto, os estudos sobre a viabilidade econômica de sistemas integrados multitróficos ainda são recentes e moderados na literatura (Knowler et al., 2020). Assim, diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar e comparar a viabilidade econômica do cultivo de *A. lacustris* em monocultivo e em cultivo integrado com *M. amazonicum* e com *M. amazonicum* e *P. lineatus*, em duas escalas de produção em fazendas hipotéticas no interior de São Paulo, região subtropical do Brasil.

2. Material e Métodos

Foi realizado um estudo de viabilidade econômica de seis fazendas hipotéticas localizadas na região de Ribeirão Preto, interior do estado de São Paulo, Brasil. Nesta região o clima é caracterizado como subtropical. Cada fazenda é caracterizada por um sistema de produção de *Astyanax lacustris* (lambari-do-rabo-amarelo), sendo eles: monocultivo de *A. lacustris* (LM), cultivo integrado com *Macrobrachium amazonicum* (camarão-da-amazônia) (LCa) e cultivo integrado com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* (curimatã) (LCaC). Cada sistema de produção foi projetado com duas escalas de produção, sendo elas caracterizadas como de pequeno e médio porte (Valenti et al., 2021), por apresentarem áreas de 1 ha e 5 ha de espelho d'água, respectivamente (Tabela 1). As fazendas de pequeno porte foram planejadas com 10 viveiros escavados e as fazendas de médio porte com 50 viveiros escavados. O tamanho dos viveiros foi padronizado em 0,1 ha (20 m x 50 m x 1 m) em todos os empreendimentos. Esse tamanho de viveiros é compatível com o que tem sido observado nos cultivos comerciais de lambaris (Valenti et al., 2021). Para a elaboração da análise de viabilidade econômica partimos do pressuposto de que todos os empreendimentos estudados começariam sem qualquer infraestrutura inicial.

Tabela 1. Área ocupada por cada setor de produção e área total das fazendas consideradas neste estudo para cada fazenda e sistema produtivo. Fazendas de pequeno porte e médio porte com 1ha e 5ha de área de viveiro de produção, respectivamente. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado de *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado de *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

Área (ha)	Sistema de Produção					
	LM		LCa		LCaC	
Área de Viveiros de Produção	1,0	5,0	1,0	5,0	1,0	5,0
Área de Entorno dos Viveiros de Produção	0,3	1,3	0,3	1,3	0,3	1,3
Área de Produção de Alevinos de lambari	0,4	2,0	0,4	2,0	0,4	2,0
Área de Produção de Juvenis de camarão	0,0	0,0	0,2	0,9	0,2	0,9
Área Total da Fazenda	1,7	8,2	1,9	9,1	1,9	9,1

Em todos os sistemas de produção, o povoamento dos viveiros foi planejado com alevinos de *A. lacustris* em densidade de 50 ind. m⁻², conforme prática realizada por alguns produtores de lambaris. Para todas as fazendas estudadas, previmos o estabelecimento de instalações para a produção de

alevinos de lambari (Tabela 1). Neste espaço haveria um laboratório para manutenção e reprodução das matrizes dessa espécie, e cubas para manutenção das larvas até o momento em que houvesse o consumo total do saco vitelínico e nado em linha reta, momento em que passam a ser chamadas de pós-larvas, conforme descrito por Belmudes et al. (2021). Essas pós-larvas seriam mantidas em viveiros escavados, em densidade de 300 pl. m⁻², até alcançarem o tamanho de alevinos para o povoamento dos viveiros de produção (Tabela 2). Foi considerada uma taxa de sobrevivência de 70% nesta fase do cultivo para obtenção dos alevinos de *A. lacustris*, conforme informações obtidas direto do maior produtor do estado de São Paulo para essa espécie. A produtividade e os custos de produção nessa fase não foram analisados nesse trabalho, mas obtidos a partir da capacidade de produção descrita por Belmudes et al. (2021) para o lambari-da-mata-atlântica, *Deuterodon iguape*, e estimados de acordo com a necessidade de alevinos para o povoamento no presente estudo.

Tabela 2. Massa média individual inicial e final, sobrevivência, produtividade, conversão alimentar (média $\pm$ desvio-padrão) obtidos experimentalmente nos sistemas de produção de *Astyanax lacustris* estudados. LM = monocultivo de *A. lacustris*; LCa = cultivo integrado de *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado de *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*. (obtido em Marques et al., 2021)

Variável	Tratamentos		
	LM	LCa	LCaC
Massa Média Individual Inicial (g)			
<i>A. lacustris</i>	0,8 $\pm$ 0,8	0,8 $\pm$ 0,8	0,8 $\pm$ 0,8
<i>M. amazonicum</i>		1,1 $\pm$ 0,2	1,1 $\pm$ 0,2
<i>P. lineatus</i>			0,2 $\pm$ 0,1
Massa Média Individual Final (g)			
<i>A. lacustris</i>	7,7 $\pm$ 0,8	7,8 $\pm$ 0,9	7,7 $\pm$ 0,8
<i>M. amazonicum</i>		2,7 $\pm$ 0,2	2,4 $\pm$ 0,2
<i>P. lineatus</i>			6,1 $\pm$ 2,2
Sobrevivência (%)			
<i>A. lacustris</i>	46 $\pm$ 8	48 $\pm$ 9	56 $\pm$ 14
<i>M. amazonicum</i>		80 $\pm$ 4	81 $\pm$ 3
<i>P. lineatus</i>			70 $\pm$ 10
Produtividade (mil indivíduos/ha/ciclo)¹			
<i>A. lacustris</i>	232 $\pm$ 23	240 $\pm$ 23	279 $\pm$ 27
<i>M. amazonicum</i>		199 $\pm$ 20	203 $\pm$ 20
<i>P. lineatus</i>			91 $\pm$ 9
Produtividade Total do Sistema (mil indivíduos/ha/ciclo)¹	232	439	573
Conversão Alimentar - <i>A. lacustris</i>	2,5	2,2	2,0

¹ Dados estimados a partir dos dados obtidos por Marques et al., 2021.

O povoamento do *M. amazonicum*, em viveiros de produção integrada, foi realizado com animais no estágio juvenil de desenvolvimento em densidade de 25 ind. m⁻², e o povoamento de *P. lineatus* foi realizado com alevinos em densidade de 13 ind. m⁻². Para ambas as espécies, a densidade utilizada foi menor do que a comumente empregada em monocultivo. Para essas fazendas de cultivo integrado, foi considerada a instalação de berçários para a produção dos juvenis de *M. amazonicum* (Tabela 1). Estes são viveiros escavados para manter as pós-larvas de *M. amazonicum*, previamente compradas, em densidade de 200 pl. m⁻². O cultivo em berçário duraria ~2 meses, tempo suficiente para essas pós-larvas alcançarem o tamanho de juvenil desta espécie (Tabela 2). Foi considerado nesta fase a sobrevivência de ~70%, conforme dados de estudo previamente realizado por Penteado (2012). Após esse período, seria realizado o povoamento dos viveiros de produção integrada com *A. lacustris*, e com *A. lacustris* e *P. lineatus* (Tabela 2). Os dados e custos de produção desta fase de berçário foram obtidos a partir do estudo de Penteado (2012). Todos os valores econômicos foram atualizados pelo índice de correção IGP-DI (Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna), obtido diretamente no site da Fundação Getúlio Vargas (FGV) para o primeiro semestre de 2021.

A estratégia alimentar foi igual em todos os sistemas estudados: arraçoamento duas vezes ao dia com dieta comercial para peixes onívoros (36% proteína bruta, 7% de lipídios, 3% de fibra e 12% de matéria mineral; péletes com 2-3 mm). Inicialmente, a taxa alimentar foi de 10% da biomassa do *A. lacustris*. Quando estes animais atingiram cerca de 3 g (~30 dias) a taxa alimentar foi reduzida para 5% da biomassa deste peixe. Em todos os sistemas estudados, a alimentação com ração comercial foi baseada apenas na biomassa do *A. lacustris*. O *M. amazonicum* e o *P. lineatus* alimentaram-se dos restos alimentares e resíduos produzidos pelo *A. lacustris*, e biota natural dos viveiros. Os valores de produção utilizados nas análises econômicas foram obtidos a partir dos dados publicados por Marques et al. (2021) (Tabela 2). Estimou-se a produtividade anual supondo-se a realização de cerca de quatro ciclos ao ano. Embora seja possível realizar cinco ciclos de produção do lambari em regiões do Brasil que tenham temperaturas elevadas durante todo o ano, a região escolhida para o estudo desta simulação é caracterizada por apresentar clima subtropical. Logo, há períodos com temperaturas mais elevadas nas estações de primavera-verão e

períodos com temperaturas mais baixas no outono-inverno. Por esse motivo, foi considerado que cada ciclo de produção teria duração de 60 dias quando realizado na primavera-verão e 90 dias cada quando realizado no outono-inverno. O intervalo entre os cultivos, usado para a manutenção, preparo e enchimento dos viveiros, seria de 15 dias. A água de abastecimento foi classificada como eutrófica (Marques et al., 2021) e foi ajustada para repor as perdas por infiltração e evaporação. Desse modo, a saída do efluente ocorreu apenas durante o esvaziamento dos viveiros durante a despesca.

Para a condução das atividades destes empreendimentos, foi considerado que as fazendas de pequeno porte teriam um trabalhador permanente pouco qualificado, que realizaria atividades de alimentação, avaliação das variáveis de qualidade de água e manejo geral dos viveiros e um trabalhador especializado permanente que realizaria atividades relacionadas à produção de alevinos de lambari e juvenis de camarão no caso dos cultivos integrados. Para os períodos de despesca, seriam contratados quatro trabalhadores em caráter eventual. Nas fazendas de 5 ha a mão de obra seria composta por: 5 trabalhadores permanentes pouco qualificados e um trabalhador permanente especializado, não sendo incorporada mão de obra eventual nos períodos de despesca.

O mercado a ser explorado para o peixe *A. lacustris* e para os camarões (*M. amazonicum*) é o de iscas para a pesca esportiva. Esses animais seriam comercializados na porta da fazenda, de modo que os gastos com a retirada e transporte dos animais da fazenda seria responsabilidade do cliente. O valor de venda estimado, a partir de uma pesquisa de mercado, foi de R\$ 0,35 para a unidade de *A. lacustris* e de R\$ 0,50 para a unidade de *M. amazonicum*. Os *P. lineatus* seriam comercializados com a finalidade de repovoamento de bacias hidrográfica impactadas por barragens (Valenti et al., 2021), ao valor de R\$ 0,80 a unidade.

2.1. Análise de Viabilidade Econômica

Os investimentos iniciais foram estimados considerando as obras cíveis e a compra de veículo e equipamentos de cada projeto. Todos os valores foram orçados durante o primeiro semestre de 2021, período em que a pandemia do COVID-19 ainda estava estabelecida em todo o mundo. Os custos variáveis (CV)

consistem em gastos diretamente relacionados com a produção, tais como alevinos, ração, frete, gastos com combustível, embalagem, energia, telefone, mão de obra eventual e impostos. O valor dos impostos pagos foi obtido a partir do sistema tributário que cada fazenda melhor se enquadra. Para as fazendas LM (1 e 5 ha), LCa (1 e 5 ha) e LCaC (1 ha), com receita bruta inferior a R\$ 4,8 milhões, foi considerado a adesão ao regime de tributação simplificado, o Simples Nacional. As alíquotas incidentes sobre a receita bruta anual, vigentes no ano de 2021, foram de: 7,3% (LM – 1 ha); 9,5% (LCa – 1 ha); 10,7% (LCaC – 1 ha, e LM – 5 ha); 14,3% (LCa – 5 ha). Enquanto que o empreendimento LCaC (5 ha), com receita bruta maior do que R\$ 5 milhões, foi considerado a adesão ao sistema tributário Lucro Presumido, utilizando alíquotas vigentes para o ano de 2021. Essas alíquotas incidentes sobre a receita bruta foram de: 2,5% - Funrural (Fundo de Assistência ao Trabalhador Rural); 0,65% - PIS (Programa de Integração Social); 3% - COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social); 12% sobre a receita bruta trimestral e depois 9% sobre este valor – CSLL (Contribuição Social sobre o Lucro Líquido); 8% sobre a receita bruta trimestral e depois 15% sobre este valor – IRPJ (Imposto sobre a Renda de Pessoas Jurídicas). Para efeito de avaliação das escalas de produção foram atribuídos descontos de 10% em itens de construção civil e instalações, tais como: galpão, viveiros, monge, sistema de abastecimento e instalação elétrica, e de 5% para itens como compra de aeradores e ração, para as fazendas de 5 ha. Essa redução de preços se justifica devido à redução de custos dos fornecedores quando as quantidades de serviços ou produtos adquiridos são maiores. Os custos fixos (CF) incluem os salários de funcionários fixos, a manutenção de equipamentos e instalações, taxas fixas, depreciação de ativos e os custos de oportunidades. A depreciação foi calculada de acordo com o método linear descrito por Engle (2010).

Os custos de oportunidade (CO) considerados foram os juros sobre capital fixo e variável, remuneração do empresário e remuneração da terra. O custo total de produção foi definido pela soma dos custos variáveis e custos fixos. O custo operacional efetivo (COE) abrange os gastos necessários para que haja o funcionamento do sistema de produção. Esses custos correspondem aos custos variáveis (CV) somados a taxas de funcionamento do empreendimento, ou seja, taxa de outorga e registro do aquicultor, licenciamento ambiental, imposto

territorial rural (ITR), custos com mão de obra permanente e respectivos encargos de acordo com alíquota vigente em 2021, e custos com manutenção de equipamentos. Os encargos trabalhistas e as respectivas alíquotas consideradas foram: férias (salário + 1/3 desse salário), Fundo de Garantia do Tempo de Serviço – FGTS (8%), 13º salário, e previdência social por meio do pagamento do INSS -Instituto Nacional do Seguro Social, sendo de 7,5% sobre a 1ª faixa salarial (até R\$ 1.100), e em seguida de 9% sobre o valor remanescente da subtração do salário com o valor máximo da 1ª faixa salarial (2ª faixa salarial: R\$ R\$ 1.100,01 até R\$ 2.203,48). O custo operacional total (COT) refere-se ao COE somado a depreciação de bens. Os dados de custo e produção foram usados para determinar receita bruta (RB), receita líquida (RL) e lucro (L) conforme descrito abaixo:

$$RB = \text{Produção} \times \text{Preço de Venda} \quad (1)$$

$$RL = \text{Receita Bruta} - \text{Custos Operacionais Totais} \quad (2)$$

$$L = \text{Receita Líquida} - \text{Custos de Oportunidade} \quad (3)$$

A análise de fluxo de caixa avalia a liquidez do empreendimento ao longo do tempo de exploração (Shang, 1990). Para este estudo foi projetado um fluxo de caixa com um período de 20 anos, que é próximo à vida útil dos itens de investimento de maior valor. Além disso, segundo Valenti et al. (2018) este tempo de operação é a linha de base para a estimativa de uma geração humana, que é uma unidade adequada para usar em trabalhos de sustentabilidade. Para o ano zero dos projetos simulados, foram contabilizados o investimento inicial e o capital operacional inicial (capital de giro). Este corresponde ao valor dos custos operacionais efetivos (COE) necessários para o primeiro ano de produção. Nos anos seguintes, considerou-se a soma dos reinvestimentos, desembolsos (custo operacional efetivamente pago - COE) e receita bruta (RB). Foi incluído o valor residual de cada item ao final dos 20 anos do projeto, exceto para os ativos referentes à larvicultura dos lambaris e dos juvenis de camarões, que foram considerados desprezíveis, e o retorno do capital de giro ao final do período de 20 anos. Assumiu-se que a receita foi 40% e 10% menor no primeiro e segundo ano, respectivamente, porque foi considerado a possibilidade de ocorrer dificuldades

durante a produção e a comercialização nos primeiros anos de atividade que impossibilitaria alcançar 100% da receita estimada. Foi assumido que a inflação dos custos dos produtos será compensada pela inflação dos preços de venda.

Taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL), relação benefício-custo (RBC) e período de retorno de capital (PRC) foram utilizados para determinar a viabilidade econômica de cada um dos sistemas projetados. Os quatro indicadores foram determinados baseados nas entradas e saídas anuais de acordo com o descrito por Shang (1990), Jolly e Clonts (1993) e Engle (2010):

$$\sum_{t=1}^n (FCL / (1 + TIR)^t) - FCL_0 = 0 \quad (5)$$

$$VPL = (\sum_{t=1}^n FCL / (1 + i)^t) - FCL_0 \quad (6)$$

$$RBC = (\sum_{t=1}^n FCL_t / (1 + i)^t) / FCL_0 \quad (7)$$

$$\sum_{t=0}^n FCL^{TMA\ real} = 0 \quad (8)$$

FCL é o fluxo de caixa livre; t é o ano; n é o número de anos de operação (0, 1, 2, 3, ..., n); i é a taxa de desconto; TMA real é a taxa mínima de atratividade real. Tanto a TMA real quanto a taxa de desconto foram fixadas em 7,1% ao ano. Este valor foi obtido a partir das seguintes equações:

$$TMA\ real = [(1 + taxa\ nominal) / (1 + taxa\ de\ inflação)] - 1 \quad (9)$$

$$Taxa\ nominal = Taxa\ Selic + Prêmio\ pago\ pelo\ risco \quad (10)$$

Para as quais foram consideradas como taxa de inflação, a inflação meta do ano de 2021 de 3,75% obtida no Boletim Focus, a taxa básica de juros (Taxa Selic = 2,75% ao ano), e o prêmio pago pelo risco do investimento que foi baseado na média dos investimentos de Letra de Crédito Agrícola (LCA) Prefixado do mesmo ano (8,32%) como base de prêmio a ser alcançado se o valor de investimento da atividade aquícola fosse investido neste título.

3. Resultados

O investimento inicial desembolsado para cobrir os custos de construções e compra de equipamentos fundamentais para o início da produção de sistemas de monocultivo de *Astyanax lacustris* foi de ~R\$ 515.600 em fazendas de 1 ha (Tabela A1) aumentando para ~R\$ 1.720.000 em fazendas com área de 5 ha (Tabela A2). A expansão da escala de produção de monocultivo representou uma redução de aproximadamente R\$ 171.500 de capital investido em cada hectare de área produtiva. A integração do cultivo de *Macrobrachium amazonicum* (LCa) e de *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* (LCaC) à produção de *A. lacustris*, apresentaram investimentos iguais em fazendas de mesmo porte. Realizar esta integração de cultivos demandou um aumento nos investimentos iniciais de ~R\$ 55.000 (Tabela A1) para fazendas de pequeno porte (1 ha) e de ~R\$ 274.000 para fazendas de médio porte (5 ha) (Tabela A2) em relação às fazendas de monocultivo. Este aumento foi decorrente da instalação e compra de equipamentos da área de berçário de camarão.

