



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL
DOUTORADO EM CIÊNCIA ANIMAL

RENATA BEZERRA GOMES REBOUÇAS

**SUSTENTABILIDADE DO CULTIVO MULTITRÓFICO INTEGRADO DE
TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*) E CAMARÃO BRANCO DO PACÍFICO
(*Penaeus vannamei*)**

MOSSORÓ

2023

RENATA BEZERRA GOMES REBOUÇAS

**SUSTENTABILIDADE DO CULTIVO MULTITRÓFICO INTEGRADO DE
TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*) E CAMARÃO BRANCO DO PACÍFICO
(*Penaeus vannamei*)**

Tese apresentada ao Doutorado em Ciência Animal do Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Ciência Animal.

Linha de Pesquisa: Produção Animal

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Gonzaga da Silva

MOSSORÓ
2023

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

R574s Rebouças, Renata Bezerra Gomes.
 SUSTENTABILIDADE DO CULTIVO MULTITRÓFICO
 INTEGRADO DE TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*) E
 CAMARÃO BRANCO DO PACÍFICO (*Penaeus vannamei*) /
 Renata Bezerra Gomes Rebouças. - 2023.
 117 f. : il.

 Orientador: Gustavo Henrique Gonzaga da Silva
 Henrique Gonzaga da Silva.
 Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
 do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
 Ciência Animal, 2023.

 1. *Colossoma macropomum*. 2. *Penaeus vannamei*.
 3. Indicadores de Sustentabilidade Aquícola. 4.
 Gases de efeito estufa. 5. Taxas de sedimentação.
 I. Henrique Gonzaga da Silva, Gustavo Henrique
 Gonzaga da Silva, orient. II. Título.

RENATA BEZERRA GOMES REBOUÇAS

**SUSTENTABILIDADE DO CULTIVO MULTITRÓFICO INTEGRADO DE
TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*) E CAMARÃO BRANCO DO PACÍFICO
(*Penaeus vannamei*)**

Tese apresentada ao Doutorado em Ciência Animal do Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Ciência Animal.

Linha de Pesquisa: Produção Animal

Defendida em: 18/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Gustavo Henrique Gonzaga da Silva Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente/Orientador

Ambrosio Paula Bessa Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Karina Ribeiro, Prof^{ta}. Dr^a. (UFRN)
Membro Examinador


Dallas Lee Flickinger, Prof. Dr. (Lincoln University of Missouri- USA)
Membro Examinador

Carlos Henrique Araújo de Miranda Gomes, Dr. (UFSC)
Membro Examinador

Aos meus amados filhos, Francisco Neto e Izaura Maria, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, por manter-me de pé quando eu quis cair.

Ao meu amado esposo, Lucas Rebouças, expresso minha profunda gratidão, por todo auxílio durante o processo, apoio e força quando pensei em desistir, além de ter segurado a barra nas minhas crises existenciais.

Às minhas abençoadas crianças, Francisco Neto e Izaura Maria, que sempre souberam me fazer sorrir em meio as tempestades. Vocês foram meu combustível!

Meu eterno agradecimento à minha rede de apoio, minha amada família CHAMBAU. Em especial, agradeço aos meus pais, Ilca e Francisco, a quem tanto amo, socorrendo-me quando precisei ausentar-me e cuidando com carinho das minhas jóias preciosas.

Agradeço ao professor Gustavo Silva, por sua compreensão e orientação ao longo desses anos, especialmente na fase final, com suas correções objetivas que foram de grande valia.

Agradeço ao professor Bessa, pela orientação durante a condução do experimento. Seu conhecimento e sugestões auxiliaram-me nas tomadas de decisão.

Ao técnico Luiz Carlos, pelo auxílio durante a fase de análises laboratoriais.

Minha sincera gratidão à Banca Examinadora, pela disponibilidade em participar dessa fase crucial do meu desenvolvimento profissional e pessoal, contribuindo para o avanço desse trabalho.

Agradeço aos meus amigos que estiveram presentes, oferecendo assistência seja no experimento ou com palavras de apoio. Um agradecimento especial a Samuel, que foi meu braço direito no setor de aquicultura, Paula, amiga para todas as horas, e também a Danyela, Fernando, Camila e Kayque.

À todos, muito OBRIGADA!

“É justo que muito custe o que muito vale.”

Santa Tereza D'Ávila

APRESENTAÇÃO

Este trabalho de Tese é intitulado “**Sustentabilidade do cultivo multitrófico integrado de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão branco do pacífico (*Penaeus vannamei*)**”, e se encontra dividido em quatro capítulos, dos quais três, foram escritos no formato de artigo científico e que foram ou serão submetidos à publicação em revistas específicas, que atendem o critério do Programa de Pós Graduação em Ciência Animal da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, na área de Medicina Veterinária. Os capítulos estão assim divididos:

Capítulo I: Introdução geral – fundamentação teórica da temática a qual constitui os capítulos dos artigos científicos, abordando identificação do problema, hipóteses e objetivos;

Capítulo II: Sustentabilidade econômica e ambiental do cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão branco do pacífico (*Penaeus vannamei*) no semiárido brasileiro. Será submetido ao periódico Aquaculture International - Qualis A1.

Capítulo III: - Fluxos de gases de efeito estufa em Fluxo de gases de efeito estufa em monocultivo e em cultivo multitrófico com peixe (*Colossoma macropomum*) e camarão (*Penaeus vannamei*). Será submetido ao periódico Aquaculture - Qualis A1.

Capítulo IV: - Taxa de sedimentação de material particulado e nutrientes no cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão branco do pacífico (*Penaeus vannamei*) em sistemas aquícolas integrados e monocultivo. Será submetido ao periódico Aquaculture Research – Qualis A1.

Embora os capítulos possam compartilhar de metodologias semelhantes quanto a execução do experimento, destaca-se que a fundamentação teórica, objetivos, discussão e conclusão são diferentes. Na conclusão da Tese, serão apresentadas as considerações finais, destacando os aspectos conclusivos mais relevantes do trabalho e fornecendo sugestões para pesquisas futuras.

RESUMO

SUSTENTABILIDADE DO CULTIVO MULTITRÓFICO INTEGRADO DE TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*) E CAMARÃO BRANCO DO PACÍFICO (*Penaeus vannamei*)

A aquicultura vem crescendo rapidamente e tem potencial de ultrapassar a pesca extrativista nos próximos anos. Embora com inúmeros benefícios sociais e econômicos, o pilar ambiental pode ser comprometido se não houver uma destinação adequada de resíduos e efluentes gerados pela atividade aquícola. Assim, torna-se essencial utilizar sistemas e práticas de cultivo que permitem elevar a produção aquícola de forma sustentável, frente ao aumento da atividade e consumo de pescado. Nesse contexto, temos despontando com os sistemas tradicionais de monocultivo, os sistemas de Aquicultura Multitrófica Integrada (AMTI). Enquanto que os sistemas de monocultivo cultivam apenas uma espécie para a produção, o AMTI combina diferentes espécies e níveis tróficos no mesmo sistema de cultivo, onde uma espécie complementa a outra. Todavia, mensurar a sustentabilidade e potencial de impacto pode variar de acordo com os sistemas e práticas de cultivo. Neste contexto, um instrumento adequado para avaliar a sustentabilidade de um sistema são os conjuntos de indicadores, os quais medem a aquicultura responsável, podendo qualificar, quantificar e mensurar os sistemas de aquicultura. Embora a produção de organismos aquáticos em sistemas AMTI esteja crescendo no Brasil, são poucos os estudos que avaliaram a sustentabilidade desse sistema. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a sustentabilidade do sistema multitrófico integrado em relação ao monocultivo, por meio de um conjunto de indicadores zootécnicos, econômicos e ambientais, tendo como modelo o policultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão branco do Pacífico (*Penaeus vannamei*). Os tambaquis e camarões foram cultivados por 218 dias em tanques de alvenaria numa região semi-árida do Nordeste brasileiro. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e três repetições, totalizando doze unidades experimentais. Foram avaliados quatro sistemas de cultivo: monocultivo de peixe (TC0: 3 peixes.m⁻²) e AMTI com peixe e camarão em três densidades de camarão (TC5: 3 peixes.m⁻² e 5 camarões.m⁻²; TC10: 3 peixes.m⁻² e 10 camarões.m⁻²; TC15: 3 peixes.m⁻² e 15 camarões.m⁻²). Parâmetros de qualidade de água e crescimento foram obtidos durante todo o período. Para avaliar a sustentabilidade econômica e ambiental, foram utilizados 23 indicadores (10 econômicos e 13 ambientais) a fim de representar os aspectos principais do sistema. Os indicadores foram calculados utilizando os dados de produção do experimento realizado e posteriormente procedeu-se para uma simulação de fazendas hipotéticas. Além disso, avaliamos as taxas de sedimentação de nutrientes e material particulado e o fluxo dos gases de efeito estufa (GEE) dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Três coletas (C0, C1 e C2) foram realizadas para quantificar o sedimento e nutrientes gerado nos sistemas de produção e para identificar e quantificar os fluxos ebulitivos e difusivos dos GEE's. Em geral, as variáveis limnológicas qualidade de água mantiveram-se próximos ao ideal para a atividade. Na dimensão ambiental, o sistema TC0 foi o menos sustentável apresentando a menor média entre os índices (0,52), enquanto que o sistema TC15 apresentou a melhor média entre os índices (1,00). Já quesito ambiental, o sistema TC0 foi mais sustentável quando comparado aos demais (0,94). As emissões dos GEE's seguiram padrões semelhantes nos diferentes tratamentos. Houve variações nos fluxos de CH₄, CO₂ e N₂O. O CO₂ teve a maior contribuição em todos os tratamentos, com médias negativas indicando absorção do gás nos dois sistemas de cultivo. O N₂O teve maior contribuição nos tratamentos com maior densidade de camarão, enquanto o

CH₄ apresentou baixos valores de emissão, sendo maior no tratamento com maior densidade de camarão. Já os valores médios da taxa de sedimentação de material particulado e dos nutrientes, não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos ao longo do período de cultivo, exceto para a taxa da amônia e carbono orgânico total que apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos na última coleta. Em análise geral, há sustentabilidade ambiental no monocultivo de tambaqui e cultivo AMTI de tambaqui e camarão. Nossos resultados indicam que os sistemas AMTI demonstraram um maior potencial de emissão de gases em comparação com o monocultivo, especialmente à medida que a densidade de estocagem aumentou. Do mesmo modo, as taxas de sedimentação de nutrientes e material particulado podem ser influenciadas pelo aumento da densidade de cultivo e tempo de estocagem. Outro aspecto relevante que constatamos é que os camarões, como organismos bentônicos, ao revolverem o substrato, podem acelerar na liberação de gases de efeito estufa para a coluna d'água, no entanto, os mesmos não influenciaram no aumento das taxas de sedimentação nos sistemas multitróficos.

Palavras-chave: *Colossoma macropomum*; *Penaeus vannamei*; Indicadores de Sustentabilidade Aquícola; Gases de efeito estufa; Taxas de sedimentação.

ABSTRACT

"SUSTAINABILITY OF INTEGRATED MULTITROPHIC AQUACULTURE OF TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*) AND PACIFIC WHITE SHRIMP (*Penaeus vannamei*)"

Aquaculture has been growing rapidly and has the potential to surpass extractive fishing in the coming years. Despite numerous social and economic benefits, the environmental aspect may be compromised without proper disposal of waste and effluents generated by aquaculture activities. Therefore, it is essential to employ cultivation systems and practices that allow for sustainable aquaculture production, given the increasing activity and fish consumption. In this context, Integrated Multitrophic Aquaculture (IMTA) systems have emerged as alternatives to traditional monoculture. While monoculture systems cultivate only one species for production, IMTA combines different species and trophic levels in the same cultivation system, where one species complements the other. However, assessing sustainability and potential impacts may vary depending on the cultivation systems and practices. In this context, a suitable tool for evaluating the sustainability of a system is indicator sets, which measure responsible aquaculture, allowing for the qualification, quantification, and measurement of aquaculture systems. Although the production of aquatic organisms in IMTA systems is growing in Brazil, few studies have evaluated the sustainability of this system. Therefore, this study aims to assess the sustainability of the integrated multitrophic system in comparison to monoculture, using a set of zootechnical, economic, and environmental indicators, focusing on the polyculture of tambaqui (*Colossoma macropomum*) and Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*). Tambaqui and shrimp were cultivated for 218 days in masonry tanks in a semi-arid region of northeastern Brazil. The experiment followed a completely randomized design, with four treatments and three replicates, totaling twelve experimental units. Four cultivation systems were evaluated: fish monoculture (TC0: 3 fish.m⁻²) and IMTA with fish and shrimp at three shrimp densities (TC5: 3 fish.m⁻² and 5 shrimp.m⁻²; TC10: 3 fish.m⁻² and 10 shrimp.m⁻²; TC15: 3 fish.m⁻² and 15 shrimp.m⁻²). Water quality and growth parameters were assessed throughout the period. To evaluate economic and environmental sustainability, 23 indicators (10 economic and 13 environmental) were used to represent the main aspects of the system. Indicators were calculated using production data from the experiment, followed by a simulation of hypothetical farms. Additionally, we evaluated nutrient and particulate matter sedimentation rates and the greenhouse gas (GHG) fluxes of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O). Three samplings (C0, C1, and C2) were conducted to quantify sediment and nutrients generated in the production systems and to identify and quantify GHG ebullitive and diffusive flows. Overall, limnological water quality variables remained close to ideal for the activity. In the environmental dimension, the TC0 system was the least sustainable, presenting the lowest average among the indices (0.52), while the TC15 system showed the best average among the indices (1.00). In terms of economic sustainability, the TC0 system was more sustainable when compared to the others (0.94). GHG emissions followed similar patterns in different treatments, with variations in CH₄, CO₂, and N₂O fluxes. CO₂ had the highest contribution in all treatments, with negative averages indicating gas absorption in both cultivation systems. N₂O had a higher contribution in treatments with higher shrimp density, while CH₄ showed low emission values, being higher in the treatment with higher shrimp density. The average values of particulate matter and nutrient sedimentation rates did not show significant differences between treatments over the cultivation period, except for ammonia and total organic carbon rates, which showed significant differences between treatments in the last sampling. In general analysis, there is environmental sustainability in the monoculture of tambaqui and the IMTA cultivation of

tambaqui and shrimp. Our results indicate that IMTA systems demonstrated a higher potential for gas emission compared to monoculture, especially as stocking density increased. Similarly, nutrient and particulate matter sedimentation rates may be influenced by increased cultivation density and stocking time. Another relevant aspect we identified is that shrimp, as benthic organisms, by disturbing the substrate, may accelerate the release of greenhouse gases into the water column, although they did not influence the increase in sedimentation rates in multitrophic systems.

Keywords: *Colossoma macropomum*; *Penaeus vannamei*; Sustainable Aquaculture Indicators; Greenhouse Gases; Sedimentation Rates.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo II

Figura 1. Localização da área de estudo mostrando a região de cultivo.	19
Figura 2. Representação esquemática dos sistemas de cultivo em tanques de alvenaria.	20
Figura 3. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros zootécnicos para o <i>C. macropomum</i> em cada tratamento.	25
Figura 4. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros zootécnicos para o <i>P. vannamei</i> em cada tratamento.	26
Figura 5. Percentual de Custo Operacional Total para os sistemas estudados, para produção e <i>C. macropomum</i> e <i>P. vannamei</i> em diferentes tratamentos em fazendas hipotéticas de 1 ha de lâmina d'água.	28
Figura 6. Índice de sustentabilidade econômica (valores relativos de 0 a 1%) para produção e <i>C. macropomum</i> e <i>P. vannamei</i> em diferentes tratamentos em fazendas hipotéticas de 1 ha de lâmina d'água.	30
Figura 7. Análise de componentes principais para os tratamentos nos indicadores econômicos.	31
Figura 8. Análise dos componentes principais dos indicadores de sustentabilidade econômica.	32
Figura 9. Índice de sustentabilidade ambiental (valores relativos de 0 a 1%) para produção e <i>C. macropomum</i> e <i>P. vannamei</i> em diferentes tratamentos em fazendas hipotéticas de 1 ha de lâmina d'água.	34
Figura 10. Análise de componentes principais para os tratamentos nos indicadores ambientais.	35
Figura 11. Análise dos componentes principais dos indicadores de sustentabilidade ambiental.	36

Capítulo III

Figura 1. Localização da área de estudo.	46
Figura 2. Representação esquemática dos sistemas de cultivo em tanques de alvenaria com três réplicas por tratamento.	47
Figura 3. Valores médios e desvios padrão para os gases de efeito estufa (GEE) de emissão ebulitiva mensurados na coleta inicial (C0).	52
Figura 4. Valores médios e desvio padrão dos fluxos ebulitivo de gases de efeito estufa em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para cada tratamento na última coleta (C2).	53
Figura 5. Valores médios e desvio padrão de emissão ebulitiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás metano (CH_4) mensurado em cada tratamento durante a primeira (C0) e a coleta final (C2).	54
Figura 6. Valores médios e desvio padrão de emissão ebulitiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás dióxido de carbono (CO_2) mensurado em cada tratamento durante a primeira (C0) e a coleta final (C2).	54
Figura 7. Valores médios e desvio padrão de emissão ebulitiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás óxido nitroso (N_2O) mensurado em cada tratamento durante a primeira (C0) e a coleta final (C2).	55
Figura 8. Valores médios e desvios padrão para os gases de efeito estufa (GEE) de emissão difusiva mensurados na primeira coleta (C0), na coleta do meio (C1) e na coleta final (C3).	56

Figura 9. Valores médios e desvio padrão de emissão difusiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás metano (CH_4) mensurado em cada tratamento na primeira (C0), segunda (C1) e terceira coleta (C2).	57
Figura 10. Fluxos difusivos diurno, noturno e diário em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás metano (CH_4) mensurado em cada tratamento.	58
Figura 11. Valores médios e desvio padrão de emissão difusiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás dióxido de carbono (CO_2) mensurado em cada tratamento na primeira (C0), segunda (C1) e terceira coleta (C2).	59
Figura 12. Fluxos difusivos diurno, noturno e diário em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás metano (CO_2) mensurado em cada tratamento.	61
Figura 13. Valores médios e desvio padrão de emissão difusiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás óxido nitroso (N_2O) mensurado em cada tratamento na primeira (C0), segunda (C1) e terceira coleta (C2).	62
Figura 14. Fluxos difusivos diurno, noturno e diário em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para óxido nitroso (N_2O) mensurado em cada tratamento.	64
Figura 15. Distribuição quantitativa dos gases produzidos durante o período experimental em todos os tratamentos.	65
Figura 16. Contribuição percentual dos gases obtidos pelos dois métodos ebulitivo e difusivo para todos os tratamentos.	66
Figura 17. Contribuição percentual de todos os gases obtidos.	67

Capítulo IV

Figura 1. Localização da área de estudo.	78
Figura 2. Representação esquemática dos sistemas de cultivo em tanques de alvenaria com três réplicas por tratamento.	79
Figura 3. Valores médios das taxas de sedimentação.	86

LISTA DE TABELAS

Capítulo II

Tabela 1. Lista de indicadores selecionados nas dimensões ambiental e econômica para quantificar os valores de sustentabilidade para cada tratamento.	21
Tabela 2. Lista de insumos utilizados para base de cálculo de valores de sustentabilidade econômica nas fazendas hipotéticas.	22
Tabela 3. Preços médios de comercialização de <i>C. macropomum</i> e <i>P. vannamei</i> praticados no mercado do Rio Grande do Norte no ano de 2022.	23
Tabela 4. Valores médios e desvios-padrão das variáveis limnológicas mensuradas na coluna d'água nos tanques de cultivo em campo e em laboratório nos diferentes tratamentos durante o período experimental.	26
Tabela 5. Valores de produção média (ha.ciclo ⁻¹), produção média (t), preço de venda (US\$), receita bruta total (US\$) e custos (US\$) para a produção e <i>C. macropomum</i> e <i>P. vannamei</i> em diferentes tratamentos no primeiro ano de produção que corresponde a 2021.	27
Tabela 6. Indicadores de sustentabilidade econômica para a produção e <i>C. macropomum</i> e <i>P. vannamei</i> em diferentes tratamentos em fazendas hipotéticas com áreas de 1 ha de espelho d'água cada uma.	29
Tabela 7. Coeficientes resultantes da Análise de Componentes Principais (ACP) dos indicadores de sustentabilidade econômico.	32
Tabela 8. Indicadores de sustentabilidade* ambiental calculados em um hectare para cada tratamento de <i>C. macropomum</i> e <i>P. vannamei</i> , na fase de despesca, nas fazendas hipotéticas.	33
Tabela 9. Coeficientes resultantes da Análise de Componentes Principais (ACP) dos indicadores de sustentabilidade ambiental.	36

Capítulo III

Tabela 1. Caracterização das rações comerciais utilizadas no experimento.	48
Tabela 2. Valores médios e desvios-padrão das variáveis limnológicas mensuradas na coluna d'água nos tanques de cultivo em campo e em laboratório nos diferentes tratamentos durante o período experimental.	48
Tabela 3. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros zootécnicos de peso médio inicial, peso médio final, taxa de sobrevivência, mortalidade, fator de conversão alimentar aparente, ganho em peso médio diário, biomassa inicial, biomassa final e ganho em biomassa para os tambaquis cultivados em cada tratamento.	50
Tabela 4. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de taxa de sobrevivência, mortalidade, peso médio inicial, peso médio final, ganho em peso médio diário, biomassa inicial, biomassa final e ganho em biomassa para os camarões cultivados em cada tratamento.	50

Capítulo IV

Tabela 1. Caracterização das rações comerciais utilizadas no experimento.	80
Tabela 2. Valores médios e desvios-padrão das variáveis limnológicas mensuradas na coluna d'água nos tanques de cultivo nos diferentes tratamentos durante o período experimental.	80

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
APRESENTAÇÃO.....	III
RESUMO	IV
CAPÍTULO I – Fundamentação Teórica	
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
1.1 Sistemas de Aquicultura Multitrófica Integrada (AMTI)	1
1.2 Impactos das Atividades de Aquicultura - Sedimentação de Nutrientes e Gases de efeito Estufa (GEE).....	4
1.3 Indicadores de Sustentabilidade.....	7
2. HIPÓTESE	9
3. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	9
3.1 Geral.....	9
3.2 Específicos	9
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	10
CAPÍTULO II - Sustentabilidade econômica e ambiental do cultivo de tambaqui (<i>Colossoma macropomum</i>) e camarão branco do pacífico (<i>Penaeus vannamei</i>) no semiárido brasileiro	
1. INTRODUÇÃO	18
2.MATERIAL E MÉTODOS	19
3.RESULTADOS	24
4.DISSCUSSÃO	37
5.CONCLUSÃO	40
6.AGRADECIMENTOS	40
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
CAPÍTULO III - Fluxo de gases de efeito estufa em monocultivo e em cultivo multitrófico com peixe (<i>Colossoma macropomum</i>) e camarão (<i>Penaeus vannamei</i>)	
RESUMO	44
1. INTRODUÇÃO	45
2. MATERIAL E MÉTODOS	46
2.1 Delineamento Experimental	47
2.2 Características do Cultivo	47
2.3 Coleta de Gases de Efeito Estufa	51
2.4 Análise de Dados	51
3. RESULTADOS	52
3.1 Fluxos de Gases	52

3.1.3 Fluxos Difusivos	55
3.1.3.1 Fluxos difusivos de metano (CH ₄)	56
3.2 Fluxo total de gases	64
4. DISCUSSÃO	68
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6. AGRADECIMENTOS	71
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
CAPÍTULO IV- Taxa de sedimentação de material particulado e nutrientes no cultivo de tambaqui (<i>Colossoma macropomum</i>) e camarão branco do pacífico (<i>Penaeus vannamei</i>) em sistemas aquícolas integrados e monocultivo.	
1. INTRODUÇÃO	77
2. MATERIAL E MÉTODOS	78
2.2 Delineamento Experimental e Manejo	78
2.2 Coleta de Dados	80
3. RESULTADOS	83
4. DISCUSSÃO	88
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS	94
APÊNDICE	95

CAPÍTULO I – Fundamentação Teórica

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Sistemas de Aquicultura Multitrófica Integrada (AMTI)

A utilização de sistemas e práticas de cultivo que permitem elevar a produção aquícola de forma sustentável, é essencial frente ao aumento da atividade e consumo de pescado. Assim, o setor da aquícola necessita desenvolver tecnologias e práticas inovadoras, responsáveis, sustentáveis e lucrativas (CHOPIN, 2013), a Aquicultura Multitrófica Integrada vem sendo amplamente difundida. A Aquicultura Multitrófica Integrada (AMTI) consiste no cultivo de espécies com diferentes níveis tróficos no mesmo sistema de cultivo, onde uma espécie complementa a outra. De acordo com a FAO (2022), na AMTI, os nutrientes resultantes de rações não consumidas e excretas são eficientemente transformados em alimento para as espécies extrativas, o que não só reduz a liberação de nutrientes no ambiente, mas também aumenta a produtividade global de maneira sustentável. O objetivo do sistema AMTI é promover a sustentabilidade ambiental (uso da biomitigação para melhorar a saúde do ecossistema), rentabilidade e estabilidade (melhores resultados, custos mais baixos, diversificação, redução de riscos e criação de empregos em comunidades rurais e costeiras) e aceitabilidade social (adoção de práticas de gestão eficiente, melhor governança regulatória e valorização de produtos diferenciados e seguros) (MARTINEZ-ESPIÑEIRA *et al.*, 2016).

Nesses sistemas, as partículas orgânicas e nutrientes dissolvidos nas águas residuais podem ser absorvidos e assimilados por espécies de níveis tróficos inferiores, convertidos em energia, alimentos ou fertilizantes (CASALDUERO, 1999; NEORI *et al.*, 2000; TROELL *et al.*, 2003; ZHANG *et al.*, 2009; CHOPIN, 2012; LANDER *et al.*, 2012). Tal abordagem ecossistêmica equilibrada fornece capacidade de biorremediação de nutrientes, além de benefícios recíprocos para os organismos cultivados, diversificação econômica devido se produzir outras culturas e maior rentabilidade por unidade de cultivo para a indústria da aquicultura (CHOPIN *et al.*, 2001), com potencial de impulsionar a eficiência ecológica, aceitação ambiental e beneficiar a sociedade (KLEITOU *et al.*, 2018). Ainda, a diversidade de cultivo, tem o potencial para permitir a seleção de espécies alternativas caso uma espécie se torne inviável em situações de alterações climáticas na região (REID *et al.*, 2019). Além de mitigar a carga de efluentes produzidos, a aquicultura integrada promove uma melhor utilização de água, aproveitamento de nutrientes e produz mais de um produto com a mesma quantidade de água, favorecendo assim, um lucro extra para o produtor.

Em estudo recente Knowler *et al.* (2020), verificaram que a adoção do AMTI aumenta a capacidade de assimilação do cultivo, reduz substancialmente o custo ambiental da aquicultura e que a integração de espécies extrativas, com as operações existentes de monocultivo, podem aumentar os lucros. Na China, Zhang *et al.* (2019) pesquisando sobre fluxos de metano (CH₄) em cultivo integrado (crustáceos e moluscos), observaram que a redução do acúmulo de matéria orgânica nos sedimentos devido a melhor eficiência alimentar e aplicação da aquicultura integrada, provavelmente é eficaz na redução das emissões de CH₄ dos sistemas de aquicultura. No Brasil, estudos vêm sendo realizados com uma variedade de espécies em cultivos integrados e demonstraram a viabilidade destes cultivos (BESSA-JUNIOR *et al.*, 2010; BESSA-JUNIOR *et al.* 2012; HENRY-SILVA *et al.*, 2015; MEDEIROS *et al.*, 2017; FLICKINGER *et al.*, 2019; POLI *et al.*, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2019; DANTAS *et al.* 2020; HENRY-SILVA *et al.*, 2023).

Bessa-Junior *et al.* (2012) verificaram a viabilidade técnica no policultivo de tilápia do Nilo (*O. niloticus*) e do camarão marinho (*L. vannamei*) em água oligohalina. Os autores constataram que uma espécie não interferiu no desenvolvimento da outra e do ponto de vista econômico, o policultivo apresentou melhores indicadores econômicos e de desempenho se comparados ao monocultivo. Henry-Silva *et al.* (2015) em estudo de cultivo multitrófico integrado de tilápia do Nilo e camarão da Amazônia (*Macrobrachium amazonicum*), verificaram que a rentabilidade em relação ao monocultivo não mudou, sendo este cultivo tecnicamente e economicamente viável. Medeiros *et al.* (2017), avaliando o ciclo de vida da produção através da comparação de fatores ambientais de desempenho em monocultivo e policultivo de *C. macropomum* e *M. amazonicum*, verificaram que a produtividade e a taxa de conversão de alimento definiram o sistema de policultivo mais eficiente, demonstrando a vantagem de criar *M. amazonicum* em um sistema de policultivo. Flickinger *et al.* (2019), em estudo com camarão e peixe, verificaram que os sistemas AMTI foram mais eficientes do que as monoculturas para converter o nitrogênio da ração em biomassa. Poli *et al.* (2019) verificaram que a integração de camarão-branco do Pacífico com tilápia em sistema de bioflocos, aumentou a produtividade e melhorou o desempenho ecológico do sistema através do aumento da retenção do nitrogênio e fósforo provenientes da ração do camarão. Rodrigues *et al.* (2019), verificaram viabilidade técnica cultivando tilápia do Nilo e camarão da Amazônia em sistemas integrados com água rica em nutrientes, adicionando substratos. Dantas *et al.* (2020) em estudo do camarão da Amazônia e tambaqui em sistema de cultivo AMTI, verificaram a viabilidade do cultivo na primeira fase de crescimento do tambaqui. Henry-Silva *et al.* (2023) avaliando o policultivo do camarão *P.vannameie* da macroalga *Gracilaria birdiae*

verificaram ausência de crescimento da macroalga e portanto desvantagem no uso da espécie em um sistema integrado multitrófico com *P.vannamei* em alta densidade e condições de alta turbidez da água.

Além do cultivo de peixe e camarão, moluscos e algas também são utilizados nos sistemas AMTI. Kerrigan e Suckling (2018) demonstraram benefícios na integração de bivalves e macroalgas, com aumento da biomassa. Estudos demonstraram a eficiência de bivalves (JONES *et al.*, 2002; RAMOS *et al.*, 2009; LANDER *et al.*, 2012; PITTA *et al.*, 2022; HENRY-SILVA *et al.*, 2023) no tratamento de efluentes de camarão ou peixe. Além disso, alguns autores relataram que o desempenho do crescimento de bivalves pode melhorar em sistemas multitróficos integrados (HANDÅ *et al.*, 2012; LANDER *et al.*, 2012). Em se tratando de economia, as pesquisas sobre sistemas AMTI vem se concentrando em três principais pontos: estudos econômicos, que considerem questões ambientais externalidades; análises financeiras que abordam lucratividade no local; e análises de mercado que visam percepção do público consumidor e da aceitabilidade do sistema, juntamente com os produtos para estimar a propensão a pagar (*willingness to pay* – WTP), no entanto, análises econômicas adicionais, são importantes para demonstrar o verdadeiro valor desse tipo de sistema para a sociedade (KNOWLER *et al.*, 2020).

Ridler *et al.* (2007), comparando práticas de monocultivo AMTI de salmão mexilhões e algas, verificaram que a AMTI resultou em um aumento do valor presente líquido (VPL) e a análise de sensibilidade mostrou que fazendas com essa prática podem aumentar a resiliência e fornecer retornos financeiros ao longo de 10 anos para o salmão. Apesar de diversos resultados positivos, Chopin (2019) considera que a adoção do cultivo em AMTI em escala comercial no Canadá ainda é relativamente lenta devido: demora no reconhecimento de estudos acadêmicos pela indústria, investidores e entidades reguladoras; incerteza relacionada ao desempenho financeiro e ambiental; abordagem de gerenciamento linear de curto prazo das empresas de aquicultura versus uma abordagem circular de longo prazo; aumento da complexidade operacional do AMTI; uma política não conducente e estrutura regulatória; além da pequena contribuição da produção das outras espécies em relação a espécie alvo (salmão). No entanto, o mesmo autor ressalta que a diversificação de culturas poderia proporcionar estabilidade econômica e ser um incentivo para a indústria, fazendo da AMTI uma prática mais atraente futuramente.

É notório que há um interesse crescente no AMTI, especialmente por trazer estratégias que remetem a transformação positiva ao ambiente, no entanto existem limitações nesse tipo de produção devido à complexidade dos sistemas, envolvendo múltiplas espécies, implicando

numa gestão maior de produção e comercialização (FAO, 2022). Além disso, pesa sobre a aquicultura a tarefa de emissão mínima de poluentes devido à crescente preocupação sobre o aumento dos resíduos e efluentes gerados pela atividade, sendo que estes podem impactar o ambiente negativamente se não houver uma destinação adequada.

1.2 Impactos das Atividades de Aquicultura - Sedimentação de Nutrientes e Gases de efeito Estufa (GEE)

A exigência de utilização dos recursos sem trazer prejuízos ao meio ambiente é um dos motivos que fomenta a adoção de sistemas integrados (FAO, 2022). Os compostos nitrogenados, a exemplo de nitratos, nitritos, amônia e fosfatos, são essenciais para o crescimento de organismos aquáticos, porém em concentrações elevadas, podem causar problemas ambientais, como o crescimento excessivo de algas, o que pode levar à eutrofização da água. Esses nutrientes são comumente drenados para o ambiente (PEREIRA *et al.*, 2013; OTTINGER *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2016; BESSA *et al.*, 2022), o que podem gerar prejuízos para os ecossistemas adjacentes. Já no ambiente de cultivo, pode ocorrer o processo de sedimentação de nutrientes, quando partículas em suspensão na água, incluindo nutrientes, sólidos orgânicos e inorgânicos, se acumulam no fundo do tanque.

Logo, o excesso de sedimentos e nutrientes na aquicultura, não só tem impactos negativos na qualidade de água e na produção, mas é uma preocupação ambiental, principalmente quando da devolução desse efluente para o ambiente. Assim, alguns autores já discutiram sobre a sedimentação de nutrientes e material particulado em ambientes aquícolas nos mais diversos sistemas (MOURA *et al.*, 2014; CACHO *et al.*, 2020; BESSA *et al.*, 2021), encontrando características diferentes a depender do ambiente e tipo de cultivo. Pillay (2004) aponta que cerca de 30% da ração ofertada é drenada para a água. Bessa *et al.* (2021), observaram que no cultivo de camarões marinhos, densidades de estocagens elevadas aliado a quantidade de alimentos ofertado, influenciaram as taxas de sedimentação de nutrientes. Cacho *et al.* (2020), verificaram que o aumento nas taxas de sedimentação de nutrientes e material particulado de cultivos em tanques rede, tiveram como principal razão a quantidade de excretas e ração não consumida. Moura *et al.* (2014) relataram que o aumento gradual da ração no sistema de cultivo de peixes em tanque rede podem ter influenciado nas taxas de sedimentação. Portanto, vem sendo cada vez mais discutido, se considerar medidas de manejo adequadas para reduzir os impactos desses nutrientes na atividade aquícola.

Além dos nutrientes e sedimentos, o metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O), os comumente conhecidos como “gases de efeito estufa” (GEE), podem estar presentes na produção aquícola. Os GEE’s podem ocorrer naturalmente em todo o mundo, onde cada um tem o seu papel na natureza e são específicos em formação e impacto a depender da quantidade que são liberados. Tais gases contribuem para o aquecimento global absorvendo e emitindo calor. As mudanças climáticas decorrentes da liberação desses gases e seus impactos, vem sendo estudadas há anos, bem como a contribuição de atividades antrópicas, industriais, agropecuárias e seu papel para o aceleração dessas emissões. Dados da Food and Agriculture Organization (FAO) retratam que a maioria das emissões de GEE’s relacionadas com a produção agrícola ocorreram na Ásia (45%), seguidas pelas Américas (25%), África (15%), Europa (11%) e Oceania (4%), as estimativas destacam que as emissões provenientes da agricultura, silvicultura e pesca chegou próximo ao dobro nos últimos 50 anos, podendo, até 2050, aumentar em 30%, caso não ocorra redução (TUBIELLO *et al.*, 2014).

Em se tratando de atividades agropecuárias, na produção da proteína animal, a liberação de GEE é um dos principais impactos da cadeia. A criação de gado bovino é vista como importante principal emissora por quilograma de carne produzido, sucedida de suínos e aves, sendo que as intensidades de emissão podem ser influenciadas por fatores combinados que dependem da espécie, sistema e região em questão (MACLEOD *et al.*, 2013). A aquicultura, ou cultivo de organismos aquáticos, uma atividade que cresceu 5,7% (FAO, 2022), e como demais atividades produtivas, o setor aquícola tem uma parcela de contribuição com as emissões de GEE’s. O crescimento do setor levanta preocupações climáticas sobre as emissões (MACLEOD *et al.*, 2020), entretanto, as informações associadas às emissões de GEE’s nessa cadeia produtiva ainda são limitadas.

Na cadeia aquícola, os ambientes de cultivo são frequentemente impactados por descargas regulares de elementos como o carbono (C) e nitrogênio (N), que são provenientes de múltiplas fontes, incluindo alimentação, excreção e respiração dos organismos, processos de fotossíntese, fertilização da água e variedade de processos biológicos e bioquímicos relacionados à produção. Logo, esses gases podem ser liberados nas mais diferentes etapas do processo produtivo, ao longo dos cultivos e durante o descarte de efluentes. Atualmente existem várias pesquisas que avaliaram a emissão desses gases no ambiente aquático (YANG *et al.*, 2012; SCHOTT *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2018; AIMÉ *et al.*, 2018; DA SILVA *et al.*, 2018; SOARES e HENRY-SILVA, 2019; ZANG *et al.*, 2020; FENG *et al.*, 2021; YUAN *et al.*, 2021; FANG *et al.*, 2022; TAN *et al.*, 2023; YANG *et al.*, 2023;) fazendo estimativas dessas emissões

em regiões diferentes e nos mais diversos sistemas de cultivo em ambientes de água doce e salgada.

Yang *et al.* (2012) observando as emissões do gás metano em diferentes solos numa represa, verificaram que as flutuações de nível da água foram um dos fatores importantes nas emissões do CH₄. Já Da Silva *et al.* (2018), verificaram como o cultivo intensivo de peixes afetou a liberação de metano em um reservatório tropical da usina hidrelétrica de Furnas, no entanto constataram que essas emissões são mais influenciadas pelas características do reservatório (profundidade e a clorofila-*a*) do que pela produção de peixes.

Yang *et al.* (2018), avaliaram como os fluxos de dióxido de carbono e metano na interface entre a água e a atmosfera em viveiros de camarão em dois estuários subtropicais e como parâmetros de qualidade de água afetaram esses fluxos, constatando como um dos resultados que os fluxos de gases variam consideravelmente entre estuários e entre os estágios de crescimento do camarão. Ainda, Aimé *et al.* (2018), verificaram as emissões de dióxido de carbono ao longo do ciclo de cultivo de camarões em uma fazenda na ilha de Nova Caledônia, Pacífico Sudoeste. Os autores constataram que fatores como uma baixa taxa de conversão de ração e uma taxa adequada de renovação da água limitaram as emissões de CO₂ do viveiro, além disso no processo de secagem do viveiro, o fundo do viveiro também emitiu o gás para a atmosfera. Já Zang *et al.* (2020), observaram fluxos de metano ao longo de três anos em quatro bacias hidrográficas na China, cujos resultados apontaram relação de liberação acordo com o aumento do rio, onde as taxas de emissão por ebulição diminuem exponencialmente, enquanto a difusão diminui linearmente à medida que a ordem do rio aumenta.