A avaliação detalhada dos itens que compõem estes investimentos nos permite observar que o elemento de maior custo para todos os sistemas e escalas de produção foi o investimento realizado nas instalações para a produção de juvenis de lambari (Figura 1). Este item contribuiu com mais do que 20% em todos sistemas com área de 1 ha (Figura 1 A e C), e mais do que 30% em todos os sistemas com área de 5 ha (Figura 1 B e D). Nos sistemas integrados, as instalações necessárias para a realização do berçário de *M. amazonicum* representou 9% dos investimentos em fazendas de 1 ha e de 13% em fazendas de 5 ha (Figura 1 C e D). Em todos os sistemas de produção estudados os custos com o projeto de instalação (8%), instalação elétrica (7-10%) e o sistema de abastecimento (6-7%) foram itens representativos (Figura 1). Para as fazendas de menor porte o segundo item de maior custo foi a construção da residência, apresentando contribuição de 15% em sistemas integrados e de 16% em monocultivo (Figura 1 A e C). Nesta escala de produção, a aquisição do veículo foi outro custo bem expressivo, apresentando participação de 9% em sistemas integrados e de 10% em monocultivo. A compra de aeradores, a compra e o plantio do gramado e a construção de viveiros foram mais representativas para sistemas com área produtiva de 5ha (Figura 1 B e D). A construção do galpão e

dos monges, e os demais custos considerados representam pequena participação na composição dos investimentos, variando entre 1 e 4% em cada uma das fazendas estudadas (Figura 1).

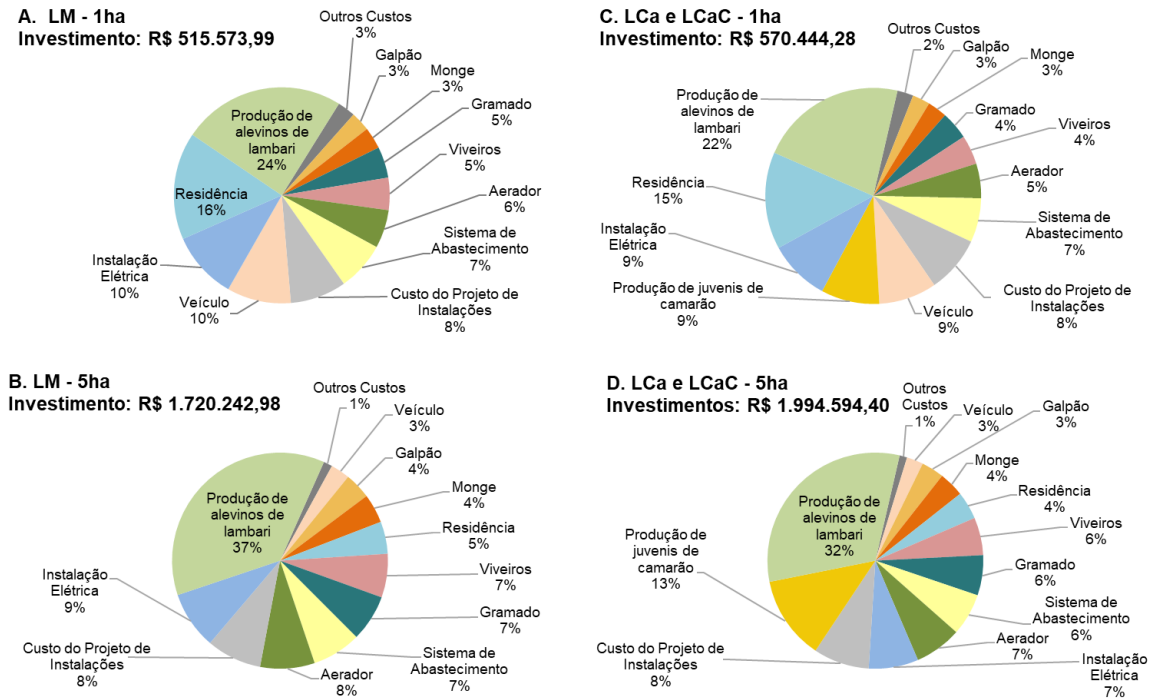


Figura 1. Participação dos itens no investimento inicial para o monocultivo de *Astyanax lacustris* em pequeno (A) e médio (B) porte, e em cultivo integrado com *Macrobrachium amazonicum* (LCa) e cultivo integrado com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* (LCaC) em propriedades de pequeno (C) e médio (D) porte. O tópico “Outros Custos” engloba para ambos os tamanhos estudados os seguintes itens: aparador de grama, balança digital, balde plástico, bandeja plástica, caixa d’água polietileno, carrinho de mão, cilindro de gás oxigênio, condutivímetro, enxada, forcado, oxímetro, pá, peagômetro, puçá, rede de arrasto, régua, extensão elétrica, e compra e instalação de postes de iluminação.

O custo total da produção anual praticamente dobrou com a integração com o *M. amazonicum* e do *P. lineatus* em ambas as escalas de produção estudadas. Este custo variou de aproximadamente R\$ 331.000 no monocultivo a ~R\$ 620.000 em cultivo LCaC, em fazendas de 1 ha (Tabela B1), e variou de ~R\$ 1.178.000 em monocultivo a ~R\$ 2.440.000 no sistema de produção integrado LCaC, em fazendas com área de 5 ha (Tabela B2). O menor custo variável foi de R\$ 186.208 no monocultivo de 1 ha e o maior foi de R\$ 2.114.352 no sistema LCaC de 5 ha (Apêndice B). O custo fixo não apresentou grande aumento quando realizada a integração com o *M. amazonicum* e com o *M. amazonicum* e do *P. lineatus* em ambas as escalas de produção (Apêndice B).

O capital necessário para cobrir todos os gastos operacionais anuais diferiram entre cada sistema e tamanho de fazenda estudada. Nas fazendas de pequeno porte os custos operacionais foram de ~R\$ 260.000 com a prática de monocultivo, de ~R\$ 395.000 com a utilização do sistema integrado LCa e de ~R\$ 536.000 com o sistema integrado LCaC (Tabela B1). Em fazendas de médio porte estes custos aumentaram para ~R\$ 1.030.000 com a produção em monocultivo, ~R\$ 1.835.000 com a integração com uma espécie (LCa) e ~R\$ 2.239.000 com a integração com duas espécies (LCaC), o que representou uma diminuição dos custos por hectare de produção (Tabela B2). Entre os itens computados para compor estes custos operacionais, aqueles que apresentaram percentuais expressivos em todos os sistemas e escalas de produção estudados foram: os impostos, a compra de ração, custos com a produção de alevinos de lambari (Figura 2).

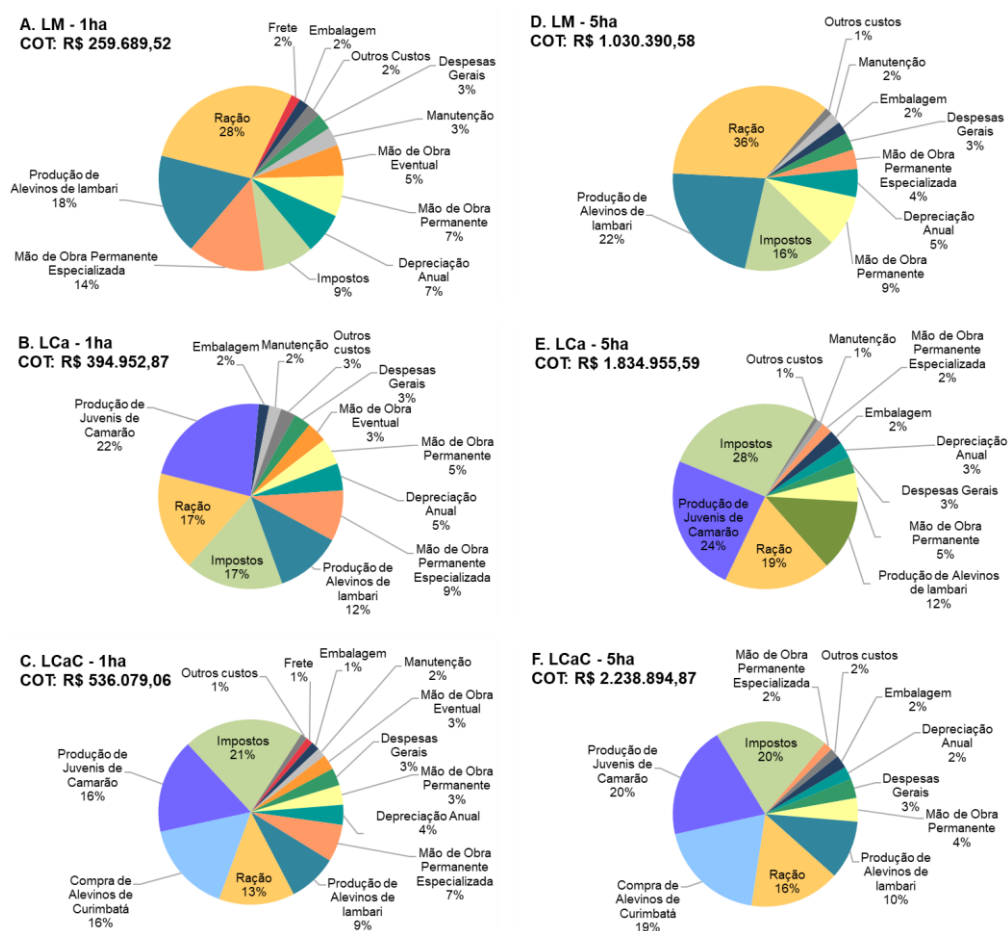


Figura 2. Custos Operacionais Totais (COT) ao ano e percentual de contribuição de cada item dos custos variáveis e fixos necessários para tamanho de fazenda e sistemas estudados. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado de *A. lacustris* com *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado de *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

A ração foi o principal custo operacional do sistema de monocultivo de pequeno e médio porte, representando um percentual de contribuição de 28% e 36%, respectivamente (Figura 2 A e D). A realização do cultivo integrado LCa e LCaC em fazendas de ambas as escalas de produção, revelou que itens como os custos com impostos, produção de juvenis de camarões e compra de alevinos de curimba para cultivos LCaC, tiveram porcentagem de contribuição igual ou maior do que os custos com aquisição de ração (Figura 2 B, C, E e F).

Os custos com a produção de alevinos de lambari foram mais significativos nas fazendas de maior área, diminuindo a porcentagem de contribuição à medida que realizasse cultivos integrados, alcançando 22% em monocultivo, 13% em LCa e 10% em LCaC (Figura 2). A mão de obra especializada, utilizada em todos os sistemas produtivos testados, foi um custo mais relevante em áreas de pequeno porte, representando cerca de 14% em LM, 9% em LCa e 7% em LCaC (Figura 2 A, B e C). Nas fazendas de médio porte este item apresentou pouca relevância na composição dos custos operacionais (Figura 2 D, E e F). A mão de obra permanente, também utilizada em todos os sistemas, representou maior relevância em monocultivo de ambas as escalas de produção do que nos cultivos integrados (Figura 2). A mão de obra eventual, utilizada apenas em propriedades de pequeno porte, representaram menos do que 5% de todos os custos operacionais (Figura 2 A, B e C). Os custos com despesas gerais, manutenção, frete e embalagem foram pouco representativos na composição dos custos operacionais (Figura 2).

O monocultivo realizado em fazendas com 1 ha de área produtiva gerou uma receita líquida de ~R\$ 55.000, aumentando para ~R\$ 318.00 ao realizar a integração com *M. amazonicum*, e para ~R\$ 520.000 ao integrar o cultivo com *M. amazonicum* e *P. lineatus* (Tabela 3). O lucro de fazendas de monocultivo nesta mesma escala de produção foi negativo, e a produtividade anual obtida foi inferior ao ponto de equilíbrio, indicando que a receita obtida não paga os custos totais da produção. Optar por um cultivo integrado possibilita obter lucros superiores a R\$ 200.000 e produção anual maior de 1.700.000 unidades produzidas (Tabela 2).

Tabela 3. Análise de custo-retorno e indicadores de viabilidade econômica de cada sistema estudado em fazendas de pequeno porte (1 ha). LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado de *A. lacustris* com *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado de *A. lacustris* com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*. TIR = Taxa Interna de Retorno; VPL = Valor Presente Líquido; RBC = Relação Benefício-Custo; PRC = Período de Recuperação de Capital; uni = unidade.

Item*		Sistema de Produção		
		LM	LCa	LCaC
Receita Bruta	R\$	314.920	712.436	1.056.298
Receita Líquida	R\$	55.231	317.483	520.219
Lucro	R\$	-16.413	238.919	436.676
Produção Anual	uni	899.772	1.703.999	2.225.528
Ponto de Equilíbrio	uni	1.014.572	649.623	561.081
Custo Total Médio	R\$/uni	0,37	0,28	0,28
TIR	%	6	26	36
VPL	R\$	-108.568	2.308.992	4.179.660
RBC	R\$	1,30	5,77	9,32
PRC	anos	14	4	3

* Os itens apresentados foram calculados considerando a produção anual de cada sistema de produção.

A receita líquida gerada ao ano foi superior R\$ 500.000 para todos os sistemas com o aumento da escala de produção para 5 ha, alcançando até R\$ 3.033.849 no cultivo integrado com as três espécies (Tabela 4). O lucro, para todos os sistemas conduzidos em 5 ha, foi positivo, pouco mais do que R\$ 390.000 em cultivo LM e alcançando ~R\$ 2.800.000 em cultivo LCaC. A produção anual foi maior que 4 milhões de unidades em todos os sistemas com área de 5 ha, valor superior ao ponto de equilíbrio obtido (Tabela 4). O custo total médio diminuiu conforme foi realizado o aumento da escala de produção em todos os sistemas estudados, passando de R\$ 0,37; R\$ 0,28; R\$ 0,28 nos cultivos LM; LCa e LCaC - 1 ha para R\$ 0,26; R\$ 0,24 e R\$ 0,22 nos cultivos LM; LCa e LCaC - 5 ha, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 4. Análise de custo-retorno e indicadores de viabilidade econômica de cada sistema estudado em fazendas de médio porte (5 ha). LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado de *A. lacustris* com *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado de *A. lacustris* com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*. TIR = Taxa Interna de Retorno; VPL = Valor Presente Líquido; RBC = Relação Benefício-Custo; PRC = Período de Recuperação de Capital; uni = unidade.

Item*		Sistema de Produção		
		LM	LCa	LCaC
Receita Bruta	R\$	1.570.543	3.552.999	5.272.743
Receita Líquida	R\$	540.152	1.718.043	3.033.849
Lucro	R\$	392.930	1.531.842	2.833.397
Produção Anual	uni	4.487.265	8.498.036	11.105.042
Ponto de Equilíbrio	uni	1.994.532	1.487.375	1.142.694
Custo Total Médio	R\$/uni	0,26	0,24	0,22
TIR	%	16	34	51
VPL	R\$	2.910.689	13.488.990	26.245.500
RBC	R\$	3,32	8,75	15,37
PRC	anos	6	3	2

* Os itens apresentados foram calculados considerando a produção anual de cada sistema de produção.

O sistema de monocultivo com 1 ha de área produtiva apresentou valor da taxa interna de retorno (TIR) menor que a taxa mínima de atratividade considerada neste estudo (TMA = 7,1% ao ano) e valor presente líquido (VPL) negativo, o que nos permite inferir que este sistema foi inviável, apresentando 14 anos para retorno do capital investido (PRC) (Tabela 3). No entanto, a análise do fluxo de caixa líquido evidencia que esse sistema (LM-1 ha) apresenta certa liquidez a partir do ano 02, até que no ano 10 o fluxo de caixa se torna novamente negativo devido a necessidade de reinvestimentos, recuperando a liquidez a partir do ano seguinte (Figura 3 A). Aumentar a escala de produção de monocultivo de *A. lacustris* promove viabilidade e liquidez do sistema LM, reduzindo o PRC para 6 anos. A TIR desse sistema (LM – 5 ha) passa a ser maior que a TMA e o VPL se torna positivo. Somado a isso, a liquidez do cultivo LM – 5 ha é evidenciada pelo fluxo de caixa que se mantém positivo a partir do ano dois de atividade até o final do período de exploração considerado neste estudo, mesmo no ano referente aos necessários reinvestimentos (ano 10). Para todos os sistemas estudados a relação benefício-custo é positiva, sendo de apenas R\$ 1,30 para cada real investido na estratégia de monocultivo em fazendas de 1 ha (Tabela 3),

aumentando para R\$ 15,37 para fazendas cultivo integrado com duas espécies (LCaC) de 5 ha de área de produção (Tabela 4).

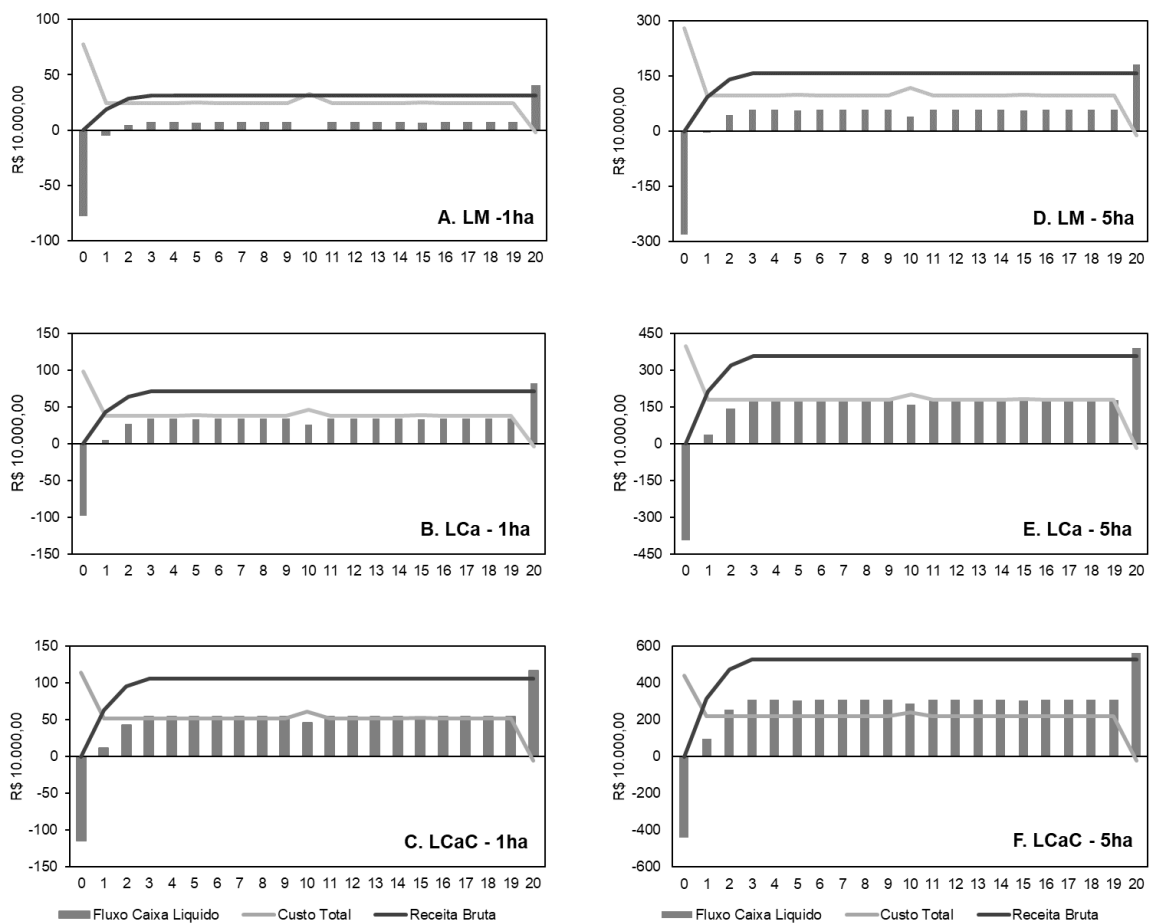


Figura 3. Análise do fluxo de caixa pelo horizonte de 20 anos de fazendas com 1 ha e sistemas de produção (A) LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; (B) LCa = cultivo integrado de *A. lacustris* com *Macrobrachium amazonicum*; (C) LCaC = cultivo integrado de *A. lacustris* com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*; e de fazendas com 5 ha e sistemas de produção (D) LM; (E) LCa; (F) LCaC.