Soares e Henry-Silva (2019), analisando as emissões e absorções de GEE's gerados pela produção de camarões marinhos em ambientes de alta salinidade, observaram que cultivos intensivos emitiram menos gases de efeito estufa, sendo que as condições ambientais e de manejo podem interferir no sistema de cultivo, agindo como fonte ou dreno de gases. Assim como Feng *et al.* (2021), que examinaram os efeitos da adição de fósforo e potássio nas emissões de GEE em um sistema de cultivo integrado de arroz e peixes, onde os resultados indicaram que um manejo adequado de nutrientes, pode ser uma estratégia promissora para mitigar as emissões de gases nesses sistemas e aprimorar a eficiência no uso de nutrientes.

Outros estudos como o de Yuan *et al.* (2021), apontaram que viveiros extensivos são uma fonte significativa de emissões de metano, mas emitem quantidades menores de óxido nitroso (N₂O), sendo a ebulição a principal via de transporte para o CH₄. Fang *et al.* (2022), ao estudarem as emissões de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) em lagoas de aquicultura de água por um período de dois anos, verificaram que as emissões variaram de acordo com a

espécie e a densidade de cultivo. Em estudo mais recente, Tan *et al.* (2023) em sua meta-análise sobre as mudanças no uso e cobertura da terra verificaram que os viveiros de aquicultura aumentaram significativamente as emissões de CH₄ em comparação com as áreas úmidas costeiras. Em contrapartida, Yang *et al.* (2023), constataram que a aeração pode ser uma estratégia eficaz para diminuir os impactos climáticos em viveiros de aquicultura, e que o potencial de aquecimento global anual dos GEE's foi cerca de 40% menor em viveiros aerados.

Apesar dos vários estudos que vem sendo desenvolvidos, Schott *et al.* (2016) em revisão de pesquisas com o objetivo de identificar os fatores decisivos para as emissões de gases de efeito estufa em avaliações de ciclo de vida comparativas do gerenciamento de resíduos, verificaram a presença de desafios metodológicos, destacando que a transparência e a consideração das suposições são essenciais para obter resultados precisos.

A redução das emissões de poluentes na aquicultura, contribui para diminuir o aquecimento global. Assim, com a intensificação do setor aquícola prevista para os próximos anos, torna-se indispensável o aprofundamento do conhecimento e monitoramento do potencial de emissão desses gases durante o cultivo de organismos aquáticos. É provável que com as mudanças climáticas constantes e o aquecimento global cada vez mais presente, pesquisas voltadas ao fluxo de gases de efeito estufa sejam realizadas com maior frequência. Portanto, se torna imprescindível que se haja evidências científicas que avaliem os diversos sistemas de forma holística, abordando aspectos zootécnico, econômico, ambiental e social, trazendo assim respostas para os produtores e consumidores, sobre os benefícios de tais sistemas e como podem atuar como um instrumento importante na busca pela sustentabilidade da aquicultura.

1.3 Indicadores de Sustentabilidade

A sustentabilidade pode ser definida como gestão de recursos financeiros, tecnológicos, institucionais, recursos sociais, assegurando a contínua satisfação dos direitos humanos necessidades para as gerações presentes e futuras; considera as necessidades humanas acima de tudo, excluindo outros tipos de vida, a menos que afetem a espécie humana, onde envolve perenidade no tempo, os quais os empreendimentos sustentáveis resistem em todas as gerações humanas (VALENTI *et al.*, 2018). Mundialmente, para a aquicultura, há vários métodos utilizados para medir a sustentabilidade, tais como Análise Emergética, Pegada Ecológica, Análise do Ciclo de Vida, Resiliência e Conjuntos de Indicadores (PULLIN *et al.*, 2007; VALENTI *et al.*, 2010, 2011, 2018; ZAJDBAND *et al.*, 2010; MEDEIROS *et al.*, 2017; GARCIA *et al.*, 2014; HENRY-SILVA *et al.*, 2022). Os indicadores de sustentabilidade,

reúnem uma série de informações que avaliam a sustentabilidade de um sistema aquícola, envolvendo espécies e sistemas de produção diversos.

Os indicadores de sustentabilidade medem a aquicultura responsável, podendo qualificar, quantificar e mensurar os sistemas de aquicultura. Eles refletem um fenômeno ou processo de uma maneira simplificada, medindo atributos específicos de um sistema, sendo uma ferramenta poderosa para reduzir a complexidade destes, podendo ser usados para comparar sistemas diferentes ou a evolução deste ao longo do tempo (VALENTI *et al.*, 2018). Os indicadores podem ser usados individualmente, como parte de um conjunto, ou na forma de índice composto, em que escores de indicadores individuais são combinados em um índice de sustentabilidade agregado (KIMPARA *et al.*, 2012). Assim, podem ser utilizados para a melhoria de processos aquícolas, dando uma visão holística e a possibilidade de análise de partes do sistema produtivo separadamente.

Em se tratando de Brasil, os Indicadores de Sustentabilidade para a Aquicultura no país foram criados de maneira participativa entre instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento, produtores aquícolas e formuladores de políticas públicas, cuja a aplicação da metodologia em diversos sistemas de produção permitiu o estabelecimento da metodologia final, validada em escala comercial, na qual a sustentabilidade foi determinada para diversas espécies de organismos aquáticos do Norte ao Sul do país (GARCIA e KIMPARA, 2018). Moura *et al.* (2016) em estudo sobre a sustentabilidade da tilápia do Nilo cultivadas em reservatórios na região semiárida brasileira, utilizaram 49 indicadores calculados a partir de informações obtidas de questionários e do monitoramento do sistema de produção, os resultados indicaram que o sistema é economicamente viável, gerando lucro e distribuindo renda e no geral, mostrou-se vários aspectos sustentáveis.

À medida que o setor se diversifica e se moderniza, com diferentes estruturas e técnicas de produção, é de grande valia, que sejam realizadas pesquisas que reúnam informações que possibilitem a análise de cada parte do sistema produtivo em separado e que representem os principais sistemas, demonstrando a sua viabilidade econômica, ambiental e social. De modo que a sustentabilidade na aquicultura se torna cada vez relevante, a comunidade científica vem trazendo respostas sobre discussões acerca dos principais pontos sobre a temática. Assim, os resultados dos estudos sobre a aplicação do conjunto de indicadores no setor aquícola, levantam questões que fazem com que órgãos gestores, instituições público/privadas, produtores e demais envolvidos na cadeia, tomem medidas que venham a alinhar-se aos moldes da produção de forma sustentável, produzindo com qualidade, eficiência, porém respeitando o meio ambiente.

2. HIPÓTESE

H0: o cultivo multitrófico integrado de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão branco do Pacífico (*Penaeus vannamei*), em tanques, é sustentável economicamente e ambientalmente, quando comparado com o monocultivo.

3. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

3.1 Geral

Avaliar a sustentabilidade (ambiental e econômica) do cultivo multitrófico integrado do tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão branco do Pacífico (*Penaeus vannamei*) em relação ao monocultivo de tambaqui.

3.2 Específicos

1. Comparar a produtividade aquícola do tambaqui no sistema multitrófico integrado em relação ao monocultivo;
2. Avaliar se o cultivo de tambaqui em sistema multitrófico integrado é mais rentável em relação ao monocultivo;
3. Avaliar se o sistema multitrófico integrado emite menores quantidade de gases do efeito estufa quando comparado com o monocultivo;
4. Verificar se o sistema multitrófico integrado apresenta menor potencial de eutrofização em relação ao monocultivo;
5. Avaliar a quantidade de nutriente e matéria orgânica produzidos pelo cultivo multitrófico em relação ao monocultivo;

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIMÉ, J.; ALLENBACH, M.; BOURGEOIS, C.; LÉOPOLD, A.; JACOTOT, A.; VAN VINH, T.; NHO, N.T.; PATRONA, L.D; MARCHAND, C. Variability of CO₂ emissions during the rearing cycle of a semi-intensive shrimp farm in a mangrove coastal zone (New Caledonia). **Marine pollution bulletin**, v. 129(1), p. 194-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.025>

BESSA JUNIOR, A. P., AZEVEDO, C. M. DA S. B., PONTES, F. S. T., & HENRY-SILVA, G. G. Polyculture of Nile tilapia and shrimp at different stocking densities. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41(7), p. 1561–1569, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000700002>

BESSA-JUNIOR, A.P.; AZEVEDO, C.M.S.B.; HENRY-SILVA, G.G. Sustentabilidade do policultivo de peixes e camarões. **Boletim da Sociedade Brasileira de Limnologia**, v.38, n.2, p.1-6, 2010.

BESSA JUNIOR, A.; FLICKINGER, D.; Henry-Silva, G.G. Sedimentation rates of nutrients and particulate material in pond mariculture of shrimp (*Penaeus vannamei*) carried out with different management strategies. **Aquaculture**, v. 3, p. 736307, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736307>

CACHO, J.C.S.; MOURA, R.S.T.; HENRY-SILVA, G.G. Influence of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fish farming in net cages on the nutrient and particulate matter sedimentation rates in Umari reservoir, Brazilian semi-arid. **Aquaculture Reports**, v. 17, p. 100358, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100358>

CASALDUERO, F. Giménez. Integrated systems: “Environmentally clean” aquaculture. Environmental impact assessment of Mediterranean aquaculture farms. **Zaragoza: CIHEAM**, p. 139-145, 2001.

CHOPIN, T. Aquaculture, Integrated Multi-trophic (IMTA). In: Meyers, R.A. (eds) **Encyclopedia of Sustainability Science and Technology**. Springer, New York, NY. 2012. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_173

CHOPIN, T. A new economic study demonstrates that an Integrated Multi-Trophic Aquaculture operation is more profitable than salmon monoculture. **International Aquafeed**, 22. 14-15, 2019.

CHOPIN, T., BUSCHMANN, A. H., HALLING, C., TROELL, M., KAUTSKY, N., NEORI, A., NEEFUS, C. Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key toward sustainability. **Journal of Phycology**, 37(6), 975-986, 2001.

DA SILVA, M.G.; PACKER, A.P.; SAMPAIO, F.G.; MARANI, L.; MARIANO, E.V.; PAZIANOTTO, R.A.; FERREIRA, W.J.; ALVALÁ, P.C. Impact of intensive fish farming on methane emission in a tropical hydropower reservoir. **Climatic Change**, v.150, p.195-210, 2018.

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**, 516, 734611, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734611>

FANG, X., ZHAO, J., WU, S., YU, K., HUANG, J., DING, Y.; HU, T.; XIAO, S.; L., SHUWEI; ZOU, J. A two-year measurement of methane and nitrous oxide emissions from freshwater aquaculture ponds: Affected by aquaculture species, stocking and water management, **Science of The Total Environment**, v. 813, p. 151863, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151863>.

FAO (Fisheries and Aquaculture Department). The State of World Fisheries and Aquaculture. **Towards Blue Transformation**. Rome, FAO, 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>.

FAO. **Glossary of aquaculture terms**. (2013) Disponível em: <<http://www.fao.org/fi/glossary/aquaculture/default.asp>>. Acesso em: 30 jul. 2019.

FENG, J.; LIU, Y.; LI, F.; ZHOU, X.; XU, C.; FANG, F. Effect of phosphorus and potassium addition on greenhouse gas emissions and nutrient utilization of a rice-fish co-culture system. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 38034-38042, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12064-5>

FLICKINGER, D. L.; COSTA, G. A., P.; DANTAS, D.; 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**, 50(11), 3444-3461, 2019. <https://doi.org/10.1111/are.14304>

GARCIA, F.; KIMPARA, J. **Aquicultura sustentável: Conheça os Indicadores de Sustentabilidade**. Disponível em: < <https://panoramadaaquicultura.com.br/conheca-indicadores-de-sustentabilidade/>>. Acesso em: 07 jan. 2020.

GARCIA, F.; KIMPARA, J.M.; VALENTI, W.C.; AMBROSIO, L.A. Emergy assessment of tilapia cage farming in a hydroelectric reservoir. **Ecological Engineering**, v. 68, p. 72-79, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.076>

HANDÅ, A.; MIN, H.; WANG, X.; BROCH, O. J.; REITAN, K. I.; REINERTSEN, H.; OLSEN, Y. Incorporation of fish feed and growth of blue mussels in close proximity to salmon aquaculture: implications for integrated multi-trophic aquaculture in Norwegian coastal waters. **Aquaculture**, 356, 328-341, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.048>

HENRY-SILVA, G. G.; MAIA, C. S. P.; MOURA, R. S. T.; BESSA JUNIOR, A. P.; VALENTI, W. C. Integrated multi-trophic culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum*) in brackish water. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.67(1), 265-273, 2015. <https://doi.org/10.1590/1678-6788>

HENRY-SILVA, G.G.; CACHO, J.C.S.; MOURA, R.S.T. ; FLICKINGER, D.; VALENTI, W.C. Economic, social, and environmental assessment of farming Nile tilapia in net-cages in a reservoir in hot semi-arid region during an extended drought event. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 52, p. 78768-78779, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20998-1>

HENRY-SILVA, G.G.; ALVES, J.P.; FLICKINGER, D. ; REBOUCAS, R.B.G.; BESSA JUNIOR, A. P. Polyculture of Pacific white shrimp *Penaeus vannamei* (Boone) and red seaweed *Gracilaria birdiae* (Greville) under different densities. **Fishes**, v. 8, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.3390/fishes8010054>

JONES, A. B.; PRESTON, N. P.; DENNISON, W. C. The efficiency and condition of oysters and macroalgae used as biological filters of shrimp pond effluent. **Aquaculture research**, 33(1), 1-19, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1355-557X.2001.00637.x>

KERRIGAN, D.; SUCKLING, C. C. A meta-analysis of integrated multitrophic aquaculture: extractive species growth is most successful within close proximity to open-water fish farms. **Reviews in Aquaculture**, 10(3), 560-572, 2018. <https://doi.org/10.1111/raq.12186>

KIMPARA, J.M.; ZADJBAND, A.D.; VALENTI, W.C. 2012. **Métodos para medir a sustentabilidade na aquicultura**. Documentos / Embrapa Meio-Norte. (71 pp.). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/115655/1/Doc218.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2023.

KLEITOU, P.; KLETOU, D.; DAVID, J. Is Europe ready for integrated multi-trophic aquaculture? A survey on the perspectives of European farmers and scientists with IMTA experience. **Aquaculture**, v. 490, p. 136-148, 2018.

KNOWLER, D.; CHOPIN, T.; MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, 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**, 2020. <https://doi.org/10.1111/raq.12399>

LANDER, T. R.; ROBINSON, S. M.; MACDONALD, B. A.; MARTIN, J. D. Enhanced growth rates and condition index of blue mussels (*Mytilus edulis*) held at integrated multitrophic aquaculture sites in the Bay of Fundy. **Journal of Shellfish Research**, 31(4), 997-1007, 2012. <https://doi.org/10.2983/035.031.0412>

MACLEOD, M. J., HASAN, M. R., ROBB, D. H., & MAMUN-UR-RASHID, M. Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. **Scientific reports**, v. 10(1), p. 11679, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68231-8>

MACLEOD, M.; GERBER, P.; MOTTET, A.; TEMPIO, G.; FALCUCCI, A.; OPIO, C.; VELLINGA, T.; STEINFELD, H. Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains—A global life cycle assessment. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2013. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/i3460e/i3460e.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2019.

MARTINEZ-ESPIÑEIRA, R.; CHOPIN, T.; ROBINSON, S.; NOCE, A.; KNOWLER, D.; YIP, W. A contingent valuation of the biomitigation benefits of integrated multi-trophic aquaculture in Canada. **Aquaculture economics & management**, 20(1), 1-23, 2016. <https://doi.org/10.1080/13657305.2016.1124935>

MEDEIROS, M. V.; AUBIN, J.; CAMARGO, A. F. Life cycle assessment of fish and prawn production: Comparison of monoculture and polyculture freshwater systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 156, 528-537, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.059>

MOURA, R. S. T.; LOPES, Y. V. A.; HENRY-SILVA, G. G. Sedimentação de nutrientes e material particulado sob influência de atividades de piscicultura no semiárido do Rio Grande do Norte. **Química Nova**, v.37, p.1283-1288, 2014.

MOURA, R. S. T.; VALENTI, W. C.; Henry-Silva, G.G. Sustainability of Nile tilapia net-cage culture in a reservoir in a semi-arid region. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 574-582, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.052>

NEORI, Amir; SHPIGEL, Muki; BEN-EZRA, David. A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. **Aquaculture**, v. 186, n. 3-4, p. 279-291, 2000.

OTTINGER, M.; CLAUSS. K.; KUENZER, C. Aquaculture: Relevance, distribution, impacts and spatial assessments - A review. **Ocean & Coastal Management**, v. 119. p. 244 -266, 2016.

PEREIRA, L.A.; VENTURA, R.; PERBICHE-NEVES, G.; SILVA, M.D.; BOEGER, W.; OSTRENSKY, A. Effects of shrimp *Penaeus Vannamei* (Boone, 1931) cage farming on sediment nutrients in a subtropical estuary. **Braz. J. Aquatic Sci. Technol.** v.17, n2.p5-8, 2013.

PILLAY. T.V.R. Aquaculture and the environment. 2 ed. Oxford: Fishing News Books, p.199. 2004.

PITTA, João Pedro Marvila Padilha et al. Desempenho de curto prazo de *Ulva fasciata* produzida em diferentes densidades em Aquicultura multitrófica integrada. **Conjecturas**, v. 22, n. 9, p. 1-17, 2022. <https://doi.org/10.53660/CONJ-1385-AG05>

POLI, M. A.; LEGARDA, E. C.; DE LORENZO, M. A.; MARTINS, M. A.; DO NASCIMENTO VIEIRA, F. Pacific white shrimp and Nile tilapia integrated in a biofloc system under different fish-stocking densities. **Aquaculture**, 498, 83-89, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.08.045>

PULLIN, R.; FROESE, R.; PAULY, D. 2007. Indicators for the sustainability of aquaculture. In: Bert, T.M. (Ed.), **Ecological and Genetic Implications of Aquaculture Activities**. Springer, Dordrecht, Germany, pp. 53–72. Rey-Valette H., Clément O., Aubin, J., Mathé, S., Chia, E., Legendre, M., Caruso, D., Mikolasek, O., Blancheton, J-P., Slembrou. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6148-6_3

RAMOS, R.; VINATEA, L.; SEIFFERT, W.; BELTRAME, E.; SILVA, J. S.; COSTA, R. H. R. D. Treatment of shrimp effluent by sedimentation and oyster filtration using *Crassostrea gigas* and *C. rhizophorae*. **Brazilian Archives of Biology and technology**, 52(3), 775-783, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132009000300030>

REID, G. K.; GURNEY-SMITH, H. J.; FLAHERTY, M.; GARBER, A. F.; FORSTER, I.; BREWER-DALTON, K.; SMITH, C. T. Climate change and aquaculture: considering adaptation potential. **Aquaculture Environment Interactions**, 11, 603-624, 2019. <https://doi.org/10.3354/aei00333>

RIBEIRO, L. F.; EÇA, G. F.; BARROS, F.; HATJE, V. Impacts of shrimp farming cultivation cycles on microbenthic assemblages and chemistry of sediments. **Environmental Pollution**, v. 211, p. 307 - 315, 2016.

RIDLER, N., WOWCHUK, M., ROBINSON, B., BARRINGTON, K., CHOPIN, T., ROBINSON, S.; BOYNE-TRAVIS, S. Integrated multi- trophic aquaculture (IMTA): a potential strategic choice for farmers. **Aquaculture Economics & Management**, 11(1), 99-110, 2007. <https://doi.org/10.1080/13657300701202767>

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**, 503, 111-117, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.073>

SCHOTT, A.B.S.; WENZEL, H.; JANSEN, J.C. Identification of decisive factors for greenhouse gas emissions in comparative life cycle assessments of food waste management e an analytical review. **Journal of Cleaner Production**, v.119, p. 13-24, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.079>.

SOARES, D.C.E.; HENRY-SILVA, G.G. Emission and absorption of greenhouse gases generated from marine shrimp production (*Litopenaeus vannamei*) in high salinity. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 367-376, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.002>

TAN, L.; GE, Z.; ZHOU, X.; LI, S.; LI, X.; TANG, J. Conversion of coastal wetlands, riparian wetlands, and peatlands increases greenhouse gas emissions: A global meta-analysis. **Global Change Biology**, 26(3), 1638-1653, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.14933>

TROELL, M. et al. Integrated mariculture: asking the right questions. **Aquaculture**, v. 226, n. 1-4, p. 69-90, 2003.

TUBIELLO, F.N.; SALVATORE, M.; CÓNDR GOLEC, R.D.; FERRARA, A.; ROSSI, S.; BIANCALANI, R.; FEDERICI, S.; JACOBS, H.; FLAMMINI, A. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. **ESS Working Paper**, n.2(2), p.4-89, 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.4143.4245>

VALENTI, W. C.; KIMPARA, J. M.; PRETO, B. L. Measuring aquaculture sustainability. **World Aquaculture Society Magazine**, v.43, n.3, 2011

VALENTI, W. C.; KIMPARA, J. M.; ZAJDJBAND, A. D. Métodos para medir a sustentabilidade na aquicultura. **Panorama da Aquicultura**, Rio de Janeiro, n. 119, p. 28-33, maio/jun, 2010.

VALENTI, W.C.; KIMPARAB, J.M.; PRETOC, B.L.; MORAES-VALENTI, P. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. **Ecological Indicators**, v.88: 402-413, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.068>

YANG, L.; LU, F.; WANG, X.; DUAN, X.; SONG, W.; SUN, B.; CHEN, S.; ZHANG, Q.; HOU, P.; ZHENG, F.; ZHANG, Y. Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir.

Journal of Geophysical Research: Atmospheres 117, no. D10, 2012.
<https://doi.org/10.1029/2011JD017362>

YANG, P.; TANG, K. W.; YANG, H.; TONG, C.; ZHANG, L.; LAI, D. Y.F.; HONG, Y.; TAN, L.; ZHU, W.; TANG, C. Contrasting effects of aeration on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions from subtropical aquaculture ponds and implications for global warming mitigation. *Journal of Hydrology*, v.617, p.128876, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128876>

YANG, P.; ZHANG, Y.; LAI, D. Y.; TAN, L.; JIN, B.; TONG, C. Fluxes of carbon dioxide and methane across the water–atmosphere interface of aquaculture shrimp ponds in two subtropical estuaries: The effect of temperature, substrate, salinity and nitrate. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 1025-1035, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.102>

YUAN, J.; LIU, D.; XIANG, J.; HE, T.; KANG, H.; DING, W. Methane and nitrous oxide have separated production zones and distinct emission pathways in freshwater aquaculture ponds. *Water Research*, v.190, p.116739, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116739>

ZAJDBAND, A. D.; KIMPARA, J. M.; VALENTI, W. C. **Como medir a sustentabilidade da aquicultura?** In: CONGRESSO SUL DE PRODUÇÃO ANIMAL SUSTENTÁVEL, 1, 2010, Chapecó. Resumos... Chapecó: EPAGRI: EMBRAPA: UNIOESTE, p. 1-5, 2010.

ZHANG, J.; HANSEN, P. K.; FANG, J.; WANG, W.; JIANG, Z. Assessment of the local environmental impact of intensive marine shellfish and seaweed farming—application of the MOM system in the Sungo Bay, China. **Aquaculture**, v. 287, n. 3-4, p. 304-310, 2009.

ZHANG, D.; TIAN, X.; DONG, S.; CHEN, Y.; FENG, J.; HE, R. P.; ZHANG, K. Methane fluxes from typical marine polyculture ponds of swimming crab with kuruma shrimp and short-necked clam in eastern China. **Aquaculture Environment Interactions**, 11, 63-73. 2019.
<https://doi.org/10.3354/aei00295>

ZHANG, L.; XIA, X.; LIU, S.; ZHANG, S.; LI, S.; WANG, J.; WANG, G.; GAO, H.; ZHANG, Z.; WANG, Q.; WEN, W.; LIU, R.; YANG, Z.; STANLEY, E.H.; RAYMOND, P. A. Significant methane ebullition from alpine permafrost rivers on the East Qinghai–Tibet Plateau. **Nature Geoscience**, v. 13(5), p. 349-354, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0571-8>

CAPÍTULO II - Sustentabilidade econômica e ambiental do cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão branco do pacífico (*Penaeus vannamei*) no semiárido brasileiro

**SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL DO CULTIVO DE
TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*) E CAMARÃO BRANCO DO PACÍFICO
(*Penaeus vannamei*) NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

RESUMO

Utilizamos indicadores para avaliar a sustentabilidade econômica e ambiental em monocultivos de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e em cultivos multitróficos integrados (AMTI) de tambaqui e camarão branco do Pacífico (*Penaeus vannamei*) cultivados no semiárido brasileiro. Os indicadores foram calculados utilizando os dados de produção do experimento realizado por 218 dias na região oeste do estado do Rio Grande do Norte, em seguida realizou-se uma simulação de fazendas hipotéticas. O desempenho das espécies e a eficiência ecológica do sistema foram testados. Parâmetros de qualidade de água e crescimento foram obtidos durante todo o período. Foram avaliados quatro sistemas de cultivo: monocultivo de peixe (TC0: 3 peixes.m⁻²) e AMTI com peixe e camarão em três densidades de camarão (TC5: 3 peixes.m⁻² e 5 camarões.m⁻²; TC10: 3 peixes.m⁻² e 10 camarões.m⁻²; TC15: 3 peixes.m⁻² e 15 camarões.m⁻²). Para avaliar a sustentabilidade econômica e ambiental, foram utilizados 23 indicadores (10 econômicos e 13 ambientais) a fim de representar os aspectos principais do sistema. Uma análise de componentes principais (ACP) foi realizada para indicadores econômicos e ambientais. Na dimensão ambiental, o sistema TC0 foi o menos sustentável apresentando a menor média entre os índices (0,52), enquanto que o sistema TC15 apresentou a melhor média entre os índices (1,00). Já quesito ambiental, o sistema TC0 foi mais sustentável quando comparado aos demais (0,94). Em análise geral, há sustentabilidade ambiental no monocultivo de tambaqui e cultivo multitrófico integrado de tambaqui e camarão.

Palavras-chave: Aquicultura Multitrófica Integrada; Indicadores de Sustentabilidade; *Colossoma macropomum*; *Penaeus vannamei*.

1. INTRODUÇÃO

A Aquicultura Multitrófica Integrada (AMTI) consiste no cultivo de espécies com diferentes níveis tróficos no mesmo sistema de cultivo, permitindo uma interação benéfica entre elas. Nesses sistemas, as partículas orgânicas, resíduos, como alimento não consumido, nutrientes dissolvidos nas águas residuais podem ser utilizados e assimilados por espécies de níveis tróficos inferiores (NEORI *et al.*, 2000; TROELL *et al.*, 2003; ZHANG *et al.*, 2009; CHOPIN, 2012; LANDER *et al.*, 2012; SICKANDER e FILGUEIRA, 2022). Esses sistemas são inovadores, porém, apesar dos benefícios, sua complexidade é um desafio para avaliar sua contribuição para uma aquicultura mais responsável e equilibrada. Portanto, é fundamental recorrer aos diversos indicadores, para avaliar a sustentabilidade nesses cultivos.

Os indicadores de sustentabilidade, reúnem uma série de informações envolvendo espécies e sistemas de produção diversos, podendo qualificar, quantificar e mensurar os sistemas aquícolas (MOURA *et al.* 2016). Em se tratando de Brasil, os Indicadores de Sustentabilidade para a Aquicultura foram criados de maneira participativa entre instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento, produtores aquícolas e formuladores de políticas públicas, cuja a aplicação da metodologia em diversos sistemas de produção permitiu o estabelecimento da metodologia final, validada em escala comercial, na qual a sustentabilidade foi determinada para diversas espécies de organismos aquáticos do Norte ao Sul do país (GARCIA e KIMPORA, 2018; VALENTI *et al.*, 2018). Portanto, à medida que o setor se diversifica e se moderniza, com diferentes estruturas e técnicas de produção, é de grande valia, que sejam realizadas pesquisas que reúnam informações que possibilitem a análise de cada parte do sistema produtivo em separado e que representem os principais sistemas, demonstrando a sua viabilidade econômica, ambiental e social.

Os resultados dos estudos sobre a aplicação do conjunto de indicadores no setor aquícola, levantam questões que podem auxiliar órgãos gestores, instituições público/privadas, produtores e demais envolvidos na cadeia, no aprimoramento de leis vigentes para o desenvolvimento de uma produção de forma sustentável, produzindo com qualidade, eficiência, porém respeitando o meio ambiente (ALMEIDA, 2013; VALENTI *et al.*, 2018; VALENTI *et al.*, 2011; DANTAS *et al.*, 2022). Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a sustentabilidade econômica e ambiental do sistema tradicional de monocultivo e do sistema multitrófico integrado (AMTI), por meio de um conjunto de indicadores zootécnicos, econômicos e ambientais, tendo como modelo o monocultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e AMTI de tambaqui e camarão branco do Pacífico (*Penaeus vannamei*).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O experimento para obtenção dos indicadores econômicos e ambientais deste estudo, foi realizado no setor de Aquicultura da Universidade Federal Rural do Semi-Árido localizada em Mossoró, RN, região nordeste do Brasil, Latitude: 5°12'S e Longitude: 37°19' W (Figura 1).



Figura 1. Localização da área de estudo mostrando a região de cultivo. Legenda: Acima, na parte superior esquerda, está o mapa do Brasil com destaque para o estado do Rio Grande do Norte, abaixo, o mapa do estado do Rio Grande do Norte com destaque para a localização da cidade de Mossoró e em destaque a direita, o mapa da cidade de Mossoró.

2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e três réplicas. Um monocultivo de *C. macropomum* e cultivos multitróficos integrados com *C. macropomum* e *P. vannamei*, com diferentes densidades de estocagem, foram avaliados durante 218 dias. Cada unidade experimental possuía área de 7 m² de lâmina d'água, com profundidade

de um metro e um volume de 7 m³. As unidades foram abastecidas com água salina numa concentração de 4 ppt e fertilizadas com uréia (3g.m⁻²). A renovação ou reposição de água foi feita quando detectadas perdas por evaporação.

Os valores dos indicadores foram obtidos por meio de uma simulação para fazendas hipotéticas de 1 hectare (ha) de espelho d'água, localizadas no nordeste brasileiro. Foram avaliados quatro sistemas de cultivo: monocultivo de peixe (TC0: 3 peixes.m⁻²) e AMTI com peixe e camarão em três densidades de camarão (TC5: 3 peixes.m⁻² e 5 camarões.m⁻²; TC10: 3 peixes.m⁻² e 10 camarões.m⁻²; TC15: 3 peixes.m⁻² e 15 camarões.m⁻²) (Figura 2).

Os sistemas basearam-se no emprego do tambaqui (*C. macropomum*), como espécie alvo. Além disto, o camarão branco do pacífico (*P. vannamei*) foi utilizado como espécie extrativa orgânica para os tratamentos em cultivo multitrófico. A ração foi fornecida diariamente para o peixe, com frequência alimentar de acordo com a fase de crescimento (com um percentual de proteína bruta de 36 e 32% para alevinos e juvenis respectivamente) em refeições espaçadas durante o dia. A oxigenação da água nos tanques foi constante, através do uso de sopradores e trocas com a superfície (vento). Adotamos um ciclo produtivo, com duração de 7 meses para todos os sistemas apresentados.

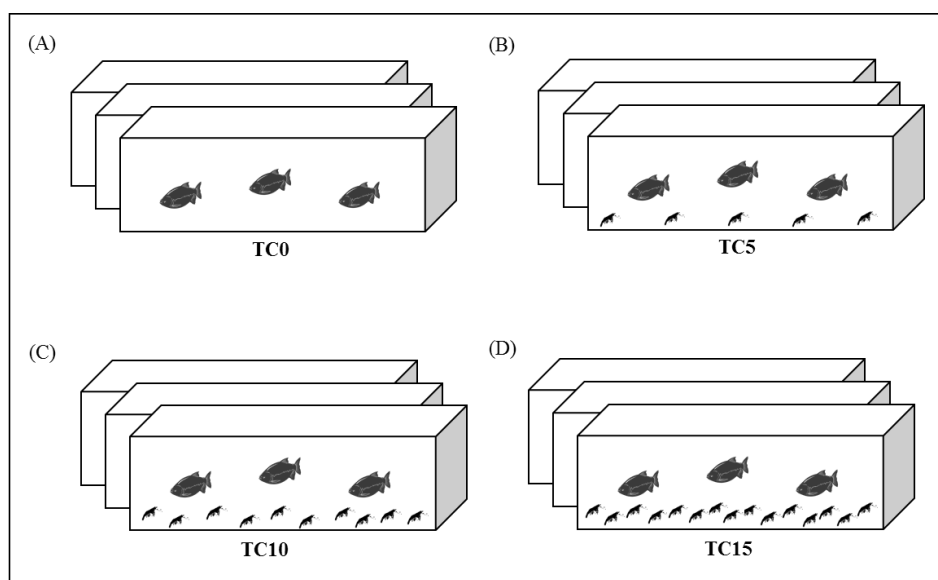


Figura 2. Representação esquemática dos sistemas de cultivo em tanques de alvenaria com três réplicas por tratamento, onde as letras maiúsculas representam: A) TC0 - monocultivo de tambaqui com 3 peixes.m⁻²; B) TC5 - cultivo multitrófico integrado de tambaqui e camarão branco do Pacífico com 3 peixes.m⁻² e 5 camarões.m⁻²; C) TC10 - cultivo multitrófico integrado de tambaqui e camarão branco do Pacífico com 3 peixes.m⁻² e 10 camarões.m⁻²; D) TC15 - cultivo multitrófico integrado de tambaqui e camarão branco do Pacífico com 3 peixes.m⁻² e com 15 camarões.m⁻².

2.3 Indicadores de Sustentabilidade

A sustentabilidade foi medida utilizando os resultados do experimento para quatro fazendas hipotéticas simuladas, nas dimensões econômica e ambiental de acordo com os indicadores propostos por Valenti *et al.* (2018) (Tabela 1). Um total de 23 indicadores (13 ambientais e 10 econômicos) foram utilizados. Durante o experimento foram realizadas biometrias mensais dos organismos cultivados, para determinação dos parâmetros zootécnicos e de produtividade. Também foram obtidos valores de variáveis limnológicas. Os dados zootécnicos e limnológicos auxiliaram na quantificação dos indicadores econômicos e ambientais.

Tabela 1. Lista de indicadores selecionados nas dimensões ambiental e econômica para quantificar os valores de sustentabilidade para cada tratamento.

Indicadores		
	Dimensão Econômica	Dimensão Ambiental
1	Razão receita líquida e investimento inicial	Uso do Espaço (m ² /kg)
2	Taxa Interna de Retorno	Dependência de Água (m ³ /t)
3	Período de retorno do capital	Potencial de Eutrofização (kg de P/t)
4	Razão custo-benefício	Potencial de Poluição Orgânica
5	Valor presente líquido	Poluição por Metais Pesados
6	Lucro líquido	Poluição Química Geral
7	Taxa de risco	Poluição por Hormônios
8	Diversidade de produtos	Acúmulo de Fósforo (P/t)
9	Diversidade de mercados	Acúmulo de Matéria Orgânica (MO/t)
10	Capital investido gerado pela atividade	Potencial de Assoreamento
11		Acúmulo de Material Particulado
12		Risco de Espécies Cultivadas
13		Emissão e absorção de GEE (mg.m ⁻² GEE's.dia ⁻¹)

Dimensão Econômica

Foram realizadas análises econômicas para os sistemas testados com indicadores que previam um período de 5 anos de funcionamento de produção nas fazendas hipotéticas. Todos os insumos e serviços utilizados em cada sistema de produção foram levantados, quantificados e precificados (Tabela 2). Os cálculos foram realizados para a execução de um ciclo de cultivo

anual em um hectare (10.000 m²), baseando que as fazendas hipotéticas já disponham de toda a infraestrutura física (estruturas e equipamentos) e investiram R\$ 100.000,00 cada uma.

Os dados econômicos para os cálculos foram coletados de acordo com preços de insumos associadas às movimentações financeiras pesquisadas no mercado aquícola no estado do Rio Grande do Norte no ano de 2021. As receitas provenientes das vendas dos produtos em cada fazenda hipotética, foi calculada mediante a produtividade dos sistemas observadas através do experimento realizado. Para os resultados, os valores em reais (R\$) foram transformados para dólar (US\$) (1 real correspondeu a 5,03 dólares).

Tabela 2. Lista de insumos utilizados para base de cálculo de valores de sustentabilidade econômica nas fazendas hipotéticas.

Item	Unidade
Alevinos	peixes
Pós-larvas	pl's
Fertilizante	kg
Ração	kg
Mão de obra	Unidade
Energia Elétrica	kw/h
Análises	lab
Assistência técnica	unidade
Combustível	L
Eletricista	unidade

O preço dos peixes e camarões, foi estimado de acordo com os valores praticados pelo mercado em função da gramatura. Portanto, as receitas foram baseadas no preço de venda dos organismos cultivados e estimadas para a produção por hectare para cada um dos tratamentos (Tabela 3). Os indicadores de sustentabilidade econômica foram calculados para um horizonte de cinco anos de produção em cada fazenda, onde foram construídos cenários econômicos com correção de inflação atual e prevista de acordo com o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) atual e previsto, de acordo com o boletim FOCUS.

Propusemos uma despesa de aproximadamente 7 meses (correspondente a um ciclo de produção de juvenis de tambaqui) em todas as fazendas hipotéticas simuladas. A espécie alvo, o *C. macropomum*, seria destinada a venda em mercados de pesque-pague ou para produtores que desejassem continuar o ciclo de engorda em viveiros ou tanques até atingir o peso comercial

de venda. Para o *P. vannamei*, propomos a despesca juntamente com os peixes, onde sua destinação seria para o mercado de iscas-vivas ou mercado público.

Tabela 3. Preços médios de comercialização de *C. macropomum* e *P.vannamei* praticados no mercado do Rio Grande do Norte no ano de 2022.

Espécie	Classificação (g)	Preço (R\$.Kg ⁻¹)
<i>P.vannamei</i>	10-12,5	19 a 21
	12,6-14,5	21,50 a 23,00
	14,6-16,5	23,50 a 25,00
	16,6-18,5	25,50 a 27,00
	18,6-20,5	27,50 a 29,00
	20,6-21,5	29,50 a 31
<i>C. macropomum</i>	400-500	10,00 a 12,00
	500-1000	12,50 a 14,00

Fonte: Comunicação pessoal com produtores.

Dimensão Ambiental

Para calcular os indicadores ambientais, foram realizadas análises da água e do sedimento das unidades experimentais, bem como do fluxo dos gases de efeito estufa dos sistemas de cultivos. As variáveis limnológicas foram quinzenalmente coletadas *in situ*. Oxigênio dissolvido, pH, salinidade, turbidez, sólidos totais dissolvidos, temperatura da água e do ar e pressão atmosférica foram quantificados com auxílio de uma sonda multiparamétrica (HORIBA, U-50, Kyoto, Japan). Mensalmente foram coletadas amostras de água na coluna d'água de todas as unidades experimentais para determinação dos valores de clorofila *a*, amônia, nitrito, nitrato, ortofosfato, fósforo total, carbono total, orgânico e inorgânico.

Câmaras de sedimentação (coletores de tripton) foram instaladas no fundo das unidades experimentais em três períodos distintos, antes, durante e ao final do experimento, visando quantificar as taxas de sedimentação de material particulado e nutrientes. As câmaras foram compostas por três cones de área de 76,97 cm², os quais continham um volume de aproximadamente 1 L de água deionizada por cone (para que não houvesse deposição de

material antes do início da coleta) e permaneciam em pontos específicos dos tanques por até 72h. Os gases do efeito estufa (dióxido de carbono, metano e óxido) foram mensurados por meio das metodologias difusiva e ebulitiva antes, durante e ao fim do experimento, conforme descrito por Soares e Henry-Silva (2019). As amostras para medir a emissão difusiva superficial em $\text{mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ foi estimada utilizando uma câmara de difusão (SANTOS *et al.*, 2005), sendo realizadas no período diurno e noturno. As amostras para medir emissão por ebulição foram estimadas com o auxílio de funis invertidos submersos (SANTOS *et al.*, 2005) durante um período de 24h a 72h, ou conforme a produção de gás.