A integração de sistemas de cultivo de *A. lacustris* apenas com *M. amazonicum* ou com *M. amazonicum* e *P. lineatus*, possibilitou que a liquidez fosse obtida a partir do primeiro ano de atividade, independentemente da escala de produção realizada (Figura 3 B, C, E e F). Além disso, a taxa interna de retorno obtida, para cada um destes tratamentos, foi maior de que 20%, indicando viabilidade (Tabela 3 e 4). Esta viabilidade foi reforçada pelo VPL que variou de ~R\$ 2.300.000 para sistema de produção LCa em escala de 1ha (Tabela 3) a R\$ 26.245.000 para o sistema LCaC em escala de 5ha (Tabela 4). Estes sistemas proporcionaram a recuperação do capital investido com maior velocidade do que em monocultivos, sendo no máximo 4 anos se realizado o sistema LCa em 1 ha e no mínimo 2 anos se realizado o sistema LCaC em 5 ha de produção.

4. Discussão

A produção em monocultivo de *Astyanax lacustris* se mostrou inviável em fazendas hipotéticas com 1 ha de área produtiva estabelecidas no interior do estado de São Paulo, apresentando alto período para a recuperação do capital investido. Tanto em monocultivo, quanto em cultivo integrado com *Macrobrachium amazonicum* e com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* a sobrevivência (~50%) e a produtividade (~2,0 t. ha⁻¹) de *A. lacustris* foi baixa conforme descrito por Marques et al. (2021). Em sistema de recirculação de água, o estabelecimento de área de produção para o cultivo intensivo da espécie de lambari *Deuterodon iguape* apresentou viabilidade e baixo período de retorno de capital investido, considerando o mesmo mercado de iscas vivas para comercialização, e elevadas porcentagens de sobrevivência (80-90%) (Henriques et al., 2019). O monocultivo de *A. altiparanae* em fazendas de 1,2 ha de área de produção mesmo com nenhum controle de densidade e monitoramento do desempenho produtivo apresentou viabilidade econômica (Sabbag et al., 2011). Diferentes resultados de viabilidade econômica de lambari podem ser encontrados devido as diferentes práticas de produção utilizadas nessa atividade. O cultivo para esse grupo de peixe não apresenta padronização, e é realizada a partir de estratégias próprias de cada produtor sem embasamento científico (Fonseca et al., 2017). Além disso, essas divergências de cultivo podem conduzir a diferentes resultados de produtividade e sobrevivência podendo conduzir, ou não, e empreendimento à viabilidade econômica.

Para um empreendimento aquícola ser economicamente viável, competitivo e sustentável é necessário manejar eficientemente custos e produtividade (Engle et al., 2020). Aumentar a escala de produção para 5 ha trouxe viabilidade para o monocultivo de *A. lacustris*, reduziu o período de recuperação de capital e o custo médio obtido por unidade de indivíduos produzidos, indicando economia de escala para essa dimensão de produção. A economia de escala representa uma diminuição nos custos por unidade de produção conforme há um aumento na produção (Engle, 2010). Assim como obtido no presente estudo, o aumento da escala produtiva também foi descrito como eficiente para melhorar os indicadores de viabilidade econômica e diminuir o período de retorno de capital em monocultivo do peixe pelágico *Colossoma macropomum* (Dantas et al., 2022). A

integração com espécies bentônicas trouxe viabilidade e redução do período de recuperação do capital investido em ambas as escalas de produção, apesar do aumento dos investimentos e custos operacionais totais. Esses resultados corroboram com o entendimento de que os cultivos integrados multitróficos aumentam a estabilidade econômica do empreendimento, por meio do aumento dos *outputs* produzidos em uma mesma área de produção sem que haja aumento de insumos (Chopin, 2013). O aumento da produção foi possível porque o desenvolvimento e crescimento de espécies bentônicas, como o *M. amazonicum* e o *P. lineatus*, em cultivo integrado com *A. lacustris* foi positivo e sem prejuízos, apresentando bom rendimento final e o aumento da biomassa de alto valor comercial, indicando que a densidade utilizada foi adequada o que evitou impactos negativos na produção (Marques et al., 2021). O uso de camarões de água doce, mesmo em baixas densidades, permite que altos rendimentos sejam alcançados devido ao elevado preço de mercado (Marques et al., 2016). Assim, com a integração de espécies de alto valor econômico é possível diversificar os produtos e os mercados consumidores e consequentemente aumentar a resiliência da atividade (Boyd et al., 2020; Valenti et al., 2018). Essa estratégia tem se mostrado adequada a pequenos produtores (Fonseca et al., 2017) e foi corroborada pelos resultados do presente estudo.

O investimento inicial foi similar entre os cultivos integrados LCa e LCaC com mesma escala produtiva. Esses sistemas necessitaram de investimentos maiores que os monocultivos porque ambos precisam instalar o sistema de berçários dos camarões. Na simulação apresentada, estamos assumindo que os curimbatás seriam adquiridos de larviculturas comerciais e, portanto, não há nenhum investimento para sua inclusão. Todos os cultivos realizados em 5 ha necessitaram de investimentos maiores que os cultivos com apenas 1 ha de área produtiva devido ao aumento no tamanho das instalações de produção. Itens como construção da residência e aquisição de um veículo tiveram custos similares para fazendas de pequeno e médio porte, sendo portanto otimizados quando a escala de produção aumenta. Por isso, a proporção de cada um na composição dos custos foi bem maior para as fazendas de pequeno porte, mas teve pouca relevância na composição dos investimentos de fazendas de médio porte. A aquisição de aeradores (7-8%), construção de viveiros (6-7%) e plantio do gramado (6-7%) foram os investimentos mais significativos nas fazendas de 5

ha devido à grande quantidade necessária para atender sua área de produção cinco vezes maior, mesmo considerando uma redução de 10% para os preços dos aeradores e viveiros devido ao efeito da escala. A necessidade de recursos financeiros está relacionada com o tamanho do empreendimento e precisam ser cuidadosamente manejados (Engle, 2010). Os produtores de fazendas de média escala adquirem grandes quantidades de alguns produtos e serviços de elevado valor, tais como as obras cíveis. Portanto, podem otimizar os custos por intermédio de negociações (Dantas et al., 2022). O valor de desconto atribuído nesse estudo foi subestimado. Podemos supor que melhores preços podem ser obtidos no processo de negociação, contribuindo para a melhoria da economia de escala.

Todos os valores dos itens que compõem tanto os investimentos iniciais como os custos variáveis foram levantados durante o período da pandemia da Covid-19. O Brasil começava a apresentar uma desaceleração econômica e aumento dos preços de vários produtos e serviços. Nesse sentido, esses valores orçados podem ter sido superestimados em relação à um período sem a interferência de uma pandemia, quando poderiam ser valores menores. O aumento do preço de insumos tem sido observado na América Latina em todo o setor agroindustrial (Salazar et al., 2020) e no setor aquícola até mesmo na Ásia (Islam et al., 2021). Além disso, uma pandemia como a que vivenciamos nestes últimos anos, pode submeter cada um dos elos da cadeia de suprimentos da atividade aquícola à quebra ou encerramento de atividades podendo afetar a economia do setor (FAO, 2020). Os custos operacionais relacionados à compra de ração foram expressivos, este foi o item de maior contribuição para os custos operacionais apenas no monocultivo (28-36%). Mas, os valores foram bem inferiores a 50-80% que normalmente é obtido nos monocultivos intensivamente arraçoados (Boyd et al, 2020; Valenti et al., 2021). No presente estudo, foi utilizada a mesma ração durante todo o ciclo de produção, com arraçoamento duas vezes ao dia. Esta estratégia é similar à utilizada por Sabbag et al. (2011), que afirmam que a padronização de uma única ração e frequência alimentar pré-determinada atenua custos com este insumo de produção. Além disso, os custos com alimento nestes sistemas integrados são amortizados com a receita obtida pela venda das espécies que não foram alimentadas (Boyd et al., 2020), e cuja biomassa não foi considerada para cálculo da ração. O uso de camarões de água

doce em sistemas integrados requer que alterações na estrutura de produção e manejo sejam feitas (Marques et al., 2016). Os custos adicionais, computados nesse estudo para os sistemas integrados LCa e LCaC, englobam todos os gastos com a construção de instalações e manejo desta fase de criação do *M. amazonicum*, que são necessários para efetivar a integração com o cultivo de *A. lacustris*. Assim, a realização do berçário para a produção de juvenis de *M. amazonicum* foi um custo operacional de grande contribuição nos sistemas integrados, aumentando os investimentos e os custos operacionais.

Os impostos também apareceram como item de contribuição expressiva para os custos variáveis nas fazendas de cultivo integrado com 1 e 5 ha de área de viveiros. As taxas cobradas no Brasil sobre qualquer atividade são elevadas e caracterizam-se como severa limitação para as cadeias produtivas acarretando em efeitos negativos sobre a lucratividade (Valenti et al., 2021). O mercado recreativo tem sido descrito como ótima alternativa para escoar a produção de *A. lacustris* (Fonseca et al., 2017) e *M. amazonicum* (Rodrigues et al., 2019), devido aos preços mais elevados que podem compensar os impostos pagos. Além disso, essa diversificação de mercados aumenta a resiliência aos sistemas de produção aquícola que usam protocolos de cultivo de sistema de IMTA (Sara et al., 2022).

5. Conclusão

Aumentar a escala de produção é uma opção estratégica para viabilizar o monocultivo de *Astyanax lacustris* realizado em região subtropical do Brasil, por trazer economia de escala. No entanto, fazer uso de outras estratégias que associem princípios da economia circular e da sustentabilidade, como a integração multitrófica de *A. lacustris* com espécies como o *Macrobrachium amazonicum* e o *Prochilodus lineatus* aumentam as vantagens econômicas do sistema. Os cultivos integrados aumentam a lucratividade em relação ao monocultivo, independente da escala produtiva realizada, diminuem o tempo de recuperação de todo o capital investido e tornam os indicadores de viabilidade econômica mais atrativos. Além disso, esses cultivos integrados aumentam a diversidade de mercado, trazendo resiliência à atividade.

Referências

- Belmudes, D., David, F. S., Gonçalves, F. H., Valenti, W. C. Sustainability analysis of the production of early stages of the atlantic forest lambari (*Deuterodon iguape*) in a public hatchery at a rainforest conservation area. **Sustainability**, v. 13, n. 11. <https://doi.org/10.3390/su13115934>, 2021.
- Boyd, C. E.; D'abramo, L. R.; Glencross, B. D.; Huyben, D. C.; Juarez, L. M.; Lockwood, G. S.; Mcnevin, A. A.; Tacon, A. G.J.; Teletchea, F.; Tomasso, J. R.; Tucker, C. S.; Valenti, W. C. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 51, n. 3, p. 578–633, 2020.
- Castagnolli, N. Piscicultura de água doce. Jaboticabal: **Funep**, 1992.
- Chopin, T. Integrated Multi-Trophic Aquaculture. Ancient, Adaptable Concept Focuses On Ecological Integration. **Global Aquaculture Advocate**, v. 16, p. 16–19, 2013.
- Dantas, D. P., Flickinger, D. L., Costa, G. A., Moraes-Valenti, P., Valenti, W. C. Economic effects of production scale, use of agricultural greenhouses, and integration of tropical aquaculture species when farming in a subtropical climate. **Aquaculture International**. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00822-2>, 2022.
- de Resende, E. K., Catella, A. C., Nascimento, F. L., Palmeira, S. da S., Pereira, R. A. C., Lima, M. de S., Almeida, V. L. L. Biologia do curimatá (*Prochilodus lineatus*), pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) e cachara (*Pseudoplatystoma fasciatum*) na bacia hidrográfica do rio Miranda, Pantanal do Mato Grosso do Sul, Brasil. EMBRAPA-CPAP. Boletim de Pesquisa, 1996.
- Engle, C. Aquaculture economics and financing: Management and analysis. Ames IA: Blackwell Scientific, 1ª ed., 2010.
- Engle, C. R., Kumar, G., van Senten, J. Cost drivers and profitability of U.S. pond, raceway, and RAS aquaculture. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 51, n. 4, pp. 847–873. <https://doi.org/10.1111/jwas.12706>, 2020.
- FAO. How is COVID-19 affecting the fisheries and aquaculture food systems, pp. 7–11. <https://doi.org/10.4060/ca8637en>, 2020.
- Ferreira, P. de M. F.; Nascimento, L. da S.; Dias, D. C.; Moreira, D. M. da V.; Salaro, A. L.; de Freitas, M. B. D.; Carneiro, A. P. S.; Zuanon, J. A. S. Essential oregano oil as a growth promoter for the yellowtail tetra, *Astyanax altiparanae*. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 45, n. 1, p. 28–34, 2014.
- Fonseca, T.; Costa-Pierce, B. A.; Valenti, W. C. Lambari Aquaculture as a Means for the Sustainable Development of Rural Communities in Brazil. **Reviews in Fisheries Science and Aquaculture**, v. 25, n. 4, p. 316–330, 2017.
- Fugi, R., Hahn, N. S., Agostinho, A. A. Feeding styles of five species of bottom-feeding fishes of the high Paraná River. **Environmental Biology of Fishes**, v. 46, n. 3, 297–307. <https://doi.org/10.1007/BF00005006>, 1996.

- Henares, M. N. P.; Medeiros, M. V.; Camargo, A. F. M. Overview of strategies that contribute to the environmental sustainability of pond aquaculture: rearing systems, residue treatment, and environmental assessment tools. **Reviews in Aquaculture**, v. 12, n. 1, p. 453–470, 2020.
- Henriques, M. B.; Carneiro, J. S.; Fagundes, L.; Castilho-Barros, L.; Barbieri, E. Economic feasibility for the production of live baits of lambari (*Deuterodon iguape*) in recirculation system. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 45, n. 4, 2019.
- Islam, M. M.; Khan, M. I.; Barman, A. Impact of novel coronavirus pandemic on aquaculture and fisheries in developing countries and sustainable recovery plans: Case of Bangladesh. **Marine Policy**, v. 131, p. 104611, 2021.
- Jolly, C. M.; Clonts, H. A. Economics of aquaculture. Food Products Press, 319 p., 1993.
- Knowler, D., Chopin, T., Martínez-Espíñeira, R., Neori, A., Nobre, A., Noce, A., Reid, G. 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, 1579–1594. <https://doi.org/10.1111/raq.12399>, 2020.
- Lucena, C. A.; Soares, H. G. Review of species of the *Astyanax bimaculatus* “caudal peduncle spot” subgroup sensu Garutti & Langeani (Characiformes, Characidae) from the rio La plata and rio São Francisco drainages and coastal system of southern Brazil and Uruguay. **Zootaxa**. Auckland, New Zealand, v.4072, n. 1, p. 101-125, 2016.
- Marques, H. L. D. A.; Moraes-Valenti, P. M. C. Current status and prospects of farming the giant river prawn (*Macrobrachium rosenbergii* (De Man 1879) and the Amazon river prawn *Macrobrachium amazonicum* (Heller 1862)) in Brazil. **Aquaculture Research**, v. 43, n. 7, p. 984–992, 2012.
- Marques, H. L. A.; New, M. B.; Boock, M. V.; Barros, H. P.; Mallasen, M.; Valenti, W. C. Valenti Integrated freshwater prawn farming: State-of-the-art and future potential. **Reviews in Fisheries Science and Aquaculture**, v. 24, n. 3, p. 264–293, 2016.
- Marques, A. M.; Boaratti, A. Z.; Belmudes, D.; Ferreira, J. R. C.; Mantoan, P. V. L.; Moraes-Valenti, P.; Valenti, W. C. Improving the Efficiency of Lambari Production and Diet Assimilation Using Integrated Aquaculture with Benthic Species. **Sustainability**, v. 13, n.18, p.1-10, 2021.
- PENTEADO, J.M.A. Análise da produtividade e viabilidade econômica de quatro sistemas de berçários do camarão-da-amazônia, *Macrobrachium amazonicum*. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Aquicultura). Centro de Aquicultura da Unesp- CAUNESP. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2012.
- Rodrigues, C. G.; Engle, C.; Garcia Neto, B. F.; Amorim, R. V.; Valenti, W. C. The effect of choice of targeted market, production scale, and land tenure on the economics of integrated tilapia-prawn production. **Aquaculture Economics and Management**, v. 23, n. 2, p. 204–217, 2019.