2.6 Análise dos Dados

Os dados das variáveis limnológicas e zootécnicas foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk's. Posteriormente foram avaliados utilizando uma Análise de Variância (ANOVA), seguido de teste Tukey afim de determinar diferenças significativas entre as médias a 5% de probabilidade.

Analizamos os indicadores econômicos e ambientais para um ciclo de produção os quais foram distribuídos nas dimensões econômica e ambiental utilizando dados relativizados e distribuídos em gráficos polares para cada indicador em cada tratamento. Cada indicador foi convertido em uma escala de desempenho, com pontuações variando de 0 a 1. O sistema que obteve o melhor valor do indicador (mais sustentável quando comparados aos demais) foi pontuado como 1 e assim seguiu-se para os demais de forma proporcional, desta forma, foi possível comparar os indicadores. Por seguinte, calculou-se um subíndice para as dimensões estudadas em cada uma das fazendas hipotéticas. Para determinar a sustentabilidade geral de cada sistema, foi realizada uma média dos sub-índices nas dimensões econômica e ambiental em cada sistema de produção. A Análise dos Componentes Principais (ACP) foi aplicada utilizando o programa STATISTICA, versão 10, com o intuito de ordenar os sistemas de cultivo, a partir das matrizes de correlação das variáveis que compõe os indicadores de sustentabilidade econômica e os indicadores de sustentabilidade ambiental.

3. RESULTADOS

As principais características zootécnicas observadas para os peixes (Figura 3) durante o período experimental foram: peso inicial e final, taxa de sobrevivência, biomassa e fator de

conversão alimentar aparente. Para os camarões (Figura 4), foram: taxa de sobrevivência e peso médio final.

Para os peixes, o peso médio final (g) foi de $462,9 \pm 22,1$ (TC0), $510,1 \pm 66,9$ (TC5), $431,8 \pm 133,3$ (TC10) e $457,9 \pm 41,2$ (TC15); a sobrevivência média (%) foi de $76,2 \pm 29,7$ (TC0), $80,9 \pm 4,8$ (TC5), $63,5 \pm 34,5$ (TC10) e $88,9 \pm 9,9$ (TC15); e o fator de conversão alimentar aparente foi de $1,9 \pm 0,9$ (TC0), $1,5 \pm 0,1$ (TC5), $4,0 \pm 4,4$ (TC10) e $1,5 \pm 0,2$ (TC15). Já para os camarões, a sobrevivência média (%) foi de $9,5 \pm 14,1$ (TC5), $15,2 \pm 17,5$ (TC10) e $29,5 \pm 6,7$ (TC15); e o peso médio final (g) foi de $17,1 \pm 15,3$ (TC5), $21,6 \pm 22,4$ (TC10) e $13,4 \pm 1,5$ (TC15). Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos pela ANOVA e teste de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

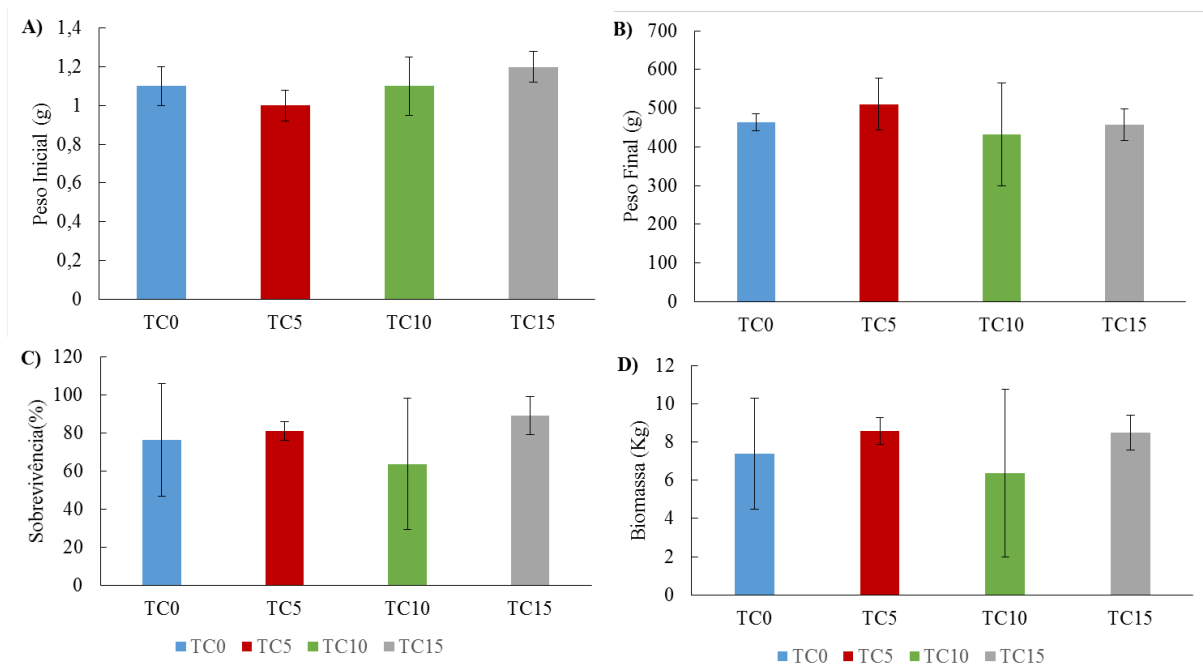


Figura 3. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros zootécnicos de peso médio inicial, peso médio final, sobrevivência e biomassa final para o *C. macropomum* em cada tratamento. Onde: A) peso médio inicial; B) peso médio final; C) taxas de sobrevivência; e D) biomassa final.

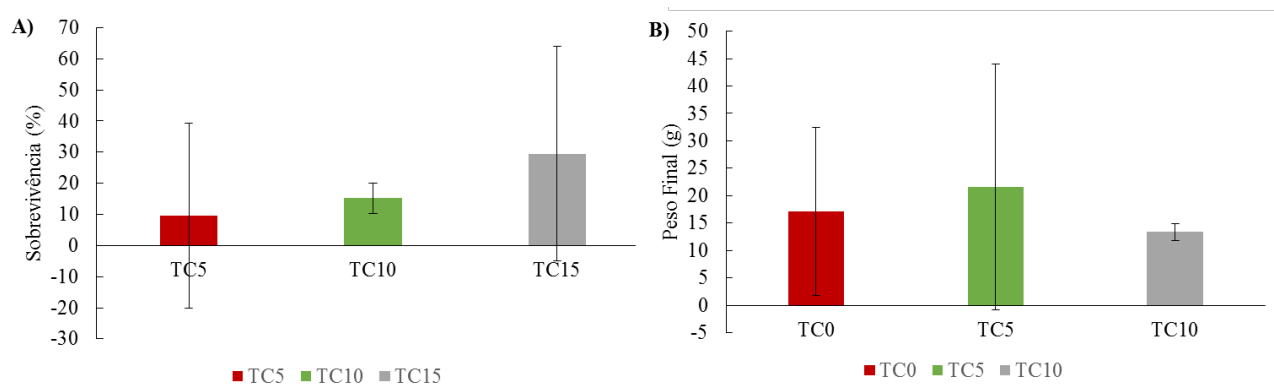


Figura 4. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros zootécnicos para o *P.vannamei* em cada tratamento. Onde: A) taxas de sobrevivência; B) peso médio final.

As principais variáveis limnológicas mensuradas durante o período experimental estão apresentadas na Tabela 4. Algumas variáveis como turbidez, ortofosfato, amônia, nitrito, nitrogênio, matéria orgânica, carbono orgânico total, carbono inorgânico e carbono total apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos pela ANOVA e teste de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

Tabela 4. Valores médios e desvios-padrão das variáveis limnológicas mensuradas na coluna d'água nos tanques de cultivo em campo e em laboratório nos diferentes tratamentos durante o período experimental.

Variáveis	Tratamento			
	TC0	TC5	TC10	TC15
Temperatura (°C)	29,0±1,3	29,1±1,4	29,0±1,3	29,0±1,4
pH	8,38±1,69	8,28±1,18	8,30±1,18	8,35±1,11
Transparência (cm)	29,0±8,3	28,9±6,5	28,4±6,9	29,2±7,3
Condutividade	6,1±1,4	6,0±0,9	5,9±0,9	6,2±1,0 a
Turbidez (NTU)	67,2±43,8 b	130,6±131,6 a	93,8±70,3 ab	119,7±131,1 ab
Oxigênio Dissolvido (mg.L ⁻¹)	8,5±1,8	7,5±1,3	7,6±1,2	7,3±1,2
Sólidos totais dissolvidos (TDS)	3,9±0,9	3,9±0,6	3,8±0,5	3,9±0,6
Salinidade (g.L)	3,2±0,8	3,2±0,6	3,2±0,5	3,3±0,6
Clorofila (µg.L ⁻¹)	115,6±111,2	315,6±296,6	221,2±317,2	173,7±141,0
Fósforo total(µg.L ⁻¹)	32,9±29,9	49,8±20,6	55,5±53,8	72,5±69,7
Ortofosfato (µg.L ⁻¹)	163,1±174,6 b	164,6±187,6 b	151,6±209,6 b	275,4±307,6 a
Amônia (mg.L ⁻¹)	1,2±1,0 b	2,8±1,7 a	1,3±1,1 b	2,0±1,9 a
Nitrato (mg.L ⁻¹)	1,1±1,4	1,8±2,9	1,4±1,8	1,8±2,8

Nitrito (mg.L ⁻¹)	0,19±0,26 a	0,13±0,25 b	0,12±0,23 b	0,17±0,25 a
Nitrogênio total (mg.L ⁻¹)	2,6±0,01 b	4,6±3,97 a	2,7±1,0 b	4,5±5,2 a
Matéria Orgânica (g)	0,04±0,02 a	0,04±0,01 a	0,02±0,01 b	0,05±0,04 a
Carbono Orgânico Total (mg.L ⁻¹)	49,1±17,7 b	86,2±32,7 a	67,5±44,6 b	75,2±9,1 a
Carbono Inorgânico Total (mg.L ⁻¹)	47,3±13,5	57,6±24,2	46,1±23,7	48,3±27,4
Carbono Total (mg.L ⁻¹)	96,7±4,7 c	143,8±8,6 a	113,6±20,9 b	120,1±41,2 b

Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5 três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado. Médias seguidas por letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre os tratamentos, pela ANOVA e teste de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

3.1 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA

Os sistemas produtivos apresentados tiveram viabilidade econômica. Foi construído o cenário econômico observado em cada fazenda (Tabela 5). A produção média (kg. ciclo⁻¹) foi de 10571,4 (TC0), 12436,0 t (TC5), 9512,9 (TC10), 12881,0 (TC15) a qual gerou receita bruta no primeiro ano de US\$ 25220,10 (TC0), US\$ 29988,75 (TC5), US\$ 24200,22 (TC10) e US\$ 32281,77 (TC15). Houve um incremento de 28% na receita bruta do sistema com camarões TC15 em relação ao sistema de monocultivo TC0. Como o investimento foi o mesmo, os custos operacionais em cada fazenda tiveram pouca variação (Figura 5).

Tabela 5. Valores de produção média (ha.ciclo⁻¹), produção média (t), preço de venda (US\$), receita bruta total (US\$) e custos (US\$) para a produção e *C. macropomum* e *P. vannamei* em diferentes tratamentos no primeiro ano de produção que corresponde a 2021.

Tratamento	Produção média (kg)	Preço de Venda (US\$)	Receita Bruta (US\$)	Custos (US\$)
TC0	10571,4	2.39	25220,10	37293,76
TC5	12436,0	7.75	29988,75	37293,82
TC10	9512,9	8.55	24200,22	37293,90
TC15	12881,0	6.96	32281,77	37272,11

Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

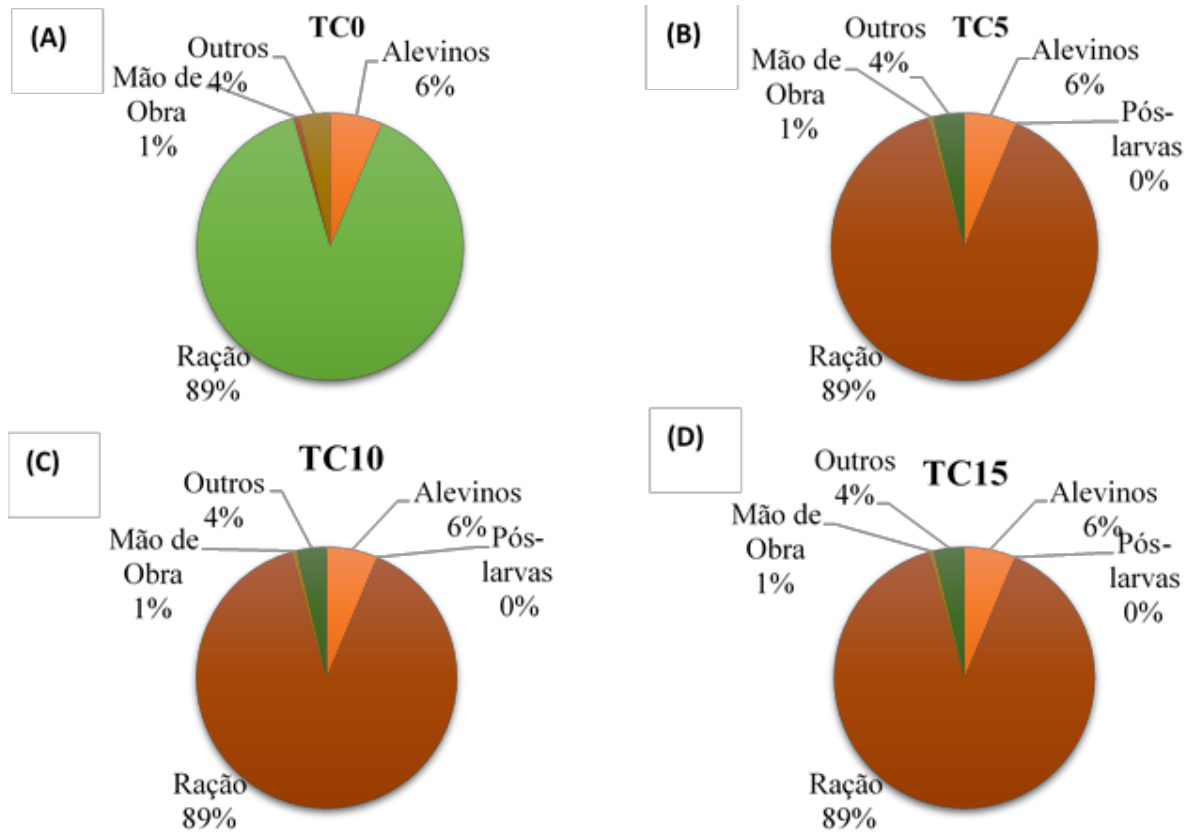


Figura 5. Percentual de Custo Operacional Total para os sistemas estudados, para produção e *C. macropomum* e *P. vannamei* em diferentes tratamentos em fazendas hipotéticas de 1 ha de lâmina d'água, onde (A) TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; (B) TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; (C) TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; e (D) TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado. Outros: fertilizantes, energia elétrica, análise de água e mão de obra eventual.

Economicamente, o sistema produtivo TC15 foi o mais sustentável, apresentando os valores mais elevados para os indicadores como Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor presente líquido (VPL) (Tabela 6) além de sub-índice superior aos demais sistemas analisados (Figura 6). Já sistema TC0 foi o menos sustentável economicamente para a maioria dos indicadores observados, apresentando a menor média de sub-índice para a dimensão econômica (Figura 6).

Tabela 6. Indicadores de sustentabilidade econômica para a produção de *C. macropomum* e *P. vannamei* em diferentes tratamentos em fazendas hipotéticas com áreas de 1 ha de espelho d'água cada uma.

Indicador	Tratamento			
	TC0	TC5	TC10	TC15
Razão receita líquida e investimento inicial (RRI)	1,85	2,20	1,76	2,35
Taxa Interna de Retorno (TIR) (%)	33	75	21	92
Período de retorno do capital (anos)	2,57	1,36	3,33	1,12
Razão custo-benefício (US\$)	0.34	0.63	0.26	0.77
Valor presente líquido (VPL) (US\$)	1,2382.55	39,539.03	5,433.31	51,606.99
Lucro líquido (US\$)	8,940.69	16,912.78	6,900.66	20,455.47
Taxa de risco	75	75	75	75
Diversidade de produtos	2	4	4	4
Diversidade de mercados	2	4	4	4
Capital investido gerado pela atividade	0	0	0	0

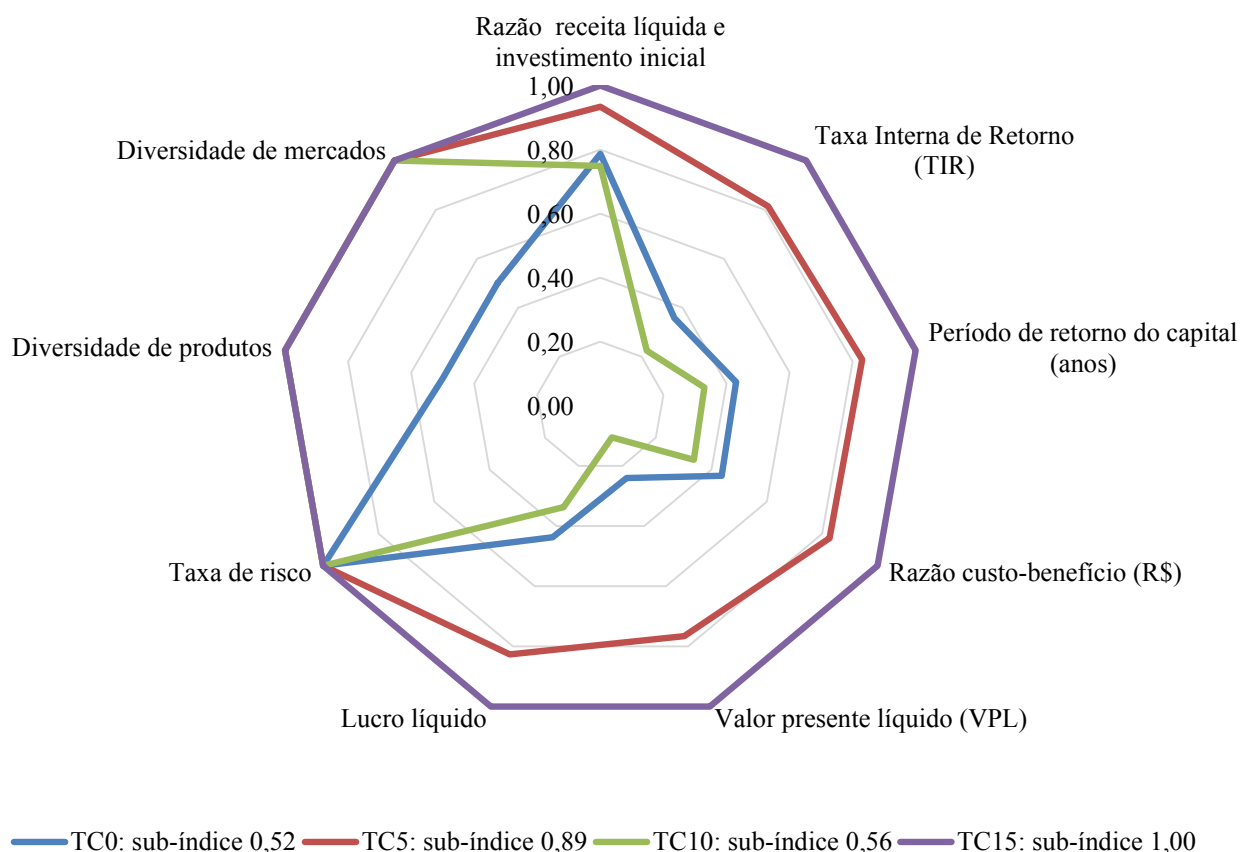


Figura 6. Índice de sustentabilidade econômica (valores relativos de 0 a 1%) para produção e *C. macropomum* e *P. vannamei* em diferentes tratamentos em fazendas hipotéticas de 1 ha de lâmina d'água. Os valores de sub-índice apresentados, correspondem à média entre os indicadores econômicos de cada tratamento, com escala variando de 0 a 1, quanto maior o valor do indicador, maior a sustentabilidade econômica. Onde: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

Para os indicadores de sustentabilidade econômica, a análise de componentes principais (ACP) resumiu 99,78 % da variabilidade total dos dados avaliados em seus dois primeiros eixos (Figuras 7 e 8), sendo que o primeiro eixo explicou 80,61% da variância total encontrada e o segundo eixo 19,17%. As variáveis que apresentaram maior importância para a ordenação dos sistemas de cultivo no eixo 1 foi período de retorno do capital, na qual estava positivamente relacionada ao eixo 1. Já as variáveis: razão receita líquida e investimento inicial, taxa interna de retorno, razão custo-benefício, valor presente líquido, lucro líquido, diversidade de produtos e diversidade de mercados estiveram negativamente relacionadas ao eixo 1. Com relação ao

eixo 2 a variável período de retorno do capital, diversidade de produtos e diversidade de mercados, foram as mais importantes, relacionando positivamente com o eixo 2 (Tabela 7).

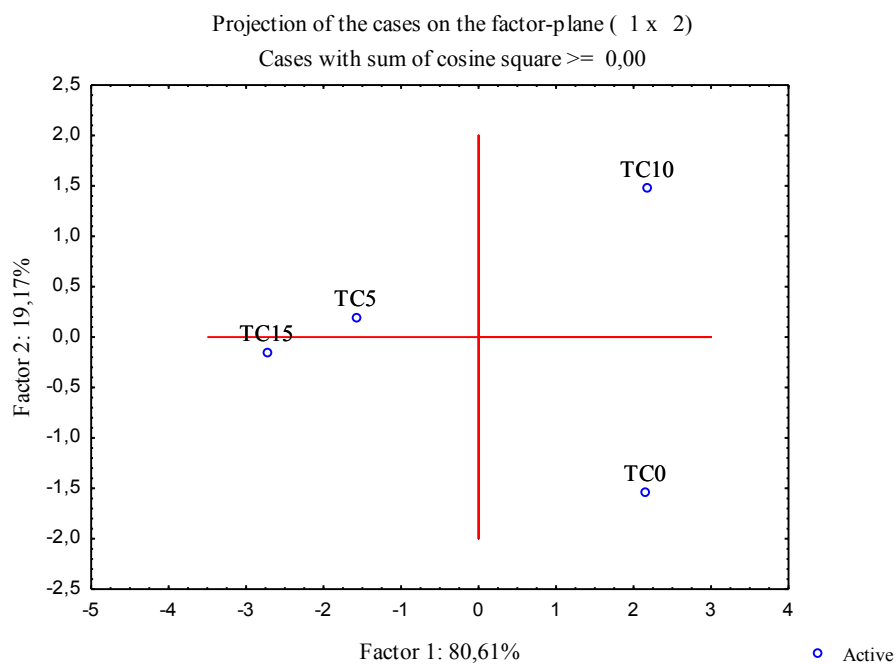


Figura 7. Análise de componentes principais para os tratamentos nos indicadores econômicos. Onde: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

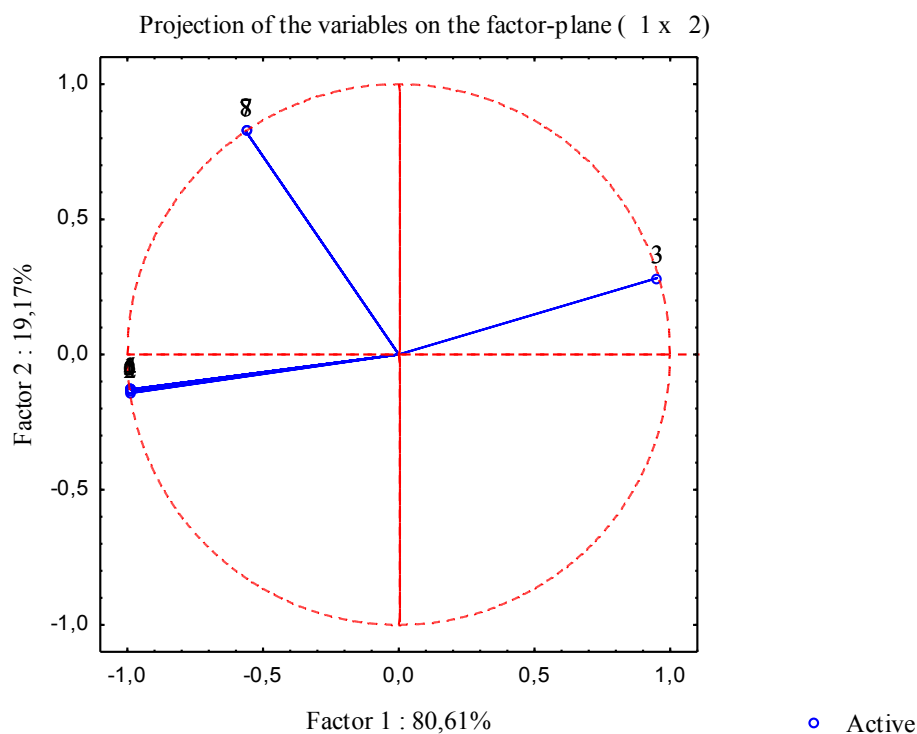


Figura 8. Análise dos componentes principais dos indicadores de sustentabilidade econômica. Onde: 1.Razão receita líquida e investimento inicial; 2.Taxa Interna de Retorno (TIR); 3.Período de retorno do capital (anos); 4.Razão custo-benefício; 5.Valor presente líquido (VPL); 6.Lucro líquido; 7.Diversidade de produtos; 8.Diversidade de mercados.

Tabela 7. Coeficientes resultantes da Análise de Componentes Principais (ACP) dos indicadores de sustentabilidade econômico.

Econômico	Fator 1	Fator 2
Razão receita líquida e investimento inicial	-0,99131	-0,12993
Taxa Interna de Retorno (TIR)	-0,98973	-0,14279
Período de retorno do capital (anos)	0,95212	0,28259
Razão custo-benefício (R\$)	-0,98969	-0,13735
Valor presente líquido (VPL)	-0,99123	-0,12920
Lucro líquido	-0,99123	-0,12920
Diversidade de produtos	-0,56383	0,82583
Diversidade de mercados	-0,56383	0,82583

3.2 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

Ambientalmente, o sistema produtivo TC10 foi o menos sustentável em todas as categorias, apresentando os maiores valores potencial de poluição orgânica, acúmulo de fósforo e matéria orgânica (Tabela 8). Já o sistema TC0 apresentou maior subíndice (Figura 9), destacando-se menor potencial de eutrofização e maior absorção de gases de efeito estufa.

Tabela 8. Indicadores de sustentabilidade* ambiental calculados em um hectare para cada tratamento de *C. macropomum* e *P.vannamei*, na fase de despesca, nas fazendas hipotéticas.

Indicador	Tratamento			
	TC0	TC5	TC10	TC15
Uso do Espaço (m ² /kg)	0,95	0,80	1,05	0,78
Dependência de Água (m ³ /t)	1135,13	964,94	1261,45	931,60
Potencial de Eutrofização (kg de P/t)	7,76	10,98	12,99	11,51
Potencial de Poluição Orgânica	0,28	0,28	0,33	0,22
Potencial de Assoreamento	0,00	0,00	0,00	0,00
Poluição Química Geral	0,00	0,00	0,00	0,00
Poluição por Hormônios	0,00	0,00	0,00	0,00
Poluição por Metais Pesados	0,00	0,00	0,00	0,00
Acúmulo de Fósforo (P/t)	3,12	4,05	5,89	5,67
Acúmulo de Matéria Orgânica (MO/t)	28,79	28,38	28,04	21,97
Acúmulo de Material Particulado (MP/t)	25,27	27,26	34,61	37,55
Risco de Espécies Cultivadas	4,00	4,00	4,00	4,00
Emissão e absorção de GEE's (mg.m ⁻² GEE.dia ⁻¹)	-13931,19	3741,56	-9471,55	3109,07

Legenda: *Indicador estimado segundo Valenti *et al.* (2018). Onde:TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10:

três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

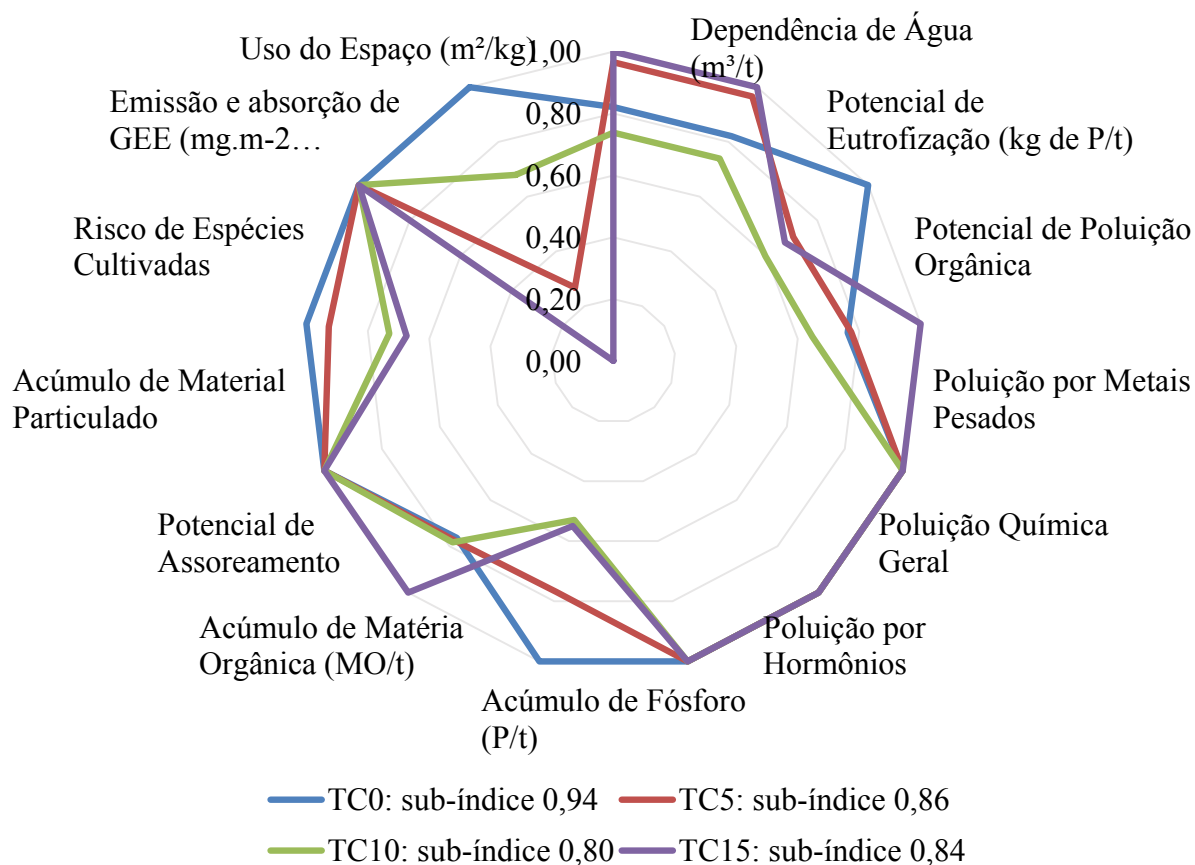


Figura 9. Índice de sustentabilidade ambiental (valores relativos de 0 a 1%) para produção e *C. macropomum* e *P. vannamei* em diferentes tratamentos em fazendas hipotéticas de 1 ha de lâmina d'água. Os valores de sub-índice apresentados, correspondem à média entre os indicadores ambientais de cada tratamento, com escala variando de 0 a 1, quanto maior o valor do indicador, maior a sustentabilidade ambiental. Onde: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

Para os indicadores de sustentabilidade ambiental, a análise de componentes principais (ACP) resumiu 89,93% da variabilidade total dos dados avaliados em seus dois primeiros eixos (Figuras 10 e 11), sendo que o primeiro eixo explicou 54,03% da variância total encontrada e o segundo eixo 35,9%. As variáveis que apresentaram maior importância para a ordenação dos sistemas de cultivo no eixo 1 foram: uso do espaço, dependência de água, potencial de poluição

orgânica e acúmulo de matéria orgânica nas quais estavam positivamente relacionadas ao eixo 1. Já as variáveis: potencial de eutrofização, acúmulo de fósforo, acúmulo de material particulado e emissão e absorção de GEE estiveram negativamente relacionadas ao eixo 1. Com relação ao eixo 2 as variáveis acúmulo de matéria orgânica e emissão e absorção de GEE, foram as mais importantes, relacionando positivamente com o eixo 2 (Tabela 9).

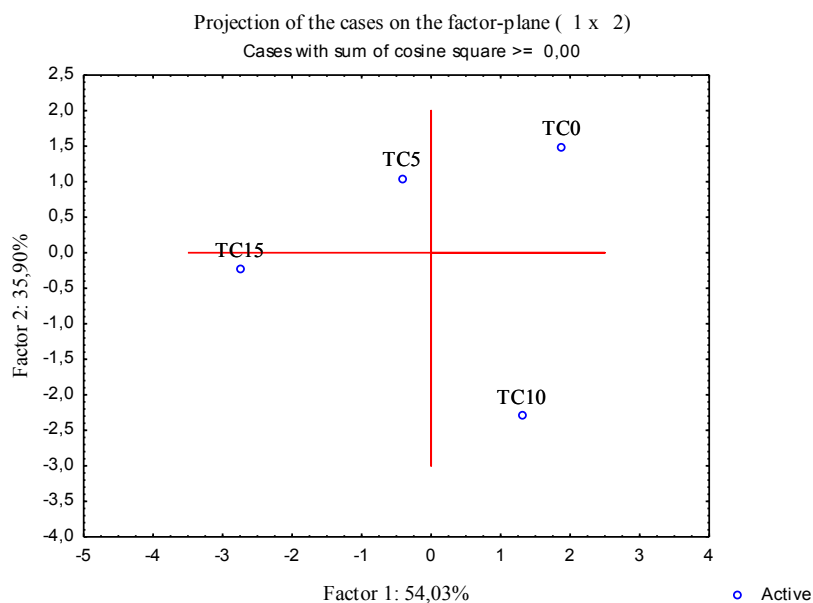


Figura 10. Análise de componentes principais para os tratamentos nos indicadores ambientais. Onde: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

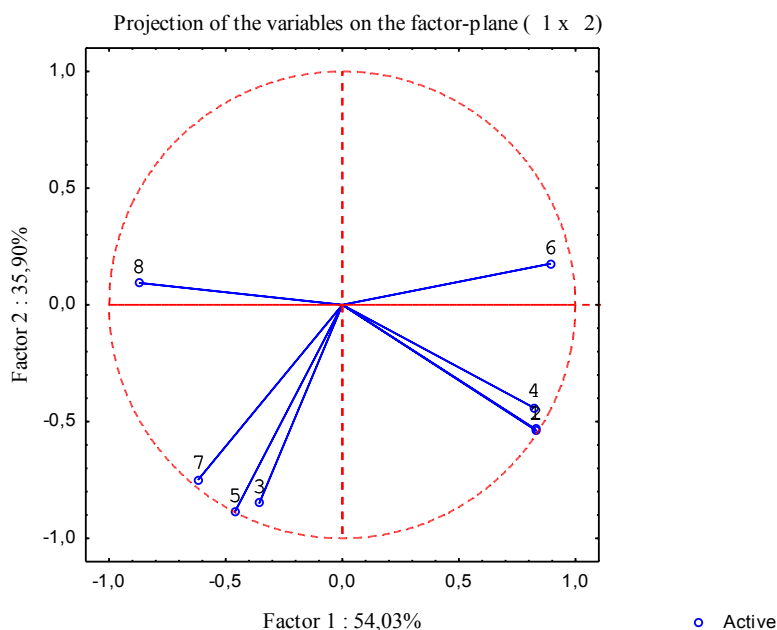


Figura 11. Análise dos componentes principais dos indicadores de sustentabilidade ambiental. Onde: 1.Uso do Espaço (m^2/kg); 2.Dependência de Água (m^3/t); 3.Potencial de Eutrofização (kg de P/t); 4.Potencial de Poluição Orgânica; 5.Acúmulo de Fósforo (P/t); 6.Acúmulo de Matéria Orgânica (MO/t); 7.Acúmulo de Material Particulado; 8. Emissão e absorção de GEE ($\text{mg.m-2 GEE's.dia-1}$).

Tabela 9. Coeficientes resultantes da Análise de Componentes Principais (ACP) dos indicadores de sustentabilidade ambiental.

Ambiental	Fator 1	Fator 2
1 Uso do Espaço (m^2/kg)	0,827395	-0,531877
2 Dependência de Água (m^3/t)	0,829980	-0,537221
3 Potencial de Eutrofização (kg de P/t)	-0,355331	-0,848648
4 Potencial de Poluição Orgânica	0,820175	-0,439785
5 Acúmulo de Fósforo (P/t)	-0,460818	-0,887343
6 Acúmulo de Matéria Orgânica (MO/t)	0,891787	0,176308
7 Acúmulo de Material Particulado	-0,616774	-0,747789
8 Emissão e absorção de GEE ($\text{mg.m-2 GEE's.dia-1}$)	-0,872923	0,094219

4. DISCUSSÃO

Todos os sistemas de cultivo analisados demonstraram-se atrativos economicamente com base nos indicadores utilizados. Uma vez que as fazendas hipotéticas já possuíam estrutura física, os custos totais foram semelhantes. Em todos os tratamentos observou-se uma Taxa Interna de Retorno (TIR) maior que a taxa de desconto, o que indica uma maior atratividade do projeto. Assim, o tratamento TC15, que obteve o maior valor de TIR (95%), pode ser considerado como uma oportunidade lucrativa do ponto de vista econômico. Os valores médios da TIR encontrados em nosso trabalho para os cultivos AMTI TC5 e TC15 foram superiores aos encontrados por Dantas *et al.* (2022), o qual observaram TIR de 66,3% na produção de camarão e tambaqui soltos em viveiros de terra. Provavelmente esses valores mais elevados, tenham sido decorrentes de aspectos de comercialização do produto, como preço e diversidade, variando conforme a região e o mercado consumidor. A fazenda que apresentava o monocultivo, tratamento TC0, apresentou uma baixa diversidade de produtos em relação as demais, isso deve-se ao fato desta ter somente uma espécie para comercialização, sendo assim, dois tipos de produtos disponíveis para comercialização. Ao analisarmos o Valor presente Líquido (VPL), constatamos que todos os tratamentos apresentaram valores positivos, com maiores valores em TC15 e TC5, o que sugere que há adição de capital ao investimento e consequentemente ganhos para os empreendimentos.

Uma maior disparidade econômica foi observada em TC10. Isso provavelmente foi influenciado pela menor sobrevivência dos organismos cultivados nesses tratamentos se comparado aos demais, especialmente para os camarões. Para os camarões, identificamos uma taxa de sobrevivência relativamente reduzida em todos os tratamentos, com a mais alta observada no tratamento TC15. Nesse tratamento, a densidade de animais por metro quadrado era maior. Santos *et al.* (2019) observaram em estudo de policultivo entre tambaqui e camarão-da-amazônia uma significativa mortalidade e baixo crescimento para o camarão, sugerindo que o cultivo no mesmo tanque é viável se houver uso de estrutura como abrigo. Outra situação, pode ser explicada pelo fato de que a despesca dos camarões foi realizada apenas no final do ciclo de produção, o que provavelmente resultou em perdas mais substanciais de organismos. Além disso, a presença de algum fator estressor ambiental no ambiente de cultivo pode inferir nos parâmetros de produtividade. Bessa Júnior e Henry Silva (2018) constataram resultados mais favoráveis em termos de sobrevivência, produção de biomassa e fator de conversão alimentar aparente nos cultivos sem a ocorrência da mancha branca, o que resultou em redução nos custos de produção e aumento nas receitas.