- Sabbag, O.J.; Takahashi, L.S.; Silveira, A.N.; Aranha, A.S. Costs and economic viability of production of the lambari tetra in Monte Castelo, São Paulo State: A case study | Custos e viabilidade econômica da produção de lambari-do-rabo-amarelo em Monte Castelo/SP: Um estudo de caso. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 37, n. 3, p. 307–315, 2011.
- Salazar, L.; Schling, M.; Palacios, A. C.; Pazos, N. Challenges for Family Farming in The Context of COVID-19: Evidence from Farmers in Latin America and the Caribbean (LAC). Inter-American Development Bank, p. 1-16, 2020.
- Sarà, G., Mangano, M. C., Berlino, M., Corbari, L., Lucchese, M., Milisenda, G., Terzo, S., Azaza, M. S., Babarro, J. M. F., Bakiu, R., Broitman, B. R., Buschmann, A. H., Christofolletti, R., Deidun, A., Dong, Y., Galdies, J., Glamuzina, B., Luthman, O., Makridis, P., ... Helmuth, B. The Synergistic Impacts of Anthropogenic Stressors and COVID-19 on Aquaculture: A Current Global Perspective. **Reviews in Fisheries Science and Aquaculture**, v. 30, n. 1, pp. 123–135. <https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1876633>, 2022.
- Shang, Y. C. Aquaculture Economic Analysis: An Introduction. Baton Rouge, The World Aquaculture Society, 211 p., 1990.
- Thomas, M.; Pasquet, A.; Aubin, J.; Nahon, S.; Lecocq, T. When more is more: taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. **Biological Reviews**, v. 96, n. 2, p. 767–784, 2021.
- Valenti, W. C.; Kimpura, J. M.; Preto, B. de L.; Moraes-Valenti, P. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. **Ecological Indicators**, v. 88, p. 402–413, 2018.
- Valenti, W. C.; Barros, H. P.; Moraes-Valenti, P.; Bueno, G. W.; Cavalli, R. O. Aquaculture in Brazil: past, present and future. **Aquaculture Reports**, v. 19, p. 100611, 2021.
- Valladão, G. M. R.; Gallani, S. U.; Pilarski, F. South American fish for continental aquaculture. **Reviews in Aquaculture**, v. 10, n. 2, p. 351–369, 2018.

APÊNDICE A

Tabela A1. Valor unitário e custo total dos investimentos necessários para os sistemas de produção de *Astyanax lacustris*: LM = monocultivo de *A. lacustris*; LCa = cultivo integrado de *A. lacustris* com *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado de *A. lacustris* com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* em fazendas de pequeno porte (1 ha). Quant.= quantidade estimada para uso em cada projeto.

Investimentos	Valor (R\$)**	LM		LCa		LCaC	
		Quant.	Custo (R\$)	Quant.	Custo (R\$)	Quant.	Custo (R\$)
1- Equipamentos							
Aerador monofásico	2.957,00	10	29.570,00	10	29.570,00	10	29.570,00
Aparador de grama Elétrico	189,91	1	189,91	1	189,91	1	189,91
Balança Digital 1-10kg	36,13	2	72,26	2	72,26	2	72,26
Balde com tampa-20L	34,50	5	172,50	5	172,50	5	172,50
Bandeja plástica 5,5L	10,90	2	21,80	2	21,80	2	21,80
Caixa de Polietileno 500L	224,90	2	449,80	2	449,80	2	449,80
Carrinho de Mão 50L	158,00	1	158,00	1	158,00	1	158,00
Cilindro de gás oxigênio 40L	1.750,00	1	1.750,00	1	1.750,00	1	1.750,00
Conduvímetro	352,33	1	352,33	1	352,33	1	352,33
Enxada larga com cabo	60,90	1	60,90	1	60,90	1	60,90
Forcado reto	63,90	1	63,90	1	63,90	1	63,90
Oxímetro	1.256,94	1	1.256,94	1	1.256,94	1	1.256,94
Pá de bico	47,41	1	47,41	1	47,41	1	47,41
Peagômetro	228,00	1	228,00	1	228,00	1	228,00
Puçá malha 15 mm	74,80	5	374,00	5	374,00	5	374,00
Rede de arrasto(40m; 12mm)	3.665,00	1	3.665,00	1	3.665,00	1	3.665,00
Régua 20cm	1,99	2	3,98	2	3,98	2	3,98
Extensão elétrica 30m	143,91	1	143,91	1	143,91	1	143,91
Total			38.580,64		38.580,635		38.580,64
2- Instalações e Veículo							
Galpão (m²)	1.000,00	15	15.000,00	15	15.000,00	15	15.000,00
Viveiros 0,1ha (50 x 20m)	2.500,00	10	25.000,00	10	25.000,00	10	25.000,00
Gramma (m²)	8,00	3.000	24.000,00	3.000	24.000,00	3.000	24.000,00
Monge	3.335,00	5	16.675,00	5	16.675,00	5	16.675,00
Sistema de abastecimento	37.647,50	1	37.647,50	1	37.647,50	1	37.647,50
Instalação elétrica	52.238,04	1	52.238,04	1	52.238,04	1	52.238,04
Posteamento (5 unidades)	4.779,80	1	4.779,80	1	4.779,80	1	4.779,80
Residência (m²) *	1.382,51	60	82.950,60	60	82.950,60	60	82.950,60
Veículo (Caminhonete)	49.500,00	1	49.500,00	1	49.500,00	1	49.500,00
Produção de juvenis de camarão ¹					49.882,08		49.882,08
Produção de alevinos de lambari ²			125.839,38		125.839,38		125.839,38
Total			433.630,32		483.512,402		483.512,40
3. Custo do Projeto			43.363,03		48.351,24		48.351,24
4. Total de Investimentos			515.573,99		570.444,28		570.444,27
5. Total de Investimentos por hectare³			515.573,99		570.444,28		570.444,27

¹ Custos totais necessários para a instalação de berçário e compra de equipamentos para a produção de juvenis do camarão *M. amazonicum*.

² Custos totais necessários para a instalação de viveiro de manutenção de matrizes, laboratório e viveiro de berçários, e de compra de equipamentos para a produção de alevinos do *A. lacustris*.

³ Valor obtido por hectare de área de produção.

* Residência de apoio aos trabalhadores da fazenda que dispõe de uma cozinha, banheiros, e área de descanso.

** Valor unitário

Tabela A2. Valor unitário e custo total dos investimentos necessários para os sistemas de produção de *Astyanax lacustris*: LM = monocultivo de *A. lacustris*; LCa = cultivo integrado de *A. lacustris* com *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado de *A. lacustris* com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* em fazendas de médio porte (5 ha). Quant.= quantidade estimada para uso em cada projeto.

Porte (3 ha): Quant.= quantidade estimada para uso em cada projeto.							
Investimentos	Valor (R\$)**	LM		LCa		LCaC	
		Quant.	Custo (R\$)	Quant.	Custo (R\$)	Quant.	Custo (R\$)
1- Equipamentos							
Aerador monofásico	2.957,00	50	140.457,50	50	140.457,50	50	140.457,50
Aparador de grama Elétrico	189,91	2	379,82	2	379,82	2	379,82
Balança Digital 1-10kg	36,13	2	72,26	2	72,26	2	72,26
Balde com tampa-20L	34,50	10	345,00	10	345,00	10	345,00
Bandeja plastica 5,5L	10,90	5	54,50	5	54,50	5	54,50
Caixa de Polietileno 500L	224,90	10	2.249,00	10	2.249,00	10	2.249,00
Carrinho de Mão 50L	158,00	5	790,00	5	790,00	5	790,00
Cilindro de gás oxigênio 40L	1.750,00	2	3.500,00	2	3.500,00	2	3.500,00
Condutivímetro	352,33	1	352,33	1	352,33	1	352,33
Enxada larga com cabo	60,90	2	121,80	2	121,80	2	121,80
Forcado reto	63,90	2	127,80	2	127,80	2	127,80
Oxímetro	1.256,94	1	1.256,94	1	1.256,94	1	1.256,94
Pá de bico	47,41	2	94,82	2	94,82	2	94,82
Peagômetro	228,00	1	228,00	1	228,00	1	228,00
Puçá malha 15 mm	74,80	10	748,00	10	748,00	10	748,00
Rede de arrasto(40m; 12mm)	3.665,00	2	7.330,00	2	7.330,00	2	7.330,00
Régua 20cm	1,99	5	9,95	5	9,95	5	9,95
Extensão eletrica 30m	143,91	2	287,82	2	287,82	2	287,82
Total			158.405,54		158.405,54		158.405,54
2- Instalações e Veículo							
Galpão (m²)	1.000,00	75	67.500,00	75	67.500,00	75	67.500,00
Viveiros 0,1ha (50 x 20m)	2.500,00	50	112.500,00	50	112.500,00	50	112.500,00
Grama (m²)	8,00	15.000	120.000,00	15.000	120.000,00	15.000	120.000,00
Monge	3.335,00	25	75.037,50	25	75.037,50	25	75.037,50
Sistema de abastecimento	139.907,50	1	125.916,75	1	125.916,75	1	125.916,75
Instalação elétrica	164.911,85	1	148.420,67	1	148.420,67	1	148.420,67
Posteamento (5 unidades)	4.779,80	1	4.779,80	1	4.779,80	1	4.779,80
Residência (m²) *	1.382,51	60	82.950,60	60	82.950,60	60	82.950,60
Veículo (Caminhonete)	49.500,00	1	49.500,00	1	49.500,00	1	49.500,00
Produção de juvenis de camarão ¹					249.410,38		249.410,38
Produção de alevinos de lambari ²			633.246,91		633.246,91		633.246,91
Total			1.419.852,23		1.669.262,61		1.669.262,61
3. Custo do Projeto			141.985,22		166.926,26		166.926,26
4. Total de Investimentos			1.720.242,98		1.994.594,40		1.994.594,40
5. Total de Investimentos por hectare³			344.048,60		398.918,88		398.918,88

¹ Custos totais necessários para a instalação de berçário e compra de equipamentos para a produção de juvenis do camarão *M. amazonicum*.

² Custos totais necessários para a instalação de viveiro de manutenção de matrizes, laboratório e viveiro de berçários, e de compra de equipamentos para a produção de alevinos do *A. lacustris*.

³ Valor obtido por hectare de área de produção.

* Residência de apoio aos trabalhadores da fazenda que dispõe de uma cozinha, banheiros, e área de descanso.

** Valor unitário

APÊNDICE B

Tabela B1. Custos variáveis, custos fixos, e custo total da produção dos sistemas de cultivo de *Astyanax lacustris*: LM= monocultivo de *A. lacustris*; LCa= cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC= cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*, em fazendas de pequeno porte (1 ha). EPI = Equipamento de proteção individual; unid. = unidade de embalagem plástica e liga de borracha; kWh = Quilowatt-hora.

	Valor (R\$)	Valor Anual (R\$)		
		LM	LCa	LCaC
Custos Variáveis				
Combustível	3,73/ litro	779	779	779
Compra de Alevinos de curimbatá	170/ milheiro	0	0	85.748
Despesas Gerais	5%	7.430	11.743	16.304
Embalagem	0,51/ unid.	4.589	7.282	7.882
Energia Elétrica Aeradores	0,53/ kWh	127	14	80
Energia Elétrica Postes	0,53/ kWh	954	954	954
Energia Elétrica Residência	0,53/ kWh	1.183	1.183	1.183
EPI	-	1.774	1.774	1.774
Frete	-	4.212	4.212	6692,4
Impostos ³		22.989	67.681	113.024
Juros sobre o Capital Circulante	7,1% a.a. ⁴	7.262	12.034	17.012
Mão de Obra Eventual	80/ dia	14.176	14.176	14.176
Produção de Alevinos de lambari ¹	-	45.944	45.944	45.944
Produção de Juvenil de camarão ²	-	0	88.401	88.401
Ração	4,26/kg	73.422	68.698	71.027
Telefone	200/ mês	1.440	1.440	1.440
Total		186.280	326.315	472.419
Custos Fixos				
Depreciação Anual	-	18.755	18.755	18.755
Manutenção	-	8.404	8.404	8.404
Mão de Obra Permanente ⁶	1.386/ mês	18.430	18.430	18.430
Mão de Obra Permanente Especializada ⁶	2.638/ mês	35.083	35.083	35.083
Remuneração da terra	-	1.761	1.974	1.974
Remuneração do Empresário ⁶	3.341/ mês	44.433	44.433	44.433
Remuneração sobre o Capital Fixo	7,1% a.a. ⁴	18.188	20.124	20.124
Taxas ⁵	-	0	0	0
Total		145.054	147.203	147.203
Custo Operacional Efetivo (COE)		240.934	376.198	517.324
Custo Operacional Total (COT)		259.690	394.953	536.079
Custo Total de Produção (CTP)		331.333	473.517	619.622

¹ Todos os custos com a produção dos alevinos de lambari (*A. lacustris*) estão inclusos neste item, inclusive a compra de pós-larvas

² Todos os custos com produção dos juvenis de camarão (*M. amazonicum*), referente a fase de berçário, estão inclusos neste item.

³ Impostos pagos sobre o regime de tributação simplificado: Simples Nacional, com alíquota vigente em 2021: obtida de acordo com a faixa de receita bruta do empreendimento – LM: 7,3%; LCa: 9,5%; LCaC: 10,7% sobre a receita bruta anual.

- ⁴ a.a. = ao ano. A taxa de 7,1% a.a. incidente sobre o capital circulante e o capital fixo é a taxa mínima de atratividade obtida a partir a inflação meta para o ano de 2021, a taxa Selic do período e um prêmio/risco obtido a partir de investimentos em LCA (Letra de Crédito do Agronegócio).
- ⁵ Entre os itens que compõe o tópico *Taxas* estão a outorga e registro do aquicultor, licenciamento ambiental e imposto territorial rural (ITR).
- ⁶ O valor pago aos funcionários e o custo com a remuneração do empresário são valores acrescidos dos encargos trabalhistas, que abrangem: férias (salário + 1/3 desse salário), Fundo de Garantia do Tempo de Serviço – FGTS (8%), 13º salário, e previdência social por meio do pagamento do INSS -Instituto Nacional do Seguro Social, de acordo com alíquota vigente em 2021: 7,5% sobre a 1ª faixa salarial (até R\$ 1.100), e em seguida de 9% sobre o valor remanescente da subtração do salário com o valor máximo da 1ª faixa salarial (2ª faixa salarial: R\$ R\$ 1.100,01 até R\$ 2.203,48).

Tabela B2. Custos variáveis, custos fixos, e custo total da produção dos sistemas de cultivo de *Astyanax lacustris*: LM= monocultivo de *A. lacustris*; LCa= cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC= cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*, em fazendas de médio porte (5 ha). EPI = Equipamento de proteção individual; unid. = unidade de embalagem plástica e liga de borracha; kWh = Quilowatt-hora.

	Valor (R\$)	Valor Anual (R\$)		
		LM	LCa	LCaC
Custos Variáveis				
Combustível	3,73/ litro	1.366	1.366	1.366
Compra de Alevinos de curimbatá	170/ milheiro	0	0	427.635
Despesas Gerais	5%	31.516	53.637	75.900
Embalagem	0,51/ unid.	22.885	47.411,27	50.618
Energia Elétrica Aeradores	0,53/ kWh	634	71	400
Energia Elétrica Postes	0,53/ kWh	954	954	954
Energia Elétrica Residência	0,53/ kWh	1.183	1.183	1.183
EPI	-	1.774	1.774	1.774
Frete	-	4.212	4.212	6692,4
Impostos ³		168.048	508.079	444.492
Juros sobre o Capital Circulante	7,1% a.a. ⁴	33.322	61.704	75.954
Mão de Obra Eventual	80/ dia	0	0	0
Produção de Alevinos de lambari ¹	-	229.720	229.720	229.720
Produção de Juvenil de camarão ²	-	0	442.007	442.007
Ração	4,26/kg	366.162	342.605	354.217
Telefone	200/ mês	1.440	1.440	1.440
Total		863.215	1.696.163	2.114.352
Custos Fixos				
Depreciação Anual	-	50.743	50.743	50.743
Manutenção	-	20.342	20.342	20.342
Mão de Obra Permanente ⁶	1.386/ mês	92.148	92.148	92.148
Mão de Obra Permanente Especializada ⁶	2.638/ mês	35.083	35.083	35.083
Remuneração da terra	-	8.783	9.700	9.700
Remuneração do Empresário ⁶	3.341/ mês	44.433	44.433	44.433
Remuneração sobre o Capital Fixo	7,1% a.a. ⁴	60.685	70.364	70.364
Taxas ⁵	-	2.182	2.182	2.182
Total		314.398	324.994	324.994
Custo Operacional Efetivo (COE)		979.648	1.784.213	2.188.152
Custo Operacional Total (COT)		1.030.391	1.834.956	2.238.895
Custo Total de Produção (CTP)		1.177.613	2.021.157	2.439.346

¹ Todos os custos com a produção dos alevinos de lambari (*A. lacustris*) estão inclusos neste item, inclusive a compra de pós-larvas

² Todos os custos com produção dos juvenis de camarão (*M. amazonicum*), referente a fase de berçário, estão inclusos neste item.

³ Impostos pagos sobre o regime de tributação simplificado: Simples Nacional, com alíquota vigente em 2021: obtida de acordo com a faixa de receita bruta do empreendimento – LM: 10,7%; LCa: 14,3% sobre a receita bruta anual. O sistema LCaC aderiu ao regime tributário do Lucro Presumido com alíquotas vigentes para o mesmo ano: 2,5% - Funrural; 0,65% - PIS; 3% - COFINS; 12% sobre a receita bruta trimestral e depois 9% sobre este valor – CSLL; 8% sobre a receita bruta trimestral e depois 15% sobre este valor – IRPJ.

- ⁴ a.a. = ao ano. A taxa de 7,1% a.a. incidente sobre o capital circulante e o capital fixo é a taxa mínima de atratividade obtida a partir a inflação meta para o ano de 2021, a taxa Selic do período e um prêmio/risco obtido a partir de investimentos em LCA (Letra de Crédito do Agronegócio).
- ⁵ Entre os itens que compõe o tópico *Taxas* estão a outorga e registro do aquicultor, licenciamento ambiental e imposto territorial rural (ITR).
- ⁶ O valor pago aos funcionários e o custo com a remuneração do empresário são valores acrescidos dos encargos trabalhistas, que abrangem: férias (salário + 1/3 desse salário), Fundo de Garantia do Tempo de Serviço – FGTS (8%), 13º salário, e previdência social por meio do pagamento do INSS -Instituto Nacional do Seguro Social, de acordo com alíquota vigente em 2021: 7,5% sobre a 1ª faixa salarial (até R\$ 1.100), e em seguida de 9% sobre o valor remanescente da subtração do salário com o valor máximo da 1ª faixa salarial (2ª faixa salarial: R\$ R\$ 1.100,01 até R\$ 2.203,48).

Capítulo 3:

Avaliação da Sustentabilidade de Sistemas de Produção de *Astyanax lacustris*

Resumo

Este estudo apresentou como objetivo avaliar se a sustentabilidade ambiental, econômica e social do monocultivo de lambari-do-rabo-amarelo (*Astyanax lacustris*) é aumentada com a introdução de espécies como o camarão-da-amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) e o curimbatá (*Prochilodus lineatus*). Foi utilizado o conjunto de indicadores de sustentabilidade para analisar três fazendas hipotéticas com 5 ha de espelho d'água, localizadas na região de Ribeirão Preto/SP. Cada fazenda foi projetada para operar com um sistema de produção, sendo eles: monocultivo de lambari, cultivo integrado de lambari e camarão, e cultivo integrado de lambari, camarão e curimbatá. O sistema com três espécies utilizou menos recursos e de modo mais eficiente que os demais tratamentos, conduzindo a baixa liberação de poluentes no efluente e acúmulo de nutrientes no sedimento, porém houve maior emissão de quantidade de gases do efeito estufa. O sistema com duas espécies apresentou indicadores com valores intermediários em sua grande maioria, e o monocultivo utilizou mais recursos de modo pouco eficiente, mas proporcionou menor emissão de gases de efeito estufa. A avaliação dos indicadores econômicos evidenciou maior eficiência no uso de capital, incluindo as externalidades negativas, e consequentemente maior resiliência do cultivo integrado com as três espécies. O cultivo com duas espécies apresentou indicadores econômicos intermediários, e o monocultivo apresentou indicadores inferiores e maior tempo para recuperação de capital. Os indicadores de sustentabilidade social revelam a possibilidade de cultivos integrados assumirem um quadro de funcionários maior ou até mesmo aumentar o valor dos salários

pagos aos trabalhadores contratados. O monocultivo, por sua vez, apresentou indicadores mais robustos evidenciando maior sustentabilidade neste quesito. Assim, a alternativa de introdução de camarão, ou camarão e curimbatá pode aumentar a sustentabilidade em relação ao monocultivo de *A. lacustris*, principalmente nos aspectos ambientais e econômicos. No entanto, são necessários mais estudos para realização de adequações para alcançar maior sustentabilidade, principalmente, no âmbito social.

Palavras-chave: cultivo integrado, espécies nativas, indicadores de sustentabilidade

1. Introdução

As preocupações acerca de questões ambientais, produtivas e econômicas vem aumentando conforme vemos e vivenciamos o crescimento e a intensificação da produção aquícola. Temáticas como deterioração da qualidade da água e solos dos viveiros de cultivo, degradação do ambiente, estresse e crescimento reduzido de peixes, surtos de doenças e até mesmo a baixa margem de lucro foram ganhando espaço e se tornando alvos de atenção do ponto de vista acadêmico, governamental, produtivo e mercadológico (Kibria e Haque, 2018; Ahmed e Thompson, 2019; Boyd et al., 2020). Diante disso, alterações e adaptações que corroboram com os objetivos de desenvolvimento sustentável, contemplados na Agenda 2030 (UN, 2015), tem tido grande destaque e tem sido estimuladas em todo mundo, por serem entendidas como ações essenciais para o desenvolvimento da aquicultura sustentável (Valenti et al., 2021).

Uma alternativa aos tradicionais sistemas de monocultivo amplamente utilizados são os sistemas integrados de produção aquícola, como por exemplo a aquicultura multitrófica integrada (integrated multitrophic aquaculture – IMTA). Esse sistema de produção é alvo de grande interesse dos produtores atualmente, e pode favorecer o desenvolvimento da aquicultura sustentável (Marques et al., 2016; Henares et al., 2020). O cultivo integrado multitrófico apresenta princípios que se baseiam no tripé da sustentabilidade, visando o aumento da sustentabilidade ambiental, da estabilidade econômica e da aceitabilidade social. Nesse tipo de sistema, é explorado a otimização do uso do espaço e recursos disponíveis dentro dos viveiros de produção por meio do cultivo de espécies de diferentes níveis tróficos e com funções ecossistêmicas complementares (Chopin, 2013, Marques et al., 2016). Desse modo pode haver melhor aproveitamento dos recursos naturais e reciclagem dos resíduos dentro do próprio sistema (Marques et al., 2016; Boyd et al., 2020) Os resíduos e subprodutos das espécies alimentadas podem ser aproveitados como forma de alimento por outras espécies e consequentemente reduzir a carga de nutriente e material orgânico que vai para o meio ambiente derivado da produção (Chopin, 2013), de modo que seja possível aumentar o rendimento da produção de um único viveiro sem adicionar mais ração no sistema.

O cultivo integrado multitrófico do lambari-do-rabo-amarelo (*Astyanax lacustris*) com o camarão de água doce *Macrobrachium amazonicum*, e o cultivo integrado de *A. lacustris*, *M. amazonicum* e o peixe curimatá (*Prochilodus lineatus*) se mostrou tecnicamente viável, aumentando a eficiência de produção. O cultivo integrado dessas espécies foi classificado como nível máximo de integração (nível 5), de acordo com a escala de Boyd et al. (2020), porque essa integração promoveu a circularidade dos sistemas, a eficiência de assimilação de nutrientes e consequentemente a eficiência produtiva, permitindo a expansão e diversificação de mercados (Marques et al., 2021). Todas as espécies anteriormente citadas são nativas e apresentam elevado potencial econômico. O cultivo de espécies nativas configura uma característica importante para aumentar a sustentabilidade de sistemas de produção aquícola por reduzir o potencial impacto ambiental negativo resultado do escape e disseminação de patógenos, facilitando o manejo de efluentes (Valladão et al., 2018, Boyd et al., 2020). Além disso, cultivar espécies nativas pode trazer como vantagem a facilitação de comércio devido aos canais de distribuição dos produtos cultivados já serem existentes (Boyd et al., 2020). O *A. lacustris* pode ser comercializado como isca viva e como aperitivo no consumo humano (Fonseca et al., 2017; Valladão et al., 2018), assim como o *M. amazonicum* (Marques & Moraes-Valenti, 2012), enquanto que o *P. lineatus*, quando juvenil, pode ser comercializado para iniciativas de repovoamento de bacias no sudeste do Brasil ou para povoamento de viveiros de engorda (Valenti et al., 2021).

Contudo, vale ressaltar que a adoção de práticas como o cultivo integrado multitrófico utilizando *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *P. lineatus*, por exemplo, não garante que o empreendimento é conduzido de acordo com os princípios de sustentabilidade. Assim, é essencial e necessário medir e analisar a sustentabilidade para avaliar a eficácia das intervenções e também identificar os pontos fortes e fracos de cada sistema de aquicultura proposto (Valenti et al., 2018). No entanto, explorar e investigar a sustentabilidade de modo holístico, contemplando as dimensões ambiental, econômica e social é um grande desafio. Os indicadores de sustentabilidade, desenvolvidos por Valenti et al. (2018), para avaliar a aquicultura abrange o conceito de sustentabilidade. Esses indicadores são fáceis de serem calculados e compreendidos, e necessitam de um conjunto de dados que reduzem a complexidade do sistema de produção. Além disso, o

emprego desta ferramenta permite tanto avaliar a evolução de um mesmo sistema produção ao longo do tempo como comparar diferentes sistemas. (Valenti et al., 2018). Assim, de acordo com o exposto, este estudo teve por objetivo quantificar e comparar a sustentabilidade ambiental, econômica e social de sistemas de produção de lambari-do-rabo-amarelo, usando o conjunto de indicadores de sustentabilidade desenvolvido por Valenti et al., (2018), e identificar os pontos fortes e fracos de cada sistema de produção. Deste modo, foi possível testar a hipótese de que integrar o cultivo de *A. lacustris* com espécies bentônicas aumenta a sustentabilidade do sistema de produção.

2. Material e Métodos

A avaliação da sustentabilidade ambiental, econômica e social foi realizada em fazendas hipotéticas de produção de *Astyanax lacustris* operando em monocultivo (LM), cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum* (LCa) e cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* (LCaC). Os valores de densidade de estocagem, crescimento, conversão alimentar, sobrevivência e produção foram obtidos a partir do estudo experimental de Marques et al. (2021). Essas fazendas foram projetadas na região de Ribeirão Preto/ SP, com 50 viveiros escavados, mantidos sem renovação de água, com 0,1 ha de espelho d'água (20 m x 50 m x 1 m) em todos os sistemas de cultivo, totalizando uma área de viveiros de produção de 5 ha (Tabela 1). Esse tamanho de viveiros é compatível com o que tem sido observado nos cultivos comerciais de lambaris (Valenti et al., 2021). Foi escolhido 5 ha de área de produção porque fazendas comerciais instaladas em São Paulo, com área de viveiros similares, realizam a reprodução do lambari em estações de larvicultura, usando técnica similar à definida para este estudo (Fonseca et al., 2022).

Tabela 1. Área ocupada por cada setor de produção e área total das fazendas consideradas neste estudo para cada sistema produtivo. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*

Área (ha)	Sistema de Produção		
	LM	LCa	LCaC
Área de Viveiros de Produção	5,00	5,00	5,00
Área de Entorno dos Viveiros de Produção	1,25	1,25	1,25
Área de Produção de Alevinos de lambari	1,98	1,98	1,98
Área de Produção de Juvenis de camarão	0,00	0,86	0,86
Área Total da Fazenda	8,23	9,09	9,09

Além da área de viveiros, foi previsto que em todas as fazendas haveria uma área de produção de pós-larvas (pl) de lambari, que foi projetada de acordo com o descrito por Belmudes et al. (2021). Dessa maneira, esse espaço contaria com um setor para manutenção e reprodução das matrizes dessa espécie, e cubas para manutenção das larvas até o instante em que houvesse o consumo

total do saco vitelínico e nado em linha reta, momento em que passam a ser chamadas de pós-larvas. Essas pós-larvas seriam mantidas em viveiros escavados, em densidade de 300 pl. m⁻², até alcançarem o tamanho de alevinos para o povoamento dos viveiros de produção. Nas fazendas de cultivo integrado foi considerada a instalação de uma área de berçário para a produção dos juvenis de *M. amazonicum*, sendo composta por viveiros escavados para manter as pós-larvas, previamente compradas, em densidade de 200 pl. m⁻². O berçário teria duração de ~2 meses, tempo suficiente para que as pós-larvas alcancem o tamanho respectivo a fase de juvenil de desenvolvimento desta espécie. Assim, a área total da fazenda corresponde a área total dos viveiros de produção (5 ha), mais 25% desta área, que equivale a área de entorno dos viveiros de produção, mais a área de produção de alevinos de lambari-do-rabo-amarelo, e mais a área de berçário dos camarões de água doce (Tabela 1).

O estudo da sustentabilidade foi realizado utilizando o conjunto de indicadores desenvolvidos por Valenti et al. (2018). As fórmulas matemáticas para o cálculo de cada um dos indicadores estão detalhadamente descritas em Valenti et al. (2018). Esse método foi desenvolvido especificamente para o estudo da sustentabilidade de sistemas aquícolas. Os dados necessários para a avaliação da sustentabilidade destes sistemas produtivos foram obtidos a partir de experimento conduzido em viveiros experimentais no Setor de Carcinicultura do Centro de Aquicultura da Universidade Estadual Paulista (CAUNESP), Jaboticabal, São Paulo, Brasil (21°15'22"S, 48°18'48"W). Esses dados foram convertidos para áreas de produção de 5 ha e estão apresentados na Tabela 2. Os demais detalhes e informações a respeito do preparo dos viveiros, procedimento de estocagem, manejo e despesca são descritos por Marques et al. (2021).

Tabela 2. Dados de produção das fazendas de monocultivo de *Astyanax lacustris* (LM); cultivo integrado de *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum* (LCa) e cultivo integrado de *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* (LCaC), com área produtiva de 5 ha.

Variável	Tratamentos		
	LM	LCa	LCaC
Massa Média Individual Inicial (g) ¹			
<i>A. lacustris</i>	0,8 ± 0,8	0,8 ± 0,8	0,8 ± 0,8
<i>M. amazonicum</i>		1,1 ± 0,2	1,1 ± 0,2
<i>P. lineatus</i>			0,2 ± 0,1
Massa Média Individual Final (g) ¹			
<i>A. lacustris</i>	7,7 ± 0,8	7,8 ± 0,9	7,7 ± 0,8
<i>M. amazonicum</i>		2,7 ± 0,2	2,4 ± 0,2
<i>P. lineatus</i>			6,1 ± 2,2
Sobrevivência (%) ¹			
<i>A. lacustris</i>	46 ± 8	48 ± 9	56 ± 14
<i>M. amazonicum</i>		80 ± 4	81 ± 3
<i>P. lineatus</i>			70 ± 10
Produtividade (mil indivíduos/ano) ²			
<i>A. lacustris</i>	4.487.265	4.640.130	5.403.488
<i>M. amazonicum</i>		3.857.905	3.932.404
<i>P. lineatus</i>			1.769.151
Produtividade do Sistema Total Anual ²	4.487.265	8.498.036	11.105.042

¹ Dados obtidos por estudo de Marques et al. (2021)

² Dados estimados para cada sistema produtivo em fazendas de 5 ha

Para complementar o conjunto de dados necessários para a avaliação da sustentabilidade foram realizadas coletas e análises durante um ciclo de cultivo, que tem duração de 60 dias, e estão descritas a seguir:

2.1. Indicadores de Sustentabilidade Ambiental

Os indicadores da dimensão ambiental da sustentabilidade foram agrupados em quatro categorias: uso de recursos naturais, eficiência no uso dos recursos, liberação de poluentes no ambiente, e a conservação da diversidade genética e biodiversidade (Valenti et al., 2018). Assim, um total de 22 indicadores foram calculados. Para efeito comparativo com a literatura existente, os indicadores calculados baseados na unidade de produção foram divididos pelos seguintes valores de conversão: 0,00774 para o monocultivo, 0,00546 para o cultivo integrado LCa, e 0,00553 para o LCaC, a fim de obter os valores dos

indicadores baseados na biomassa produzida. Esses valores de conversão foram obtidos a partir da média da biomassa final dos animais produzidos em cada sistema estudado. Os dados utilizados para avaliar os indicadores foram obtidos a partir da coleta e análise dos animais povoados e despescados, ração, água de abastecimento e efluentes, sedimentos, e gases gerados durante o período experimental, conforme descrito a seguir:

2.1.1. Animais Povoados e Despescados e Ração

No início e no final do período experimental foi coletada uma amostra de 100 indivíduos de cada espécie que foi abatida em gelo, pesada e medida, e uma amostra de cerca de 20 g de ração foram utilizados para a determinação de carbono orgânico total, nitrogênio total, fósforo total e energia. Em seguida, foram secos em estufa a 60°C até atingir massa constante e posteriormente trituradas. O conteúdo de carbono total e nitrogênio total foi determinado pelo Analisador CHNS Elementar – Vario MACRO Cube. O conteúdo de fósforo total foi determinado pelo método de colorimetria do metavanadato, aplicado em amostras previamente incineradas na mufla por 4 horas a 550 °C (Michelsen, 1957). O teor energético foi determinado pelo método Dynamic 25°C em calorímetro IKA modelo C2000 basic.

2.1.2. Água de Abastecimento e Efluentes

A entrada de água no sistema de cultivo foi ajustada para repor as perdas por infiltração e evaporação. Desse modo, não havia saída de efluente dos viveiros durante o ciclo de cultivo. A determinação do volume de entrada de água, feita a cada 15 dias, foi obtida a partir do fechamento total da água de entrada por cerca de oito horas. Ao final deste período, foi avaliado quanto o nível de água diminuiu. Amostras de água de abastecimento foram obtidas quinzenalmente e a amostra do efluente foi obtida apenas no momento da despesca de cada um dos viveiros, visto que não havia renovação de água do sistema. Essas amostras de água foram armazenadas em garrafas de polietileno e mantidas em freezer (-18°C) até o momento da análise. Elas foram utilizadas na determinação de

carbono orgânico total, nitrogênio total, fósforo total e sólidos totais solúveis (STS). O carbono orgânico total (dissolvido e particulado) e o nitrogênio total foram determinados em analisador elementar de carbono e nitrogênio marca Elementar – Vario TOC Select. Para determinação do fósforo total, as amostras foram submetidas à digestão prévia, de acordo com o Método de Digestão Persulfato (APHA, 2017, 4500-P B5); em seguida, o ortofosfato obtido neste processo foi medido pelo método do Cloreto Estanhoso (APHA, 2017; 4500-P D), usando espectrofotômetro digital (Shimadzu, UV-1000). Os sólidos totais em suspensão foram medidos de acordo com APHA (2017, método 2540 D). A água de entrada, previamente classificada como água eutrófica (Marques et al., 2021), foi considerada como uma entrada de nutrientes e sólidos totais solúveis. Desse modo, a massa de cada uma dessas variáveis determinadas para a água de entrada foi descontada daquelas obtidas para o efluente, com o objetivo de se determinar o que realmente foi produzido pelo sistema de produção.

2.1.3. Sedimento

Para a quantificação do sedimento gerado pelo processo de produção, foram utilizados coletores de Tripton. Estes coletores são compostos por seis tubos de PVC de 1,9 L com 9,7 cm de diâmetro e 25,4 cm de comprimento, com área total de 0,045 m². Um coletor foi colocado dentro de cada viveiro e mantido por 24 horas, quinzenalmente. As amostras foram secas a temperatura de 95 a 100 °C (AOAC, 1995 - método 934.01) pesadas e analisadas em laboratório para a determinação da quantidade total de sedimento acumulado ao longo do período experimental, e dos conteúdos de carbono orgânico total, nitrogênio total, fósforo total, a partir da mesma metodologia utilizada para a determinação dos animais e ração.

2.1.4. Gases de Efeito Estufa

As liberações de gás carbônico (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) para a atmosfera podem ocorrer por emissões ebulitivas (bolhas) e por trocas de gás por difusão na interface água-ar (Matvienko et al., 2000). Para capturar as

bolhas, funis de fibra de vidro suspensos por flutuadores foram instalados, quinzenalmente, na superfície dos viveiros. O diâmetro da boca do funil tem 0,3 m, com um ângulo de 60°, terminando em diâmetro de 20 mm. Na extremidade do funil foi conectado recipiente (250 mL), que coletará as bolhas liberadas num período de 24 horas. Após este período, os recipientes foram levados ao laboratório para análise cromatográfica. A difusão na interface água-ar foi avaliada pelo método do equilíbrio, no qual porções confinadas de ar são permitidas a parcialmente se equilibrar com o gás dissolvido na água durante períodos de 0, 2, 4 e 8 minutos, usando câmaras de difusão. Todas as amostras foram acondicionadas em tubos de transferência para análises cromatográficas (Shimadzu – GC-2014 Permanent Gas Analyzer). Esse sistema GC apresenta dois sensores, o detector de condutividade térmica (TCD) e detector de ionização por chama (FID), os quais quantificam CO₂ e CH₄. Os valores de massa de metano e óxido nítrico foram convertidos em equivalentes de CO₂, considerando o Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential - GWP) para o período de 100 anos, de acordo com o 6º Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2021). Assim, a massa de metano foi multiplicada por 27,2 e a de óxido nítrico por 273, que corresponde à quantidade de energia que cada unidade de massa de um determinado gás pode manter na atmosfera, em relação à mesma unidade de massa de CO₂.