Consequentemente, um maior período de cultivo, pode fazer com que o animal fique mais suscetível a ter contato com o vírus. Segundo Da Silveira *et al.* (2023), a despesca parcial é uma estratégia eficaz para melhorar os resultados de produção e a redução da biomassa ajuda a manter níveis ótimos de parâmetros de qualidade da água. Assim, para uma maior sobrevivência, sugerimos que nesses sistemas, a despesca de camarões seja realizada na metade do ciclo produtivo dos peixes, entretanto, deve-se prover estratégias de manejo para que a espécie alvo não seja prejudicada, além de pesar se os custos operacionais não superam os custos para a manutenção da espécie até o final.

O período de retorno do capital (PRC) foi positivo em todos os tratamentos, sendo mais curto no TC15 (1,12 anos). Contudo, é relevante salientar que em nosso estudo não foram incorporados os custos relacionados à infraestrutura e aos equipamentos, além de vislumbrarmos um horizonte de cinco anos de projeto para cada fazenda hipotética. Consequentemente, ao considerar esses elementos, é possível que o PRC seja mais amplo. Diante disso, para investimentos que partem do zero, desde a construção das estruturas até a despesca, é recomendável elaborar cenários econômicos que abranjam um horizonte de empreendimento mais amplo. Embora em nosso estudo tenhamos respostas econômicas satisfatórias, precisamos olhar outros horizontes aquícolas. É necessário adaptar os indicadores às particularidades de cada sistema e contextualização (VALENTI *et al.*, 2018), já que a sustentabilidade econômica pode variar de acordo com aspectos únicos de cada ambiente produtivo.

A maioria dos indicadores ambientais dos sistemas foi semelhante, destacando-se o TC0 o tratamento que apresentou maior média de subíndice, demonstrando que o tratamento apresentou um desempenho ambiental superior em comparação aos demais, podendo este ser utilizado como referência para otimização da sustentabilidade ambiental. No entanto, é importante observar que, ao analisarmos os indicadores relacionados ao uso de espaço e volume de água no cultivo, notamos que o tratamento TC15 se destacou ao apresentar valores mais baixos, demonstrando que uma maior densidade de cultivo de camarão pode ser mais adequada para uma melhor sustentabilidade nesses parâmetros. Essa observação aponta para a relevância da densidade de cultivo como um fator crucial a ser considerado ao avaliar práticas de cultivo de camarão. Assim, uma densidade de cultivo mais elevada pode ser benéfica não apenas do ponto de vista econômico, mas também em termos de otimização do uso de recursos, como espaço e água, contribuindo para a sustentabilidade global do sistema. Dantas *et al.* (2022) observaram que produtividades elevadas podem ser mais sustentáveis uma vez que otimizam a utilização do espaço, da água e de outros

recursos, além de terem o potencial de gerar maior rentabilidade. Castellani e Abimorad (2012) reforçam que os sistemas integrados podem ser uma alternativa para otimização da produção aquícola e a sustentabilidade onde são desenvolvidos. Marques *et al.* (2016) destacam ainda que tais formas de cultivo podem aprimorar a utilização dos recursos naturais, tais como espaço, água e nutrientes, resultando em redução do consumo de dietas comerciais e um aumento significativo nos lucros.

Os principais fatores que podem ter influenciado a sustentabilidade ambiental dos tratamentos aqui analisados foram o potencial de eutrofização, acúmulo de fósforo e emissão de gases de efeito estufa. O indicador de emissão e absorção de gases de efeito estufa desempenhou um papel importante para mensurar a sustentabilidade ambiental. Boyd *et al.* (2010) observa que viveiros de aquicultura têm a capacidade de atuar como sumidouros para esses gases. Assim, os valores negativos apresentados na medição de gases de efeito estufa, podem indicar um potencial de absorção nos cultivos analisados.

Os sistemas de cultivos integrados, embora muito complexos, otimizam o uso dos recursos naturais, infraestrutura e mão de obra, contribuindo para o aumento da sustentabilidade do ponto de vista ambiental e econômico (VALENTI, 2002). Modificações nos cultivos com foco na aquicultura responsável, objetivando mitigar os impactos ambientais da aquicultura já foram recomendadas por várias organizações (BOYD, 2003; BOYD *et al.*, 2007). Fialho *et al.* (2021) avaliando a sustentabilidade ambiental de fazendas de cultivo de tilápia do Nilo em tanques-rede verificaram que o tamanho da fazenda não afeta a sustentabilidade, sendo outros fatores como ração, manejo e temperatura mais cruciais. Reforçamos que a manutenção de boas práticas de manejo de produção, uma melhor gestão da água e efluentes, como arrazoamento adequado e balanceado, controle de qualidade de água, podem conduzir a resultados satisfatórios de baixa emissão de poluentes nesses sistemas.

Para o grupo específico de espécies analisadas (*C. macropomum* e *P. vannamei*), os sistemas de cultivo integrados de maior densidade contribuíram para uma maior sustentabilidade econômica, indicando que uma maior densidade de cultivo de camarão pode ser uma escolha apropriada. Por outro lado, o sistema de monocultivo apresentou benefícios ambientais específicos, como menor potencial de eutrofização e uma maior capacidade de absorção de gases de efeito estufa.

5. CONCLUSÃO

O estudo demonstrou sustentabilidade econômica, com retorno rápido do capital investido, tanto no monocultivo de tabaqui quanto no cultivo multitrófico integrado de tabaqui e camarão, com maiores valores de índices no cultivo multitrófico integrado de maior densidade. Foi constatada sustentabilidade ambiental no monocultivo de tabaqui e os cultivos AMTI apresentaram maior potencial de emissão de gases em relação ao monocultivo, à medida que densidade de cultivo aumentava.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R., (dissertação). Indicadores de sustentabilidade do cultivo de Tilápiado-nilo (*Oreochromis niloticus*) em tanques-rede em um reservatório tropical. **Universidade Estadual Paulista**, Jaboticabal, 2013

BESSA JUNIOR, A.; Henry-Silva, G.G. Avaliação zootécnica e econômica da criação de camarão marinho (*Penaeus vannamei*) em diferentes estratégias de manejo e densidades. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia (Online)**, v. 70, p. 1887-1898, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-10202>

BOYD, C.E. Guidelines for aquaculture effluents management at the farm level. **Aquaculture**, v.226, p.101-112, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00471-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00471-X)

BOYD, C. E.; TUCKER, C.; MCNEVIN, A.; BOSTICK, K.; CLAY, J. Indicators of resource use efficiency and environmental performance in fish and crustacean aquaculture. **Reviews in Fisheries Science**, 15: 327-360, 2007. <https://doi.org/10.1080/10641260701624177>

CAMPOS, J. L.; ONO, E.; KUBITZA, F. Aquaculture of Amazon fish in Latin America. **Global Seafood Alliance**. 2012. Disponível em: <https://www.globalseafood.org/advocate/aquaculture-of-amazon-fish-in-latin-america/?headlessPrint=AAAAPIA9c8r7gs82oWZBA>. Acesso em: 01 mai. 2023.

CASTELLANI, D.; ABIMORAD, E. G. 2012. Sistemas integrados em aquicultura. APTA Regional. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 9, n.1, 2012.

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**, v.30, p.547–579, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00822-2>

FIALHO, N.S.; VALENTI, W.C.; DAVID, F.S.; GODOY, E.M.; PROENÇA, D.C.; ROUBACH, R.; WOLFF BUENO, G. Environmental sustainability of Nile tilapia net-cage culture in a neotropical region. **Ecological Indicators**, v. 129, p.108008, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108008>

GARCIA, F., KIMPARA, J.M., VALENTI, W.C., AMBROSIO, L.A., 2014. Emergy assessment of tilapia cage farming in a hydroelectric reservoir. **Ecological Engineering**, 68, 72–79, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.076>.

LANDER, T. R.; ROBINSON, S. M.; MACDONALD, B. A.; MARTIN, J. D. Enhanced growth rates and condition index of blue mussels (*Mytilus edulis*) held at integrated multitrophic aquaculture sites in the Bay of Fundy. **Journal of Shellfish Research**, 31(4), 997-1007, 2012. <https://doi.org/10.2983/035.031.0412>

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**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 264–293, 2016. <https://doi.org/10.1080/23308249.2016.1169245>

MOURA, R. S. T.; VALENTI, W. C.; Henry-Silva, G.G. Sustainability of Nile tilapia net-cage culture in a reservoir in a semi-arid region. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 574-582, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.052>

NEORI, Amir; SHPIGEL, Muki; BEN-EZRA, David. A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. **Aquaculture**, v. 186, n. 3-4, p. 279-291, 2000.

O., SICKANDER; R., FILGUEIRA. Factors affecting IMTA (integrated multi-trophic aquaculture) implementation on Atlantic Salmon (*Salmo salar*) farms **Aquaculture**, v. 561, n. 3-4, p. 738716, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738716>

SANTOS, U.R.A.; CASTILHO, C.L.; MATOS, C.S.; SILVA, D.R.; MORAES, R.; LIMA, J.F. Policultivo de *Colossoma macropomum* e *Macrobrachium amazonicum* em sistema aquapônico de produção. In: JORNADA CIENTÍFICA DA EMBRAPA AMAPÁ, 4, 2018, Macapá. Resumos... Macapá: Embrapa Amapá, 2019.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa, MG, SBCS/EMBRAPA/CNPS, v.5, p. 100, 2005.

DA SILVEIRA, L.P.; KRUMMENAUER, D.; POERSCH, L.H.; FÓES, G.K.; ROSAS, VICTOR T.; WASIELESKY, W. The effect of partial harvest on production and growth performance of *Penaeus vannamei* reared in biofloc technologic system. **Aquaculture**, v. 546, p. 737408, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737408>

SOARES, D.C.E.; Henry-Silva, G.G. Emission and absorption of greenhouse gases generated from marine shrimp production (*Litopenaeus vannamei*) in high salinity. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 367-376, 2019.

TROELL, M. et al. Integrated mariculture: asking the right questions. **Aquaculture**, v. 226, n. 1-4, p. 69-90, 2003.

VALENTI, W. C. 2002. Aquicultura sustentável. In: Congresso de Zootecnia, 12o, Vila Real, Portugal, Vila Real: Associação Portuguesa dos Engenheiros Zootécnicos. Anais...p.111-118, 2002.

VALENTI, W. C.; KIMPARGA, J. M.; PRETO, B. L. Measuring aquaculture sustainability. **World Aquaculture Society Magazine**, v.43, n.3, 2011.

VALENTI, W.C.; KIMPARGA, J.M.; PRETO, B.L.; MORAES-VALENTI, P. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. **Ecological Indicators**, v. 88, p. 402-413, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.068>

ZHANG, J.; HANSEN, P. K.; FANG, J.; WANG, W.; JIANG, Z. Assessment of the local environmental impact of intensive marine shellfish and seaweed farming—application of the MOM system in the Sungo Bay, China. **Aquaculture**, v. 287, n. 3-4, p. 304-310, 2009.

CAPÍTULO III - Fluxo de gases de efeito estufa em monocultivo e em cultivo multitrófico com peixe (*Colossoma macropomum*) e camarão (*Penaeus vannamei*)

FLUXO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM MONOCULTIVO E EM CULTIVO MULTITRÓFICO COM PEIXE (*Colossoma macropomum*) E CAMARÃO (*Penaeus vannamei*)

RESUMO

Avaliamos o fluxo dos gases de efeito estufa (GEE) dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) em tanques de monocultivo de peixe (*Colossoma macropomum*) (TC0 com 3 peixes. m^{-2}) e cultivo multitrófico integrado de peixe e diferentes densidades de camarão (*Penaeus vannamei*) (TC5 - 3 peixes. m^{-2} e 5 camarões. m^{-2} , TC10 - 3 peixes. m^{-2} e 10 camarões. m^{-2} e TC15 - 3 peixes. m^{-2} e 15 camarões. m^{-2}) cultivados em tanques de alvenaria no semiárido brasileiro por aproximadamente 7 meses. O experimento foi desenvolvido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e três repetições, um total de doze unidades experimentais. Três coletas (C0, C1 e C2) foram realizadas para identificar e quantificar os fluxos ebulitivos e difusivos dos GEE's. Na análise de gases ebulitivos, na primeira coleta (C0), foram observadas emissões de gases, com os maiores valores relacionados ao gás CO_2 (46,73 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$). Na coleta final (C2), as emissões diminuíram significativamente, com os maiores valores novamente associados ao CO_2 (1,93 a 11,10 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$). Os resultados dos fluxos ebulitivos em C2 mostraram emissões médias de CH_4 (0,0002 a 8,03 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) e N_2O (0,075 a 0,38 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) variando nos diferentes tratamentos. Na análise dos fluxos difusivos, foram observadas emissões e absorções de gases. Em geral, houve menores emissões e maiores absorções, com destaque para o CO_2 , que absorveu mais do que emitiu nas últimas coletas nos tratamentos TC0 e TC5. Os resultados indicaram uma redução significativa das emissões difusivas para o CH_4 e CO_2 em todos os tratamentos após C0. Os fluxos difusivos de N_2O aumentaram após a coleta inicial e apresentaram uma redução na última coleta, com absorção da maioria dos tratamentos. Quanto a contribuição quantitativa total dos GEE's, o CO_2 foi o gás de maior contribuição, seguido pelo N_2O e CH_4 , correspondendo a 98%, 2,3% e menos de 1% dos gases observados, respectivamente. Nossos resultados evidenciaram que as emissões dos GEE's seguiram padrões semelhantes nos diferentes tratamentos. Houve variações nos fluxos de CH_4 , CO_2 e N_2O . O CO_2 teve a maior contribuição em todos os tratamentos, com médias negativas indicando absorção do gás nos dois sistemas de cultivo. O N_2O teve maior contribuição nos tratamentos com maior densidade de camarão, enquanto o CH_4 apresentou baixos valores de emissão, sendo maior no tratamento com maior densidade de camarão. Nossos resultados indicam que os sistemas de aquicultura multitrófica integrada de *C. macropomum* e *P. vannamei* demonstraram um maior potencial de emissão de gases em comparação com o monocultivo, especialmente à medida que a densidade de estocagem aumentou. Os camarões, como organismos bentônicos, ao revolverem o substrato, podem acelerar na liberação de gases de efeito estufa para a coluna d'água.

Palavras-chave: GEE; Aquicultura Multitrófica Integrada; *Colossoma macropomum*; *Penaeus vannamei*.

1. INTRODUÇÃO

Os gases de efeito estufa (GEE) são gases que contribuem para o aquecimento global absorvendo e emitindo calor através de raios infravermelhos. Merecem destaque o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). As mudanças climáticas decorrentes da liberação desses gases e seus impactos, vem sendo estudadas há anos, bem como a contribuição de atividades antrópicas, industriais, agropecuárias e seu papel para o aceleração dessas emissões. A maioria das emissões de GEE's relacionadas com a produção agrícola ocorreram na Ásia (45%), seguidas pelas Américas (25%), África (15%), Europa (11%) e Oceania (4%). As estimativas destacam que as emissões provenientes da agricultura, silvicultura e pesca duplicaram nos últimos 50 anos, podendo, até 2050, aumentar em 30%, caso não ocorra redução (TUBIELLO *et al.*, 2014). De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em 2021, com a reerguida da economia após a COVID-19 em 2020, as emissões globais cresceram, sendo que a emissão bruta de GEE para o Brasil foi de 2,4 bilhões de toneladas, duas vezes maior do que a média mundial (POTENZA *et al.*, 2023).

Em se tratando de atividades agropecuárias, na produção da proteína animal, a liberação de GEE é um dos principais impactos da cadeia. A criação de gado bovino é vista como importante emissora por quilograma de carne produzido, sucedida de suínos e aves, sendo que as intensidades de emissão podem ser influenciadas por fatores combinados que dependem da espécie, sistema e região em questão (MACLEOD *et al.*, 2013). Já a aquicultura, no período entre 1990 e 2020, expandiu-se em 609% em termos de produção anual, com uma taxa média de crescimento de 6,7% ao ano (FAO, 2022), e como demais atividades produtivas, o setor aquícola tem uma parcela de contribuição com as emissões de GEE's. Assim, o crescimento do setor levanta preocupações climáticas sobre as emissões (MACLEOD *et al.*, 2020).

Na cadeia aquícola, esses gases podem ser liberados nas mais diferentes etapas do processo produtivo, ao longo dos cultivos e durante o descarte de efluentes. Atualmente existem várias pesquisas que avaliaram a emissão desses gases na aquicultura, que estimaram essas emissões em regiões diferentes e nos mais diversos sistemas de cultivo em ambientes de água doce e salgada (YANG *et al.*, 2012; SCHOTT *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2018; AIMÉ *et al.*, 2018; DA SILVA *et al.*, 2018; SOARES e HENRY-SILVA, 2019; ZANG *et al.*, 2020; FENG *et al.*, 2021; YUAN *et al.*, 2021; FANG *et al.*, 2022; TAN *et al.*, 2023; YANG *et al.*, 2023).

Com a intensificação do setor aquícola prevista para os próximos anos, torna-se indispensável o aprofundamento do conhecimento e monitoramento do potencial de emissão desses gases durante o cultivo de organismos aquáticos, visto que há uma escassez de dados

mensurados para a região Nordeste do país. A região nordeste é a maior produtora de camarão marinho do Brasil, sendo responsável por 99,6% da produção brasileira (IBGE, 2022), possuindo características atípicas as demais, como temperatura elevada e curto período chuvoso, favorecendo a diversidade de espécies cultivadas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o fluxo de gases de efeito estufa no sistema de monocultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e no sistema de aquicultura multitrófica integrada (AMTI) de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão branco do Pacífico (*Penaeus vannamei*) no semiárido brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no setor de Aquicultura pertencente a Universidade Federal Rural do Semi-Árido localizada em Mossoró, RN, região nordeste do Brasil, Latitude: 5°12'S e Longitude: 37°19' W (Figura 1).

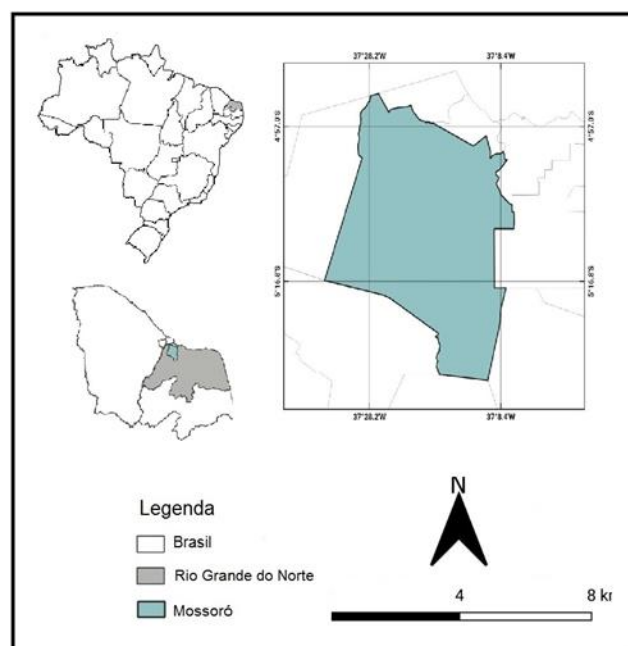


Figura 1. Localização da área de estudo. Legenda: Figura 1 - na cor branca, parte superior esquerda, está o mapa do Brasil com destaque para o estado do Rio Grande do Norte, abaixo, na cor cinza o mapa do estado do Rio Grande do Norte com destaque para a localização da cidade de Mossoró e na cor azul, destaque a direita, o mapa da cidade de Mossoró.