2.2. Indicadores de Sustentabilidade Econômica

Os indicadores de sustentabilidade econômica utilizados avaliam a eficiência do uso de capital, a lucratividade, incluindo as externalidades, bem como a capacidade de resiliência da atividade (Valenti et al., 2018). Esses indicadores foram calculados a partir dos resultados obtidos pelos indicadores de viabilidade econômica apresentados no capítulo 2 desta tese, sendo adicionado as externalidades, positivas e negativas, geradas em cada um dos sistemas produtivos avaliados. As externalidades positivas ou negativas foram avaliadas e baseadas na remoção ou no lançamento de nitrogênio e fósforo nos efluentes dos viveiros de produção, e a absorção ou emissão dos gases de efeito estufa (GEE). A monetização das externalidades positivas foi incluída na receita, e das externalidades negativas foi incluída nos custos variáveis. Essa monetização foi

obtida baseando-se nos valores apresentados por Chopin (2010), sendo de R\$ 41,94/ kg de nitrogênio e de R\$ 16,77/ kg de fósforo do efluente, e nos valores obtidos em site especializado em investimentos com cotações específicas para o mercado de gases de efeito estufa (R\$ 0,11/ kg de CO₂ equivalente; obtido em infomoney.com.br). Os valores monetários da massa de nitrogênio e fósforo foram atualizados para o ano de 2021 utilizando o indicador de correção IGP-DI (Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna), obtido diretamente no site da Fundação Getúlio Vargas (FGV). Todos os custos foram obtidos no mercado brasileiro no primeiro semestre de 2021.

O mercado a ser explorado foi de isca viva para as espécies *Astyanax lacustris* e *Macrobrachium amazonicum* por R\$ 0,35/ unidade e R\$ 0,50/ unidade, respectivamente, segundo pesquisa de mercado previamente realizada. A espécie *Prochilodus lineatus* seria comercializada com a finalidade de repovoamento de bacias hidrográficas impactadas por barragens (Valenti et al., 2021), por R\$ 0,80/ unidade. Para o cálculo do indicador de *Diversidade de Mercados* foi considerado além do mercado alvo neste estudo, os possíveis mercados que cada produto poderia alcançar na região de interesse. Assim, caso fosse necessário o *A. lacustris* e o *M. amazonicum* poderiam abastecer além do mercado de iscas, o mercado de consumo humano, e o peixe *P. lineatus* poderia abastecer além do mercado de repovoamento de bacias, o mercado de venda para engorda. Essa escolha foi feita por entender que estas possibilidades reais de venda podem aumentar a resiliência do empreendimento.

2.3. Indicadores de Sustentabilidade Social

Os indicadores de sustentabilidade social refletem a capacidade de gerar benefícios para as comunidades locais. Esses indicadores foram baseados nos indicadores de sustentabilidade econômica. Para cada sistema estudado, foi considerado a contratação de 5 funcionários entre a população local, que se revezariam para execução de tarefas diárias de manejo e manutenção dos cultivos, tais como alimentação e avaliação das variáveis de qualidade de água, e realizariam atividades de povoamento, despesca e biometria. Para essas últimas atividades haveria a contribuição de outro funcionário com mão de obra especializada que teria a responsabilidade de manutenção e manejo de áreas de

produção de alevinos de lambari e berçário de camarão, quando em sistemas integrados. Esse funcionário com mão de obra especializada também seria recrutado na região de Ribeirão Preto, porque as Universidades instaladas na região geram mão de obra qualificada para a atividade. A carga horária de trabalho seria de 180 horas mensais para cada um deles, não havendo a contratação de mão de obra de caráter eventual. O valor do *pró-labore* utilizado nesta análise foi igual ao custo de oportunidade referente à remuneração do empresário considerada para a análise econômica. Foram julgados como empregos diretos gerados: cinco empregos permanentes de média qualificação, um emprego permanente para um profissional especializado e um autoemprego. Como empregos indiretos foi considerado o mínimo de um (01) emprego para aqueles serviços prestados a partir da compra de insumos diretamente relacionados a produção aquícola, tais como: aeradores, rede de arrasto e ração. A rede de arrasto e os aeradores são produtos que precisam ser adquiridos em outra região porque não existem empresas e nem representantes de vendas que comercializam esses produtos na região de Ribeirão Preto. Os demais produtos e serviços necessários foram considerados como de fácil obtenção da região estudada. Para avaliar o indicador referente a *Segurança no Local de Trabalho* foram consideradas a adequada iluminação na área de trabalho e instalação elétrica e hidráulica, e itens computados para o orçamento dos custos com equipamentos de proteção individual, que foram: macacão impermeável de pesca com bota, bota galocha impermeável, boné tipo Árabe para proteção contra o sol, pares de luvas pigmentadas e *kit* de primeiros socorros.

2.4. Análise dos Indicadores de Sustentabilidade

Após a obtenção de cada um dos indicadores de sustentabilidade que compõem as dimensões ambiental, econômica e social, esses valores foram convertidos em uma escala de performance, com escores variando entre 0 (zero) e 1 (um). Para tanto, foi realizada a comparação dos valores dos indicadores obtidos, de modo que aquele mais sustentável foi arbitrariamente pontuado como 1, e os demais foram determinados por proporção. Desse modo, os indicadores foram transformados em variáveis sem dimensão (Valenti et al., 2018). A seguir,

determinou-se um subíndice para cada dimensão da sustentabilidade avaliada por meio de média aritmética. Para a sustentabilidade ambiental, foi determinado a princípio um subíndice para cada uma das quatro categorias: uso de recursos naturais, eficiência no uso dos recursos, liberação de poluentes no ambiente, e a conservação da diversidade genética e biodiversidade, por meio de média ponderada, onde os pesos de cada categoria foram: 7, 5, 9 e 1, respectivamente. O Índice Geral de Sustentabilidade foi determinado pela média aritmética dos subíndices da sustentabilidade ambiental, econômica e social em cada sistema de produção.

3. Resultados

3.1. Indicadores de Sustentabilidade Ambiental

O cultivo integrado de *Astyanax lacustris* com o *Macrobrachium amazonicum* e o *Prochilodus lineatus* (LCaC) apresentou ótimo desempenho para cada um dos indicadores de sustentabilidade ambiental estudados, exceto para o indicador Potencial de Aquecimento Global. Esse sistema produtivo apresentou o melhor subíndice de sustentabilidade ambiental geral (0,94) (Tabela A1; Figura 1).

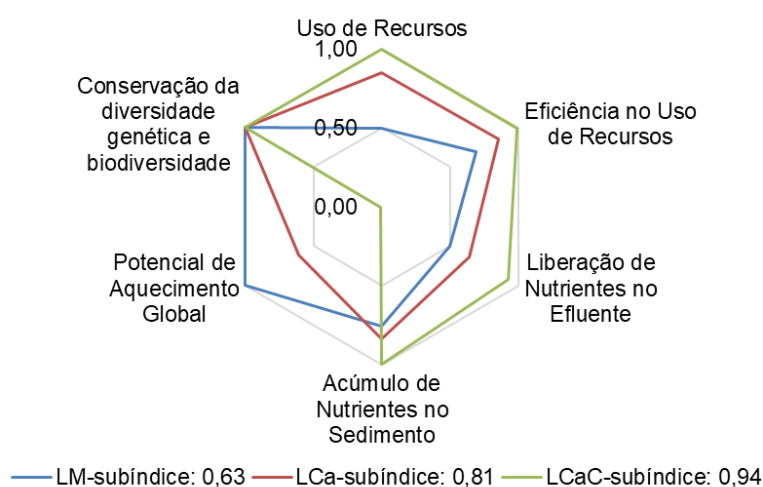


Figura 1. Indicadores de sustentabilidade ambiental transformados em escala de performance de zero a 1 e subíndice de sustentabilidade obtido para cada sistema de produção testado. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

O cultivo integrado (LCaC) utilizou menos recursos como água e espaço, para produzir mais biomassa comercializável em comparação com os demais tratamentos (Tabela 3). Energia e nutrientes como nitrogênio, fósforo e carbono foram eficientemente incorporados na biomassa produzida, possibilitando que baixas quantidades poluentes fossem liberadas na água e acumulados no sedimento, em relação aos demais sistema produtivos (Tabela 3). No entanto, a liberação de gases de efeito estufa (GEE) foi a maior entre todos os sistemas estudados, representando uma liberação de 114,59 kg de CO₂eq por milheiro produzido (Tabela 3).

Tabela 3. Média dos indicadores de sustentabilidade ambiental obtidos em cada um dos sistemas de produção. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

Indicadores	Unidade	Sistemas de Produção		
		LM	LCa	LCaC
Uso de Recursos				
Uso do Espaço	ha.uni ⁻¹	0,007±0,000	0,003±0,000	0,002±0,000
Dependência de Água	m³.uni ⁻¹	613,49±155,48	203,57±12,50	161,49±50,59
Uso de Energia	MJ.uni ⁻¹	331,13±74,82	180,77±22,03	146,37±21,26
Uso de Nitrogênio	kg.uni ⁻¹	0,83±0,19	0,42±0,06	0,40±0,06
Uso de Fósforo	kg.uni ⁻¹	0,21±0,05	0,12±0,02	0,09±0,01
Uso de Carbono	kg.uni ⁻¹	5,87±1,32	3,09±0,42	2,50±0,38
Proporção de Energia Renovável ¹	%	0,98±0,01	1±0	0,99±0,01
Eficiência no Uso de Recursos				
Eficiência no Uso de Energia	%	52,39±14,00	60,63±6,59	77,25±14,61
Eficiência no Uso de Nitrogênio	%	39,99±32,99	84,13±17,45	80,19±23,37
Eficiência no Uso de Fósforo	%	43,89±11,60	44,84±8,68	62,45±7,80
Eficiência no Uso de Carbono	%	32,23±11,70	41,48±9,48	54,54±14,85
Produção Realmente Utilizada	%	1±0	1±0	1±0
Liberação de Poluentes - Efluente				
Potencial de Eutrofização - PENitrogênio	kg.uni ⁻¹	0,012±0,013	0,002±0,003	0,002±0,002
Potencial de Eutrofização - PEFósforo	kg.uni ⁻¹	0,001±0,003	0,002±0,003	0,001±0,001
Potencial de Poluição Orgânica (COT ²)	kg.uni ⁻¹	0,13±0,11	0,15±0,08	0,05±0,04
Potencial de Sedimentação/Assoreamento ³	kg.uni ⁻¹	-2,94±0,96	-0,87±0,29	-1,15±0,19
Liberação de Poluentes - Sedimento				
Acúmulo de Nitrogênio	kg.uni ⁻¹	1,85±0,67	1,70±0,18	1,38±0,45
Acúmulo de Fósforo	kg.uni ⁻¹	0,41±0,12	0,36±0,06	0,27±0,10
Acúmulo de Carbono (COT ²)	kg.uni ⁻¹	33,23±13,62	31,22±5,72	25,77±10,71
Acúmulo de Material Particulado	kg.uni ⁻¹	187,78±60,84	165,27±15,37	159,93±37,87
Liberação de Poluentes-GEE ⁴				
Potencial de Aquecimento Global	kg CO ₂ eq.uni ⁻¹	2,53±104,37	46,58±161,94	114,59±87,00
Conservação da Diversidade Genética e Biodiversidade				
Risco de espécies cultivadas	-	1±0	1±0	1±0

uni = unidade = um milheiro (1.000 indivíduos produzidos).

¹ Entre os itens avaliados (ração, mão de obra, animais povoados e energia elétrica) a ração, mão de obra, e animais produzidos foram consideradas como energia renovável.

² COT = Carbono Orgânico Total

³ O sinal negativo indica que a água de entrada dos viveiros apresentou maior massa de sólidos totais solúveis do que a água de saída dos viveiros, após a despesca.

⁴ GEE = Gases de Efeito Estufa. O sinal positivo indica emissão de GEE. CO₂eq = equivalentes em CO₂.

O sistema LCa apresentou desempenho intermediário na maioria dos indicadores estudados, e consequentemente o segundo melhor subíndice para a sustentabilidade ambiental (0,81) (Tabela A1, Figura 1). A eficiência de incorporação do nitrogênio ligeiramente maior (84%) do que no sistema LCaC (80%). A liberação de gases de efeito estufa foi menor em relação ao sistema LCaC, liberando ~47 kg de CO₂eq por milheiro produzido no sistema LCa (Tabela

3). O cultivo LCa apresentou maior potencial de poluição orgânica proporcionando a liberação de cerca de 0,15 kg de material orgânico por milheiro produzido, resultado similar ao monocultivo (LM - 0,13 kg de material orgânico por milheiro produzido) (Tabela 3).

O monocultivo de lambari (LM) apresentou o pior desempenho na maioria dos indicadores de sustentabilidade ambiental em comparação com os sistemas integrados, tendo portanto o menor subíndice (0,63) (Tabela A1, Figura 1). Contudo, esse foi o sistema com menor emissão de gases de efeito estufa, liberando 2,53 kg de CO₂eq por milheiro produzido (Tabela 3), e consequentemente apresentou o melhor valor para este indicador (Tabela A1, Figura 1). Os três sistemas não apresentam risco à biodiversidade do ecossistema adjacente a produção, dessa forma o indicador calculado para refletir essa característica mostrou elevada performance (Tabela A1, Figura 1).

3.2. Indicadores de Sustentabilidade Econômica

O sistema com melhor desempenho para a maioria dos indicadores de sustentabilidade econômica foi o cultivo integrado LCaC, apresentando subíndice geral de sustentabilidade próximo a 1,00 (Tabela A2; Figura 2).

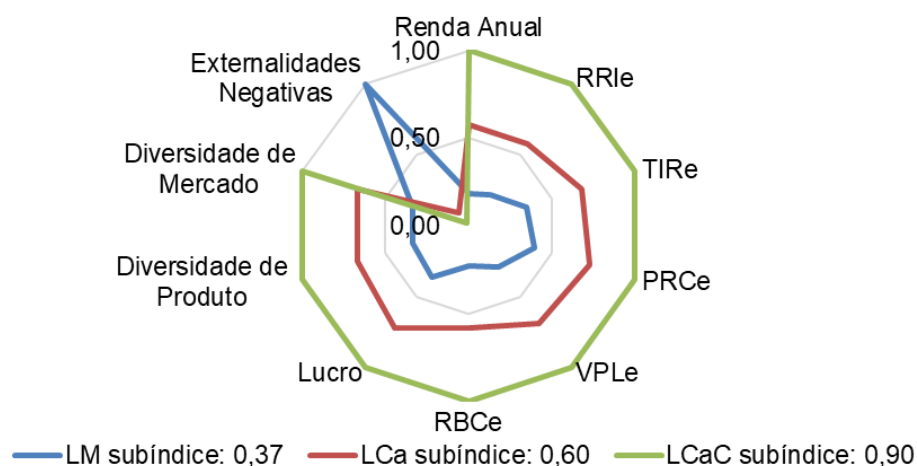


Figura 2. Indicadores de sustentabilidade econômica transformados em escala de performance de zero a 1 e subíndice de sustentabilidade econômica obtido para cada sistema de produção testado. LM = Monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*. Onde, RRle = relação receita líquida-investimento inicial; TIRe = taxa interna de retorno; PRce = período de retorno de capital; VPLe = valor presente líquido; RBCe = relação custo-benefício (R\$ por R\$ 1,00 investido). Todos esses indicadores são acrescidos de externalidades (e).

A relação entre receita líquida e investimento inicial (RRle) do cultivo LCaC foi maior que 100%, indicando elevada eficiência no uso do capital investido (Tabela 4). Esse sistema produtivo revelou viabilidade econômica da produção, obtendo TIRe igual a 47% e VPLe igual a R\$ 2.220 para cada milheiro produzido (Tabela 4). Nesse cenário foi obtido uma relação de ~R\$ 15,00 para cada R\$ 1,00 investido, permitindo que fosse alcançado um lucro de mais do que R\$ 200,00 por milheiro produzido anualmente. Dessa maneira é possível que o capital investido seja recuperado em 2,44 anos (Tabela 4).

Tabela 4. Indicadores de sustentabilidade econômica obtidos para cada um dos sistemas de produção em fazendas de médio porte (5 ha) durante um ano de produção. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

Indicadores Econômicos	Unidade	Sistemas de Produção		
		LM	LCa	LCaC
Renda Anual	R\$	537.953,26	1.671.186,05	2.893.401,40
RRle¹	%	31	84	145
TIRe²	%	16	32	47
VPLe³	R\$.uni ^{-1*}	643,09	1.524,63	2.219,62
RBCe⁴	R\$	3,31	8,51	14,64
Lucro	R\$.uni ^{-1*}	87,08	174,74	242,50
PRCe⁵	anos	6,12	3,36	2,44
Diversidade de Produto		1	2	3
Diversidade de Mercado		2	4	6
Externalidades Positivas⁶	R\$.uni ^{-1*}	0,00	0,00	0,00
Externalidades Negativas⁷	R\$.uni ^{-1*}	0,49	5,51	12,65
Fósforo⁸	R\$.uni ^{-1*}	0,02	0,04	0,01
Nitrogênio⁸	R\$.uni ^{-1*}	0,44	0,08	0,10
GEE⁹	R\$.uni ^{-1*}	0,03	5,39	12,54

*uni = unidade = um milheiro

¹ RRle = relação receita líquida/ investimento inicial acrescida de externalidades;

² TIRe = taxa interna de retorno acrescida de externalidades;

³ VPLe = valor presente líquido acrescido de externalidades;

⁴ RBCe = relação custo-benefício acrescida de externalidades (R\$ por R\$ 1,00 investido)

⁵ PRCe = período de retorno de capital acrescido de externalidades;

⁶ Externalidades Positivas indicam os custos totais a serem recebidos com a retirada de nutrientes e absorção de gases de efeito estufa a cada milheiro produzido.

⁷ Externalidades Negativas indicam os custos totais a serem pagos com a emissão de nutrientes e gases de efeito estufa para cada milheiro produzido.

⁸ Custo a ser pago sobre a carga dos nutrientes liberados pelo efluente de cada sistema estudado a cada milheiro produzido .

⁹ GEE = Gases de efeito estufa. Custo a ser pago sobre a quantidade de GEE emitidos de cada sistema estudado, a cada milheiro produzido.

A renda anual foi de quase R\$ 3.000.000,00 para o cultivo LCaC, indicando capacidade de permanência do produtor na atividade. Além do mais, a diversidade de produtos neste cultivo proporciona elevada diversidade de mercados a serem alcançados. As externalidades produzidas no cultivo LCaC foram apenas negativas, indicando um custo de R\$ 12,65 para cada milheiro produzido ao ano (Tabela 4).

A integração do cultivo de *A. lacustris* apenas com *M. amazonicum* revelou desempenho intermediário em todos os indicadores de sustentabilidade econômica, apresentando subíndice geral de sustentabilidade econômica igual a 0,60 (Tabela A2; Figura 2). Esse sistema (LCa) apresentou eficiência de 84% no uso de capital investido, e viabilidade econômica com TIRe de 32% e VPLe de R\$ 1.525 para cada milheiro produzido ao ano (Tabela 4). A relação benefício – custo desse sistema de produção (LCa) foi quase metade da obtida para o sistema LCaC, sendo de R\$ 8,51. O lucro obtido foi de ~R\$ 174 por milheiro produzido anualmente, e a recuperação do capital investido ocorre em pouco mais de 3 anos. A renda anual obtida pelo produtor que opte por esse sistema produtivo foi menor do que a obtida pelo sistema LCaC, no entanto a diversidade de produtos ainda permite que se obtenha certa diversidade de mercado, mesmo sem uma terceira espécie produzida. O custo com as externalidades produzidas durante um ano de produção em sistema LCa foi de R\$ 5,51 por milheiro produzido.

O monocultivo de lambari foi o sistema com o pior desempenho na grande maioria dos indicadores avaliados, apresentando média geral de sustentabilidade econômica igual a 0,37 (Tabela A2; Figura 2). Esse sistema produtivo apresentou a menor eficiência no uso de capital investido. Embora os valores dos indicadores de viabilidade econômica, tais como TIRe e VPLe, tenham sido positivos, eles foram muito baixos em comparação com os demais tratamentos, sendo de 16% e R\$ 643,09, respectivamente (Tabela 4). A relação benefício – custo obtida a partir desse sistema produtivo foi de apenas ~R\$ 3,00 para cada R\$1,00 investido, sendo esse valor cerca de quatro vezes menor do que o obtido em cultivo integrado LCaC, e cerca de três vezes menor do que o sistema LCa. O lucro gerado foi de apenas R\$ 87,08 para cada milheiro produzido ao ano, e o retorno do capital investido só seria alcançado após 6 anos. As externalidades negativas geradas a partir do funcionamento desse sistema produtivo foram de R\$ 0,49 por milheiro produzido, o menor custo a ser pago devido a liberação de nutrientes no

efluente e emissão de GEE em comparação com os demais sistemas produtivos (Tabela 4).

3.3. Indicadores de Sustentabilidade Social

O sistema produtivo que apresentou melhor desempenho na maioria dos indicadores de sustentabilidade foi o monocultivo, exibindo um subíndice igual a 1,00 (Tabela A3; Figura 3). Os sistemas integrados tiveram desempenho inferior para estes indicadores, gerando subíndice de 0,77 para o sistema LCa e de 0,74 para o sistema LCaC (Tabela A3; Figura 3).

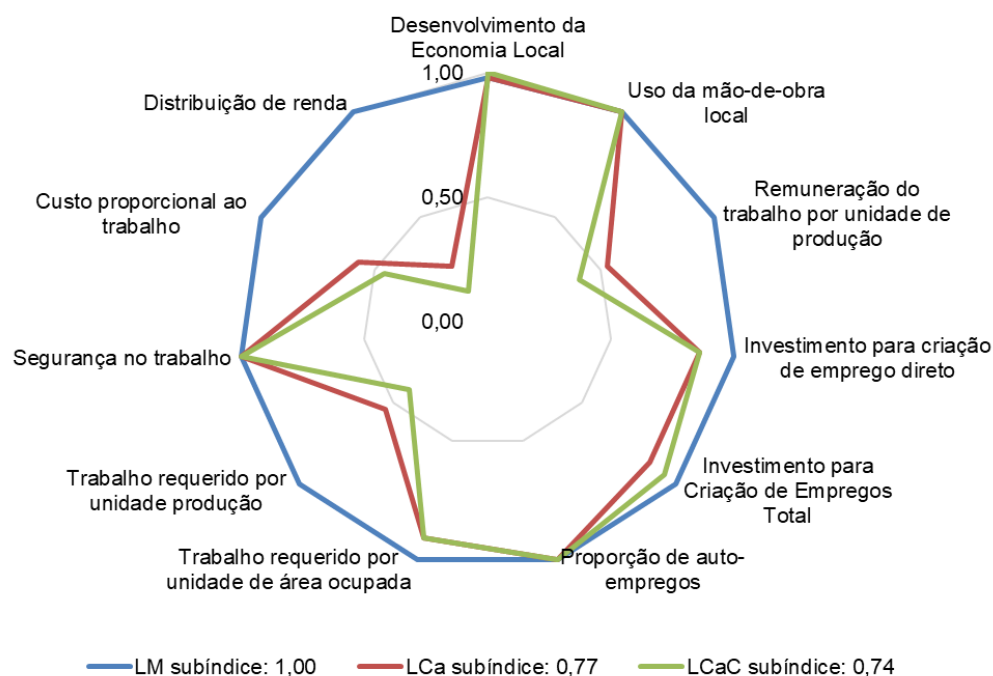


Figura 3. Indicadores de sustentabilidade social transformados em escala de performance de zero a 1 e subíndice de sustentabilidade social obtido para cada sistema de produção testado. LM = Monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *Astyanax lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

O cultivo LM pagou R\$ 38,26 aos funcionários contratados com cada milheiro produzido, enquanto que os sistemas LCa e LCaC pagaram um valor similar e menor do que R\$ 20,00, respectivamente (Tabela 5). Paralelamente a isso, a quantidade de trabalho requerida por hectare de produção ou mesmo por milheiro produzido foram maiores para fazendas que empregam o monocultivo do que naquelas em que o cultivo integrado é realizado, indicando que maior quantidade de mão de obra pode ser empregada nesses sistemas integrados

(Tabela 5). Um profissional especializado pode gerenciar a larvicultura de lambari no sistema de monocultivo e acumular o gerenciamento do berçário de camarões nas fazendas de cultivo integrado. Portanto, foi considerado apenas um funcionário especializado nos três sistemas de cultivo estudados.

O percentual obtido referente ao custo do trabalho em relação ao custo total da produção foi de apenas ~15% no monocultivo e menor do que 10% nos cultivos integrados. Da mesma maneira, baixos percentuais de distribuição de renda foram alcançados em todos os tratamentos. Sendo que menos da metade (~44%) do lucro é distribuído em termos de salário no monocultivo, e nos cultivos integrados esse percentual reduz para menos de 12% (Tabela 5).

Tabela 5. Indicadores de sustentabilidade social obtidos para cada um dos sistemas de produção em fazendas de médio porte (5 ha). LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

Indicadores Sociais	Unidade	Sistemas de Produção		
		LM	LCa	LCaC
Desenvolvimento da economia local	%	91	91	93
Uso da mão de obra local	%	100	100	100
Remuneração do trabalho por unidade de produção	R\$/uni*	38	20	15
Investimento para criação de emprego direto	R\$/emprego	245.749	284.942	284.942
Investimento para criação de emprego total	R\$/emprego	156.386	181.327	166.216
Proporção de autoempregos	%	14	14	14
Trabalho requerido por unidade de área ocupada	Hh**/ha	1.684	1.525	1.525
Trabalho requerido por unidade de produção	Hh**/uni*	3	2	1
Segurança no trabalho	%	41	41	41
Custo proporcional ao trabalho	%	15	8	7
Distribuição de renda	%	44	12	6

*uni = unidade= 1.000 indivíduos

**Homem-hora

A criação dos empregos diretos e/ ou empregos totais (diretos e indiretos) foi realizada com menor necessidade de investimento no monocultivo, enquanto que para os cultivos integrados houve necessidade de maior investimento para a criação destes empregos. Todos os sistemas de cultivo estudados utilizaram 100% da mão de obra local, tiveram ~14% de autoemprego em relação aos empregos gerados e ~41% de segurança no trabalho (Tabela 5).

3.4. Sustentabilidade Geral

Os índices de sustentabilidade geral obtidos em cada um dos sistemas de produção evidenciam que o cultivo integrado com três espécies é mais sustentável que os demais sistemas estudados para a produção de *Astyanax lacustris* (Tabela A4; Figura 4). O sistema LCaC apresentou maior índice de sustentabilidade (0,86), seguido pelo sistema LCa com índice igual a 0,73, e pelo sistema LM que alcançou índice de 0,67 (Tabela A4; Figura 4).

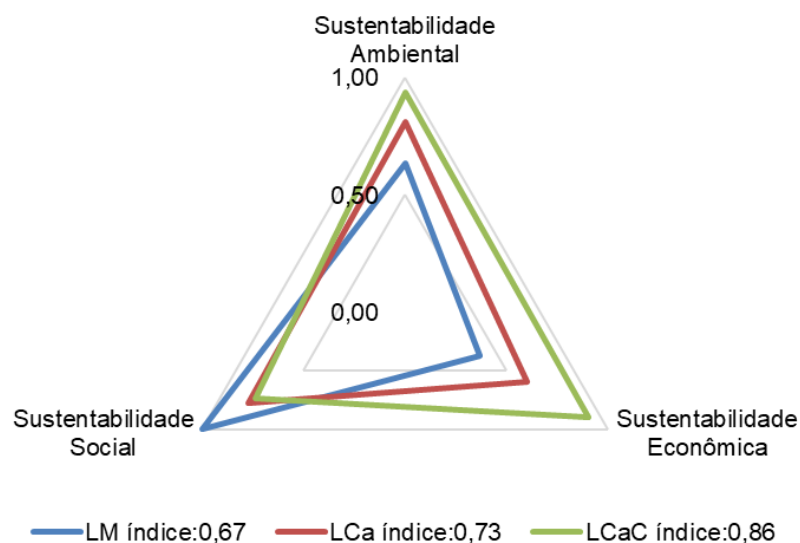


Figura 4. Índice de sustentabilidade geral obtido a partir dos subíndices de sustentabilidade ambiental, econômico e social para cada sistema de produção testado. LM = Monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

O cultivo LCaC e LCa apresentaram melhores resultados para os subíndices de sustentabilidade dos pilares ambiental e econômico. No entanto, os subíndices obtidos a partir dos indicadores sociais evidenciaram baixo desempenho destes sistemas. Por outro lado, o cultivo LM não obteve desempenho tão favorável nos indicadores ambientais e econômicos quanto nos indicadores sociais da sustentabilidade.

4. Discussão

Os indicadores de sustentabilidade calculados para os três sistemas de produção de *Astyanax lacustris* estudados evidenciaram a maior sustentabilidade ambiental para os cultivos integrados. Estes sistemas usam menos recursos e aproveitam de modo mais eficiente os nutrientes para a produção de biomassa comercializável, além de proporcionar que as menores massas de nutrientes eutrofizantes fossem liberadas na água e acumuladas no sedimento. Boyd et al. (2020) afirmam que a dependência da água é drasticamente reduzida quando se intensifica a produção. Tal afirmativa é corroborada pelo indicador ambiental *dependência da água*, que mostrou redução de cerca de até quatro vezes do uso de água para produção de um milheiro de animais por viveiro em sistemas integrados. Além disso, foi utilizado cinco vezes menos espaço e duas vezes menos nutrientes e energia em sistema integrado quando comparado ao monocultivo. O monocultivo de *A. lacustris* estudado nesta tese apresentou melhores resultados do que o monocultivo da espécie de lambari *Deuterodon iguape* (Fonseca et al., 2017), quanto ao uso e a eficiência do uso de recursos naturais. O monocultivo de *D. iguape* teve maior consumo de recursos naturais como espaço ($1,2-1,3 \text{ ha.t}^{-1}$), água ($>150.000 \text{ m}^3.\text{t}^{-1}$), energia ($92.000-125.000 \text{ MJ.t}^{-1}$) e nutrientes (nitrogênio: 227-307; fósforo: 121-164; carbono $2.100-2.900 \text{ kg.t}^{-1}$), em comparação com os resultados obtidos, neste estudo, para o monocultivo de *A. lacustris*, que foram de $0,9 \text{ ha.t}^{-1}$; $79.263 \text{ m}^3.\text{t}^{-1}$; 40.857 MJ.t^{-1} ; 107 kg.t^{-1} , 28 kg.t^{-1} ; 758 kg.t^{-1} , respectivamente. Ao passo que o monocultivo de *A. lacustris* apresentou maior eficiência no uso de recursos como energia (52%) e nutrientes (nitrogênio: 40%; fósforo: 44%; carbono: 32%) do que o monocultivo com a espécie *D. iguape* (energia: 19-26%; nitrogênio 25-39%; fósforo: 13-18%; carbono 20-25%) (Fonseca et al., 2017).

Estruturar uma produção visando a maior eficiência dos recursos naturais e de todas as entradas de nutrientes em um sistema produtivo é de suma importância para diminuir a degradação ambiental do planeta e aumentar a produtividade (Bosma e Verdegem, 2011; Boyd et al., 2020), de modo a sincronizar aquilo que é produzido com aquilo que é utilizado (Thomas et al., 2020). A mesma taxa de alimentação foi utilizada para o arraaçamento dos três sistemas de produção estudados. No cultivo integrado com as três espécies

obteve-se melhor aproveitamento da ração e consequente melhor taxa de conversão alimentar, permitindo produzir mais sem aumentar os insumos alimentares (Marques et al., 2021). As taxas de alimentação e de conversão alimentar são fatores essenciais para a determinação da qualidade da água de um sistema de produção (Bosma e Verdegem, 2011). O cultivo de diferentes espécies que utilizam diferentes recursos em um mesmo viveiro de produção pode proporcionar resiliência ao sistema de cultivo devido à adaptação das diferentes espécies a diferentes condições ambientais (Thomas et al., 2020).

Apesar destes grandes benefícios, a utilização de espécies que ocupem a região próxima ao sedimento proporcionou o aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE), provavelmente devido ao fenômeno da bioturbação do sedimento. A movimentação do material sedimentado no fundo libera possíveis bolhas de metano ou óxido nitroso. Além disso, a movimentação do sedimento permite a oxigenação da matéria orgânica sedimentada, favorecendo a decomposição aeróbica e a liberação de CO_2 . Embora esses processos aumentem a liberação de gases do efeito estufa, a decomposição aeróbica evita a formação de CH_4 e N_2O que tem potencial de aquecimento global 27,2 e 273 vezes o do CO_2 . No entanto, os dados obtidos não mostraram essa redução na liberação de gases do efeito estufa em equivalentes de CO_2 . Levar o oxigênio a zonas anóxicas do sedimento reduz o acúmulo de substâncias tóxicas (Flickinger et al., 2019). Além disso, a bioturbação também possibilita a ressuspensão dos nutrientes para a coluna d'água favorecendo o desenvolvimento do plâncton disponível para a alimentação de outros animais (Boyd et al., 2020), tais como os lambaris. No monocultivo de lambari, os gases do efeito estufa podem ter sido produzidos e ficado armazenados no sedimento, já que não existiu a bioturbação. Isso explicaria a menor emissão durante o cultivo. No entanto, durante a despesca, o sedimento é revolvido e esses gases escapariam para a atmosfera. Como não medimos essa forma de emissão, nossos resultados indicam maior emissão de GEE para a atmosfera nos cultivos multitróficos. Coletas de GEE durante e logo após a despesca precisam ser realizadas para testar essa hipótese.

A liberação de GEE somado a liberação de nutrientes com potencial de eutrofização obtida em todos os sistemas gerou externalidades negativas para as fazendas. Os cultivos integrados apresentaram os maiores dispêndios com essas

externalidades do que o monocultivo. No entanto, todos os empreendimentos estudados absorveram essas externalidades sem comprometer a viabilidade e sustentabilidade econômica. Apesar destes custos a mais, os cultivos integrados também apresentaram maior sustentabilidade econômica do que o monocultivo de *A. lacustris* porque os recursos financeiros foram mais eficientemente empregados, trazendo viabilidade e maior resiliência para a atividade. Em geral, estudos sobre a viabilidade econômica de cultivos integrados com diferentes configurações e espécies cultivadas em ambiente marinho tem mostrado aumento de lucros e viabilidade baseados nos custos e receitas estimados (Knowler et al., 2020). Em ambientes de água doce, maior viabilidade e lucro também tem sido encontrado em diferentes sistemas integrados com diferentes espécies como o cultivo integrado com *Colossoma macropomum* e *M. amazonicum* (Dantas et al., 2022) e *Deuterodon iguape* e tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) (Gonçalves et al., 2015), por exemplo. A renda anual gerada em cada um dos sistemas de cultivo permite que o proprietário forneça um padrão de vida elevado para sua família. Sendo possível gerar uma renda de mais de R\$ 100.000,00 para o cultivo LM; mais do que R\$ 300.000,00 para o cultivo LCa, e mais do que R\$ 500.00,00 para o cultivo LCaC ao ano para cada familiar, considerando uma família com 5 indivíduos. Esse valor é bem superior ao salário médio *per capita*¹ estimado em ~R\$ 1.1171,26 da população da cidade de Ribeirão Preto no ano de 2019 (IBGE, 2022).

A produção de diferentes espécies permite que múltiplos mercados sejam alcançados. Essa diversificação, de produtos e mercados, é tida como essencial para a resiliência do empreendimento aquícola diante de possíveis interrupções de produção e flutuações de mercado, evidenciando a capacidade de se reorganizar e persistir frente a situações adversas (Valenti et al., 2018; Boyd et al., 2020). Cada uma das espécies cultivadas apresenta possibilidade de comercialização, na região estudada, em dois mercados distintos. Assim, quando um mercado, porventura, impede o escoamento da produção, o empreendimento

¹ O salário médio *per capita* foi calculado a partir da quantidade estimada de pessoas ocupadas no município de Ribeirão Preto em 2019 e a média salarial de 2,8 salários mínimos, com valor médio igual a R\$ 1.059,00, considerando os anos de 2019, 2020, e 2021. Então, o salário total obtido foi dividido pela quantidade de pessoas estimadas no município.

pode se sustentar abraçando o outro mercado, mas tendo como atenção às possíveis adaptações necessárias tais como o preço de venda. Os segmentos de mercado para peixes nativos são diversos e muito rentáveis (Valladão et al., 2018). No entanto, a escolha dos canais de comercialização deve ser bem feita e adequada a produção realizada de modo a trazer viabilidade econômica ao empreendimento (Rodrigues et al., 2019), e consequentemente aumentar a sua sustentabilidade no âmbito econômico.

A maior sustentabilidade social é alcançada pelo monocultivo de *A. lacustris*. Os baixos valores obtidos na grande maioria dos indicadores sociais ocorreram porque o estabelecimento dos cultivos LCa e LCaC foram projetados com a mesma quantidade de mão de obra utilizada no monocultivo, mesmo tendo conquistado maior produtividade e rentabilidade. Portanto, essa vantagem do monocultivo parece mais um “artefato” decorrente do método usado do que propriamente uma redução na sustentabilidade social com a introdução de mais espécies no cultivo. Esses resultados nos permitiram inferir que é possível considerar, principalmente no que tange aos cultivos integrados, a contratação de mais trabalhadores, ou o pagamento de maiores salários. Essa contratação, de cerca de 5 trabalhadores em caráter eventual, pode ser necessária durante os eventos de despesca dos viveiros de produção. A despesca deve ocorrer de modo similar à despesca de viveiros de monocultivo, sendo realizada a drenagem parcial do viveiro e coleta dos animais com rede de arrasto. Os animais coletados na rede devem ser separados manualmente, avaliados quanto à massa e comprimento, e embalados com todo cuidado possível evitando o manuseio excessivo. Por outro lado, deve-se pensar se é necessário introduzir adaptações no método de determinação dos indicadores de sustentabilidade social para evitar que a otimização da mão de obra resulte em valores que podem distorcer os benefícios gerados por um sistema para a sociedade.

O índice de sustentabilidade geral refletiu os resultados obtidos nos pilares ambientais e econômicos. Assim, o cultivo integrado LCaC ganha maior destaque entre os demais sistemas analisados, evidenciando maior sustentabilidade. Esses sistemas, no entanto, podem aumentar muito a sustentabilidade social pelo aumento da remuneração dos funcionários, ou redução da jornada de trabalho com o emprego de mais pessoas. Assim, identificar os problemas dos sistemas

de produção é o primeiro passo para iniciar o processo de mudança em direção ao progresso da sustentabilidade.

5. Conclusão

A análise de cada um dos indicadores de sustentabilidade nos permitiu identificar as forças e fraquezas dos cultivos estudados. O monocultivo de *Astyanax lacustris* apresenta obstáculos que não permitiu alcançar bom desempenho nos indicadores de sustentabilidade referente aos pilares ambientais e econômicos, quando comparados com os cultivos integrados com *Macrobrachium amazonicum*, e *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*. Desse modo, a introdução de cultivos integrados, tais como os propostos neste estudo, melhora esses indicadores em direção a maior sustentabilidade ambiental e econômica. Paralelamente a isso, a sustentabilidade social dos sistemas de integração de *A. lacustris* com *M. amazonicum*, e com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* foi apontada como ponto de fraqueza desses sistemas, porque a mesma quantidade de trabalhadores é necessária para uma produção maior de indivíduos. Isso não significa que a introdução dos cultivos integrados reduza o uso de mão de obra. Estudos futuros devem abordar adaptações dos diferentes sistemas para aumentar a sustentabilidade.

Referências

- AOAC - Official Methods of Analysis, 16th ed. AOAC International, Washington, 1995.
- APHA (American Public Health Association). Standard methods for the examination of water and waste water. APHA, Washington, DC, USA, 2017.
- Ahmed, N.; Thompson, S. The blue dimensions of aquaculture: A global synthesis. **Science of the Total Environment**, v. 652, p. 851–861, 2019.
- Bosma, R. H.; Verdegem, M. C. J. Sustainable aquaculture in ponds: Principles, practices and limits. **Livestock Science**, v. 139, n. 1–2, p. 58–68, 2011.
- Boyd, C. E.; D'abramo, L. R.; Glencross, B. D.; Huyben, D. C.; Juarez, L. M.; Lockwood, G. S.; Mcnevin, A. A.; Tacon, A. G.J.; Teletchea, F.; Tomasso, J. R.; Tucker, C. S.; Valenti, W. C. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 51, n. 3, p. 578–633, 2020.
- Chopin, T. Integrated Multi-Trophic Aquaculture. Ancient, Adaptable Concept Focuses On Ecological Integration. **Global Aquaculture Advocate**, v.16, pp. 16–19, 2013.
- Dantas, D. P., Flickinger, D. L., Costa, G. A., Moraes-Valenti, P., Valenti, W. C. Economic effects of production scale, use of agricultural greenhouses, and integration of tropical aquaculture species when farming in a subtropical climate. **Aquaculture International** (Issue 0123456789). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00822-2>, 2022.
- Flickinger, D. L.; Costa, G. A.; Dantas, D. P.; Moraes-Valenti, P.; Valenti, W. C. The budget of nitrogen in the grow-out of the Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum* Heller) and tambaqui (*Colossoma macropomum* Cuvier) farmed in monoculture and in integrated multitrophic aquaculture systems. **Aquaculture Research**, v. 50, n. 11, p. 3444–3461, 2019.
- Fonseca, T.; Costa-Pierce, B. A.; Valenti, W. C. Lambari Aquaculture as a Means for the Sustainable Development of Rural Communities in Brazil. **Reviews in Fisheries Science and Aquaculture**, v. 25, n. 4, p. 316–330, 2017.
- Fonseca, T., Valenti, W. C., Giannetti, B. F., Gonçalves, F. H., Agostinho, F. Environmental Accounting of the Yellow-Tail Lambari Aquaculture: Sustainability of Rural Freshwater Pond Systems. **Sustainability**, v. 14, n. 4. <https://doi.org/10.3390/su14042090>, 2022.
- Gonçalves, F. H., da Silva, N. J. R., Henriques, M. B. Economic analysis of *Deuterodon iguape* cultured in Nile tilapia ponds. **Boletim Do Instituto de Pesca**, v. 41, n. 3, pp. 579–589, 2015.
- Henares, M. N. P.; Medeiros, M. V.; Camargo, A. F. M. Overview of strategies that contribute to the environmental sustainability of pond aquaculture: rearing systems, residue treatment, and environmental assessment tools. **Reviews in Aquaculture**, v. 12, n. 1, p. 453–470, 2020.

- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/ribeirao-preto/panorama>. Acessado em: 07/04/2022.
- IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R., Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. InPress. 2021.
- Kibria, A. S. M.; Haque, M. M. Potentials of integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in freshwater ponds in Bangladesh. **Aquaculture Reports**, v. 11, p. 8–16, 2018.
- Knowler, D., Chopin, T., Martínez-Espíñeira, R., Neori, A., Nobre, A., Noce, A., Reid, G. 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, pp. 1579–1594. <https://doi.org/10.1111/raq.12399>, 2020.
- Marques, H. L. D. A., Moraes-Valenti, P. M. C. Current status and prospects of farming the giant river prawn (*Macrobrachium rosenbergii* (De Man 1879) and the Amazon river prawn *Macrobrachium amazonicum* (Heller 1862)) in Brazil. *Aquaculture Research*, v. 43, n. 7, pp. 984–992. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.03032.x>, 2012.
- Marques, H. L. A.; New, M. B.; Boock, M. V.; Barros, H. P.; Mallasen, M.; Valenti, W. C. Valenti Integrated freshwater prawn farming: State-of-the-art and future potential. **Reviews in Fisheries Science and Aquaculture**, v. 24, n. 3, p. 264–293, 2016.
- Marques, A. M.; Boaratti, A. Z.; Belmudes, D.; Ferreira, J. R. C.; Mantoan, P. V. L.; Moraes-Valenti, P.; Valenti, W. C. Improving the Efficiency of Lambari Production and Diet Assimilation Using Integrated Aquaculture with Benthic Species. **Sustainability**, v. 13, n.18, p.1-10, 2021.
- Matvienko, B.; Sikar, E.; Pinguelli Rosa, L.; Santos, M. A.; Filippo, R.; Cimbliris, A. C. P. Gas release from a reservoir in the filling stage. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, v. 27, pp. 1415-1419, 2000.
- Michelsen O. B. Photometric determination of phosphorus as molybdovanadophosphoric acid. **Analytical Chemistry**, v. 29, pp. 60-62, 1957.
- Rodrigues, C. G., Garcia, B. F., Verdegem, M., Santos, M. R., Amorim, R. V., Valenti, W. C. Integrated culture of Nile tilapia and Amazon river prawn in stagnant ponds, using nutrient-rich water and substrates. **Aquaculture**, v. 503, pp. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.073>, 2019
- Thomas, M.; Pasquet, A.; Aubin, J.; Nahon, S.; Lecocq, T. When more is more: taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. **Biological Reviews**, v. 96, n. 2, p. 767–784, 2020.
- UN. United Nations General Assembly, Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development, United Nations, 1771, 21 outubro 2015,

- A/RES/70/ 1, Treaty Series, 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=111&nr=8496&menu=35>. Acessado em: 29/09/2021
- Valenti, W. C.; Kimpura, J. M.; Preto, B. de L.; Moraes-Valenti, P. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. **Ecological Indicators**, v. 88, p. 402–413, 2018.
- Valenti, W. C.; Barros, H. P.; Moraes-Valenti, P.; Bueno, G. W.; Cavalli, R. O. Aquaculture in Brazil: past, present and future. **Aquaculture Reports**, v. 19, n. December 2020, p. 100611, 2021.
- Valladão, G. M. R.; Gallani, S. U.; Pilarski, F. South American fish for continental aquaculture. **Reviews in Aquaculture**, v. 10, n. 2, p. 351–369, 2018.

APÊNDICE A

Tabela A1. Valores dos indicadores de sustentabilidade ambiental transformados em escala de performance de zero a 1, subíndices de sustentabilidade ambiental de acordo com cada categoria dos indicadores e subíndice geral obtidos para cada um dos sistemas de produção testados. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

Indicadores	Sistemas de Produção		
	LM	LCa	LCaC
Uso de Recursos			
Uso do Espaço	0,44	0,77	1,00
Dependência de Água	0,26	0,79	1,00
Uso de energia	0,43	0,81	1,00
Uso de Nitrogênio	0,48	0,95	1,00
Uso de Fósforo	0,44	0,80	1,00
Uso de Carbono	0,43	0,81	1,00
Proporção de Energia Renovável ¹	0,98	1,00	0,99
Média	0,49	0,85	1,00
Eficiência no Uso de Recursos			
Eficiência no Uso de Energia	0,68	0,78	1,00
Eficiência no Uso de Nitrogênio	0,48	1,00	0,95
Eficiência no Uso de Fósforo	0,70	0,72	1,00
Eficiência no Uso de Carbono	0,59	0,76	1,00
Produção Realmente Utilizada	1,00	1,00	1,00
Média	0,69	0,85	0,99
Liberação de Poluentes - Água			
Potencial de Eutrofização - PENitrogênio	0,14	1,00	0,70
Potencial de Eutrofização - PEFósforo	0,49	0,23	1,00
Potencial de Poluição Orgânica (COT ²)	0,37	0,32	1,00
Potencial de Sedimentação/Assoreamento	1,00	1,00	1,00
Média	0,50	0,64	0,93
Liberação de Poluentes - Sedimento			
Acúmulo de Nitrogênio	0,75	0,81	1,00
Acúmulo de Fósforo	0,66	0,75	1,00
Acúmulo de carbono (COT ²)	0,78	0,83	1,00
Acúmulo de Material Particulado	0,85	0,97	1,00
Média	0,76	0,84	1,00
Liberação de Poluentes - GEE³			
Potencial de Aquecimento Global	1,00	0,61	0,01
Conservação da Diversidade Genética e Biodiversidade			
Risco de espécies cultivadas	1,00	1,00	1,00
Média Geral da Sustentabilidade Ambiental	0,63	0,81	0,94

¹ Entre os itens avaliados (ração, mão de obra, animais povoados e energia elétrica), ração, mão de obra e animais povoados foram considerados como energia renovável.

² COT = Carbono Orgânico Total

³ GEE = Gases de Efeito Estufa.

Tabela A2. Valores dos indicadores de sustentabilidade econômica transformados em escala de performance de zero a 1, subíndices de sustentabilidade econômica de acordo com cada categoria dos indicadores e subíndice geral obtidos para cada um dos sistemas de produção testados. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

Indicadores	Sistemas de Produção		
	LM	LCa	LCaC
Renda Anual	0,19	0,58	1,00
RRle	0,22	0,58	1,00
TIRe	0,35	0,68	1,00
PRCe	0,40	0,73	1,00
VPLe	0,29	0,69	1,00
RBCe	0,23	0,58	1,00
Lucro	0,36	0,72	1,00
Diversidade de Produto	0,33	0,67	1,00
Diversidade de Mercado	0,33	0,67	1,00
Externalidades Negativas	1,00	0,09	0,04
Média Geral de Sustentabilidade Econômica	0,37	0,60	0,90

RRle = relação receita líquida-investimento inicial

TIRe = taxa interna de retorno

PRCe = período de retorno de capital

VPLe = valor presente líquido

RBCe = relação custo-benefício (R\$ por R\$ 1,00 investido)

Tabela A3. Valores dos indicadores de sustentabilidade social transformados em escala de performance de zero a 1, subíndices de sustentabilidade social de acordo com cada categoria dos indicadores e subíndice geral obtidos para cada um dos sistemas de produção testados. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

Indicadores	LM	LCa	LCaC
Desenvolvimento da Economia Local	0,98	0,98	1,00
Uso da mão de obra local	1,00	1,00	1,00
Remuneração do trabalho por unidade de produção	1,00	0,53	0,40
Investimento para criação de emprego direto	1,00	0,86	0,86
Investimento para criação de emprego total	1,00	0,86	0,94
Proporção de autoempregos	1,00	1,00	1,00
Trabalho requerido por unidade de área ocupada	1,00	0,91	0,91
Trabalho requerido por unidade produção	1,00	0,54	0,42
Segurança no trabalho	1,00	1,00	1,00
Custo proporcional ao trabalho	1,00	0,57	0,46
Distribuição de renda	1,00	0,26	0,15
Média Geral da Sustentabilidade Social	1,00	0,77	0,74

Tabela A4. Valores dos subíndices de sustentabilidade ambiental, econômico e social de acordo com cada categoria dos indicadores e índice geral de sustentabilidade obtidos para cada um dos sistemas de produção testados. LM = monocultivo de *Astyanax lacustris*; LCa = cultivo integrado *A. lacustris* e *Macrobrachium amazonicum*; LCaC = cultivo integrado *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus*.

Indicadores	Peso*	Sistemas de Produção		
		LM	LCa	LCaC
Sustentabilidade Ambiental				
Uso de Recursos	7	0,49	0,85	1,00
Eficiência no Uso de Recursos	5	0,69	0,85	0,99
Liberação de Poluentes	9	0,67	0,72	0,86
Conservação da diversidade genética e biodiversidade	1	1,00	1,00	1,00
Subíndice de Sustentabilidade Ambiental		0,63	0,81	0,94
Sustentabilidade Econômica				
Renda Anual		0,19	0,58	1,00
RRle		0,22	0,58	1,00
TIRe		0,35	0,68	1,00
PRCe		0,40	0,73	1,00
VPLe		0,29	0,69	1,00
RBCe		0,23	0,58	1,00
Lucro		0,36	0,72	1,00
Diversidade de Produto		0,33	0,67	1,00
Diversidade de Mercado		0,33	0,67	1,00
Externalidades Negativas		1,00	0,09	0,02
Subíndice de Sustentabilidade Econômica		0,37	0,60	0,90
Sustentabilidade Social				
Desenvolvimento da Economia Local		0,98	0,98	1,00
Uso da mão de obra local		1,00	1,00	1,00
Remuneração do trabalho por unidade de produção		1,00	0,53	0,40
Investimento para criação de emprego direto		1,00	0,86	0,86
Investimento para criação de Empregos Total		1,00	0,86	0,94
Proporção de autoempregos		1,00	1,00	1,00
Trabalho requerido por unidade de área ocupada		1,00	0,91	0,91
Trabalho requerido por unidade produção		1,00	0,54	0,42
Segurança no trabalho		1,00	1,00	1,00
Custo proporcional ao trabalho		1,00	0,57	0,46
Distribuição de renda		1,00	0,26	0,15
Subíndice de Sustentabilidade Social		1,00	0,77	0,74
Índice de Sustentabilidade Geral		0,67	0,73	0,86

* Peso atribuído a cada indicador da sustentabilidade ambiental para cálculo da média aritmética ponderada. Os demais pilares da sustentabilidade foram calculados por meio de média aritmética simples.

RRle = relação receita líquida-investimento inicial

TIRe = taxa interna de retorno

PRCe = período de retorno de capital

VPLe = valor presente líquido

RBCe = relação custo-benefício (R\$ por R\$ 1,00 investido)

Considerações Finais

Pequenas mudanças nos sistemas de produção aquícola podem conduzir o empreendimento a uma prática mais sustentável, no entanto, é de extrema importância a avaliação da eficácia destas implementações nos sistemas de produção. Esta tese teve como principal contribuição a avaliação da viabilidade técnica (Capítulo 1), da viabilidade econômica (Capítulo 2), e da sustentabilidade (Capítulo 3) de estratégias aplicadas ao cultivo de lambari-do-rabo-amarelo com o objetivo de alavancar a sustentabilidade do monocultivo desta espécie. Assim, foi possível entender que a integração do cultivo de *Astyanax lacustris* com o *Macrobrachium amazonicum*, e com *M. amazonicum* e *Prochilodus lineatus* foram estratégias eficientes para aumentar a viabilidade técnica e econômica e a sustentabilidade do cultivo de *A. lacustris*. Esses cultivos integrados possibilitaram que a produtividade total do sistema fosse aumentada, devido ao melhor aproveitamento de recursos autóctones e alóctones disponíveis no viveiro de produção.

Além disso, avaliar diferentes escalas de produção nos permitiu compreender que fazendas de pequeno porte que operam o monocultivo de *A. lacustris*, conforme descrito nesta tese, foram inviáveis economicamente. Aumentar a escala de produção foi uma estratégia que trouxe economia de escala, diluindo os custos de produção entre todas as unidades produzidas, e viabilidade econômica para esses empreendimentos. As adaptações necessárias para a efetivação dos cultivos integrados, em fazendas de pequeno e médio porte, também aumentaram os custos com investimentos e os custos totais de produção, e a viabilidade econômica desses sistemas. Os cultivos integrados foram mais sustentáveis do que o monocultivo de *A. lacustris* em fazendas de médio porte. Esses sistemas integrados possibilitaram que os recursos ambientais e econômicos fossem mais eficientemente empregados, e por manterem a mesma quantidade de trabalhadores do que o monocultivo, possibilitaria melhorar a remuneração dos funcionários ou aumentar o quadro de funcionários. Ao passo que fazendas de médio porte que empregam o monocultivo de *A. lacustris* não utilizaram tão eficientemente recursos ambientais e econômicos. No entanto, mais estudos são necessários para melhor compreender quais são as adequações necessárias para alcançar maior

sustentabilidade, principalmente no âmbito social, em sistemas integrados de produção de *A. lacustris*.