2.1 Delineamento Experimental

Analizamos um monocultivo de *C. macropomum* e um cultivo multitrófico integrado com *C. macropomum* e *P.vannamei* em doze tanques de alvenaria, cada um com área de 7 m² e volume de 7 m³, localizados no semiárido brasileiro (Latitude: 5°12'S e Longitude: 37°19' W). As unidades experimentais foram povoadas com o mesmo número de peixes, variando apenas a densidade de camarão. O cultivo multitrófico baseou-se no emprego de *C. macropomum* como espécie alvo e *P.vannamei* como espécie extrativa orgânica e teve uma duração de 218 dias. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com quatro tratamentos e três réplicas (TC0: três peixes e zero camarão/m²; TC5: três peixes e cinco camarões/m²; TC10: três peixes e dez camarões/m²; TC15: três peixes e quinze camarões/m²) (Figura 2).

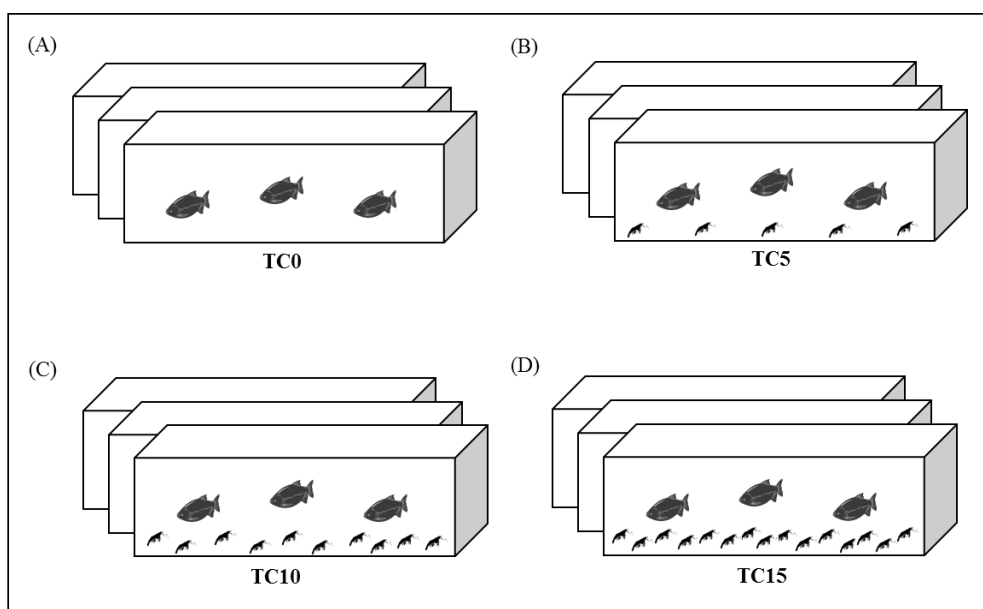


Figura 2. Representação esquemática dos sistemas de cultivo em tanques de alvenaria com três réplicas por tratamento, onde as letras maiúsculas representam: A) TC0 - monocultivo de tambaqui com 3 peixes.m⁻²; B) TC5 - cultivo multitrófico integrado com 3 peixes.m⁻² e 5 camarões.m⁻²; C) TC10 - cultivo multitrófico integrado com 3 peixes.m⁻² e 10 camarões.m⁻²; D) tratamento TC15 - cultivo multitrófico integrado com 3 peixes.m⁻² e com 15 camarões.m⁻².

2.2 Características do Cultivo

As unidades experimentais foram abastecidas com água salina numa concentração de 4 ppt e fertilizadas com uréia (3g.m^{-2}). A renovação ou reposição de água nos tanques foi feita sempre que necessário, quando houve perdas de evaporação e/ou deterioração de qualidade da água. A oxigenação da água nos tanques foi constante através do uso de sopradores. Apenas os peixes foram alimentados, sendo que a fonte de alimento dos camarões era basicamente composta de restos alimentares dos peixes, matéria orgânica decomposta (fezes, carapaça provenientes de muda e resíduos) e alimento natural do ambiente. O alimento artificial foi fornecido diariamente de forma manual e consistiu de ração comercial extrusada, com frequência alimentar de acordo com a fase de crescimento em refeições espaçadas durante o dia e teor protéico e quantidade variando conforme o crescimento dos animais de acordo com a biomassa estimada e ajustada após as biometrias (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização das rações comerciais utilizadas no experimento.

Fase	PB (%)	EE (%)	P (%)	Granulometria (mm)
Fase 1 (alevino)	36	7	6	2-3
Fase 2 (juvenil)	32	6,5	6	4-5
Fase 3 (crescimento)	32	6,5	6	6-7

Legenda: PB (%): percentual de proteína bruta na ração; E.E (%): percentual de extrato etéreo; P (%): percentual de fósforo na ração,

As variáveis limnológicas foram quinzenalmente coletadas *in situ*, medidas com auxílio de uma sonda multiparamétrica (HORIBA, U-50, Kyoto, Japan), além de mensalmente coletadas e mensuradas em ambiente laboratorial seguindo o protocolo de cada análise (Tabela 2). Os valores observados encontraram-se dentro das faixas consideradas ideais para o crescimento de peixes e camarões (ROSS e ROSS, 1983; BOYD, 1990; IGARASHI, 1995; BESSA, *et al.*, 2012), estando de acordo com a faixa de conforto para o cultivo das espécies aqui estudadas.

Tabela 2. Valores médios e desvios-padrão das variáveis limnológicas mensuradas na coluna d'água nos tanques de cultivo em campo e em laboratório nos diferentes tratamentos durante o período experimental.

Parâmetro	Tratamento			
	TC0	TC5	TC10	TC15
Temperatura (°C)	29,0±1,3	29,1±1,4	29,0±1,3	29,0±1,4
pH	8,38±1,69	8,28±1,18	8,30±1,18	8,35±1,11
Transparência (cm)	29,0±8,3	28,9±6,5	28,4±6,9	29,2±7,3
Condutividade	6,1±1,4	6,0±0,9	5,9±0,9	6,2±1,0 a
Turbidez (NTU)	67,2±43,8 b	130,6±131,6 a	93,8±70,3 ab	119,7±131,1 ab
Oxigênio Dissolvido (mg.L ⁻¹)	8,5±1,8	7,5±1,3	7,6±1,2	7,3±1,2
Sólidos totais dissolvidos (TDS)	3,9±0,9	3,9±0,6	3,8±0,5	3,9±0,6
Salinidade (g.L)	3,2±0,8	3,2±0,6	3,2±0,5	3,3±0,6
Clorofila (µg.L ⁻¹)	115,6±111,2	315,6±296,6	221,2±317,2	173,7±141,0
Fósforo total(µg.L ⁻¹)	32,9±29,9	49,8±20,6	55,5±53,8	72,5±69,7
Ortofosfato (µg.L ⁻¹)	163,1±174,6 b	164,6±187,6 b	151,6±209,6 b	275,4±307,6 a
Amônia (mg.L ⁻¹)	1,2±1,0 b	2,8±1,7 a	1,3±1,1 b	2,0±1,9 a
Nitrato (mg.L ⁻¹)	1,1±1,4	1,8±2,9	1,4±1,8	1,8±2,8
Nitrito (mg.L ⁻¹)	0,19±0,26 a	0,13±0,25 b	0,12±0,23 b	0,17±0,25 a
Nitrogênio total (mg.L ⁻¹)	2,6±0,01 b	4,6±3,97 a	2,7±1,0 b	4,5±5,2 a
Matéria Orgânica (g)	0,04±0,02 a	0,04±0,01 a	0,02±0,01 b	0,05±0,04 a
Carbono Orgânico Total (mg.L ⁻¹)	49,1±17,7 b	86,2±32,7 a	67,5±44,6 b	75,2±9,1 a
Carbono Inorgânico Total (mg.L ⁻¹)	47,3±13,5	57,6±24,2	46,1±23,7	48,3±27,4
Carbono Total (mg.L ⁻¹)	96,7±4,7 c	143,8±8,6 a	113,6±20,9 b	120,1±41,2 b

Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5 três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado. Médias seguidas por letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre os tratamentos, pela ANOVA e teste de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

As características zootécnicas para os peixes e camarões cultivados estão apresentadas nas Tabela 3 e 4. Para os peixes (Tabela 3), a cada mês, 7 animais (que correspondia a 30% da biomassa de peixes na unidade experimental) foram coletados de dentro dos tanques com o auxílio de uma rede ou puçá. Foi feita a biometria (comprimento e peso), utilizando-se um ictiômetro e uma balança de precisão. Os camarões (Tabela 4), tiveram sua estimativa de peso e sobrevivência ao final do experimento. O ganho de peso médio diário (GP), a biomassa inicial (BI), a biomassa final (BF), o ganho de biomassa (GB), o fator de conversão alimentar aparente (FCAA), a conversão alimentar aparente (CA) e a taxa de sobrevivência (S) foram determinados ao final do experimento.

Tabela 3. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros zootécnicos de peso médio inicial, peso médio final, taxa de sobrevivência, mortalidade, fator de conversão alimentar aparente, ganho em peso médio diário, biomassa inicial, biomassa final e ganho em biomassa para os tambaquis cultivados em cada tratamento.

Parâmetro	Tratamento			
	TC0	TC5	TC10	TC15
Taxa de Sobrevivência (%)	76,2±29,7	80,9±4,8	63,5±34,5	88,9±9,9
Taxa de Mortalidade (%)	23,8±29,7	19,0±4,8	36,51±34,5	11,1±9,9
Peso Médio Inicial (g)	1,1±0,1	1,0±0,08	1,10±0,15	1,2±0,08
Peso Médio Final (g)	462,9±22,1	510,1±66,9	431,8±133,3	457,9±41,2
Fator de Conversão Alimentar Aparente	1,9±0,9	1,5±0,1	4,0±4,4	1,5±0,2
Ganho de Peso Médio Diário (g)	2,3±0,1	2,5±0,3	2,1±0,7	2,3±0,2
Biomassa Inicial (kg)	0,02±0,003	0,02±0,002	0,02±0,003	0,03±0,002
Biomassa Final (kg)	7,4±2,9	8,6±0,7	6,38±4,4	8,5±0,9
Ganho em Biomassa (kg)	7,4±2,9	8,6±0,7	6,36±4,4	8,5±0,9

Legenda: TC0: tratamento com três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: tratamento com três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: tratamento com três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: tratamento com três peixes e quinze camarões por metro quadrado. Médias seguidas por letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre os tratamentos para a espécie *C. macropomum* pela ANOVA e teste de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

Tabela 4. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de taxa de sobrevivência, mortalidade, peso médio inicial, peso médio final, ganho em peso médio diário, biomassa inicial, biomassa final e ganho em biomassa para os camarões cultivados em cada tratamento.

Parâmetro	Tratamento		
	TC5	TC10	TC15
Taxa de Sobrevivência (%)	9,5±14,1	15,2±17,5	29,5±6,7
Taxa de Mortalidade (%)	90,5±14,1	84,8±17,5	70,5±6,7
Peso Médio Inicial (g)	0,1±0,02	0,1±0,01	0,1±0,01
Peso Médio Final (g)	17,1±15,3	21,6±22,4	13,4±1,5
Ganho de Peso Médio Diário (g)	0,08±0,08	0,11± 0,1	0,06598±0,01
Biomassa Inicial (kg)	0,0035±0,00 b	0,007±0,00 a	0,06598±0,01 a
Biomassa Final (kg)	0,0752±0,11	0,279±0,25	0,0105±0,00

Ganho em Biomassa (kg)	0,0717±0,11	0,2725±0,25	0,4967±0,11
------------------------	-------------	-------------	-------------

Legenda: TS: taxa de sobrevivência; TM: taxa de mortalidade; PMI: peso médio inicial; PMF: peso médio final; GPD: ganho de peso médio diário; BI: biomassa inicial; BF: biomassa final; GB: ganho de biomassa; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado. Médias seguidas por letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre os tratamentos, para a espécie *P.vannamei* pela ANOVA e teste de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

2.3 Coleta de Gases de Efeito Estufa

Os gases do efeito estufa - dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), foram mensurados em todas as unidades experimentais por meio das metodologias difusiva e ebulitiva em três coletas. C0: antes do início do cultivo (quando não havia animais nos tanques). C1: meio do cultivo. C2: ao final do cultivo. As amostras para mensurar a emissão difusiva superficial em $\text{mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ foram coletadas utilizando uma câmara de difusão no período diurno e noturno. As amostras para mensurar emissão por ebulição foram coletadas com o auxílio de funis invertidos submersos durante um período de 24h a 72h, ou conforme produção de gás (SANTOS et al., 2005).

2.4 Análise de Dados

A análise estatística foi processada no programa computacional SISVAR 5.6. Os dados obtidos para as variáveis limnológicas e zootécnicas foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e apresentando resultados significativos, foram analisados pelo teste de médias de Tukey ($p < 0,05$). Os dados de gases de efeito estufa, estão apresentados em média e desvio padrão e dispostos em gráficos distintos.

3. RESULTADOS

3.1 Fluxos de Gases

3.1.2 Fluxos Ebulitivos

Durante o período experimental, na primeira coleta (C0), que corresponde ao ambiente sem animais, a emissão de gases ebulitivos foi de $0,00001(\pm 0,00001)$ a $46,73 (\pm 6,60)$ $\text{mg.m}^2.\text{dia}^{-1}$. Sendo maiores valores observados na emissão do gás CO_2 (Figura 3). Já na coleta final (C2), a emissão de gases variou de $0,0002 (\pm 0,0002)$ a $11,10 (\pm 13,27)$ $\text{mg.m}^2.\text{dia}^{-1}$, com maiores valores observados na emissão de CO_2 (Figura 4).

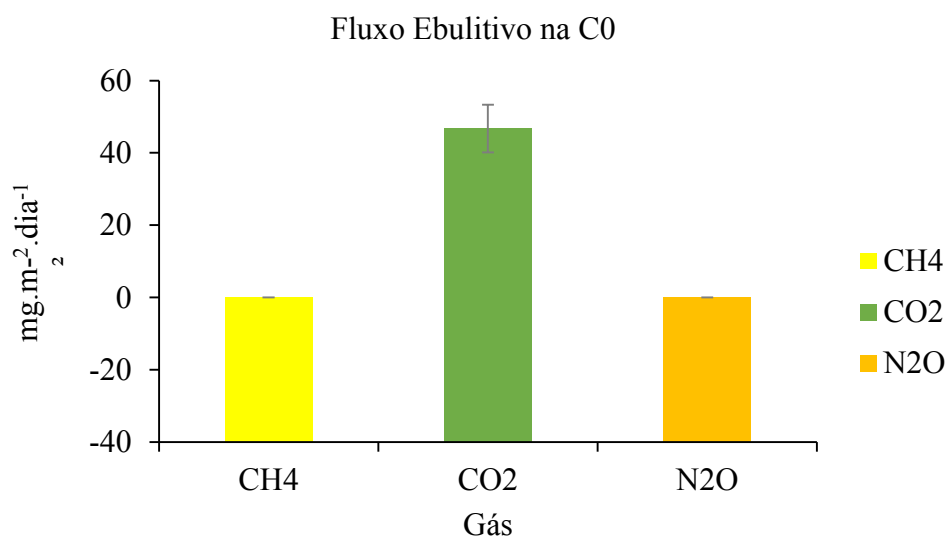


Figura 3. Valores médios e desvios padrão para os gases de efeito estufa (GEE) de emissão ebulitiva mensurados na coleta inicial (C0), quando os animais ainda não haviam sido povoados nas unidades experimentais. Legenda: CH_4 – Metano, CO_2 – dióxido de carbono, N_2O – Óxido nitroso.

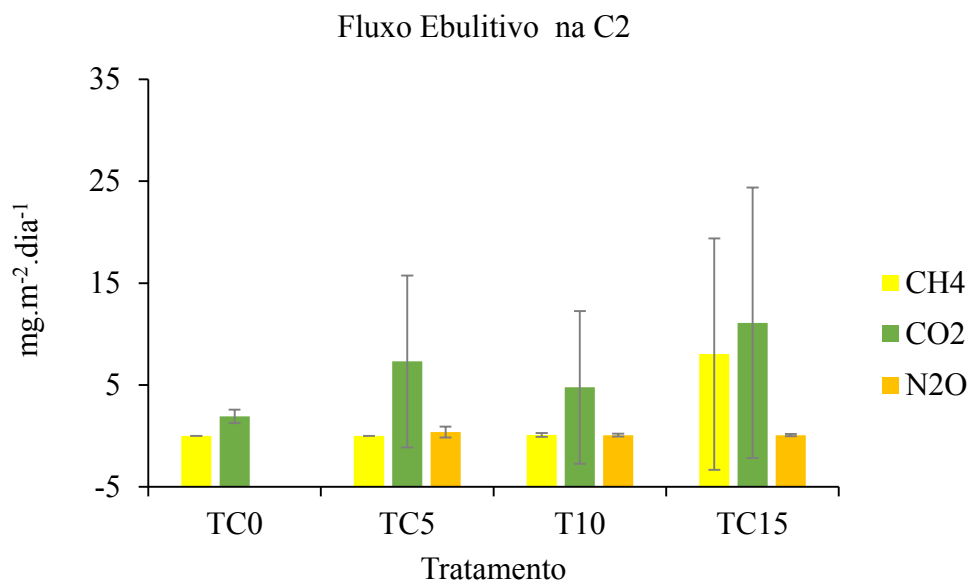


Figura 4. Valores médios e desvio padrão dos fluxos ebulitivo de gases de efeito estufa em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para cada tratamento na última coleta (C2). Legenda: CH₄ – Metano, CO₂ – dióxido de carbono, N₂O – Óxido nitroso; TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10 três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15 três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

Os resultados obtidos para os fluxos ebulitivos em C2 apresentaram valores médios de emissão de CH₄ variando de 0,002 ($\pm 0,00002$) a 8,0340 ($\pm 11,37$) $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ no TC0 e TC15 respectivamente (Figura 5). Observamos um aumento nos tratamentos de cultivo AMTI TC5 e TC10, porém muito baixos, já em TC15, foi constatado o maior aumento.

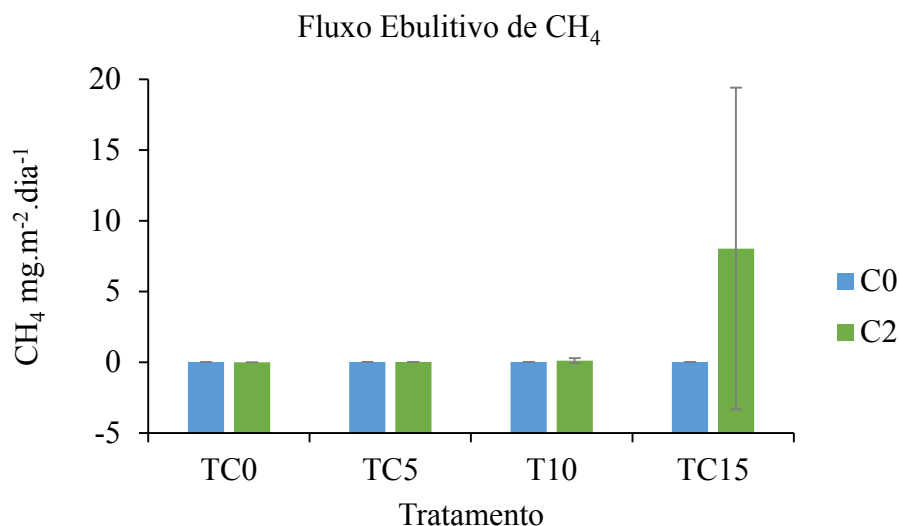


Figura 5. Valores médios e desvio padrão de emissão ebulitiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás metano (CH_4) mensurado em cada tratamento durante a primeira (C0) e a coleta final (C2). Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5 três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

O fluxo médio para o CO_2 variou de $1,93 (\pm 0,66)$ a $11,10 (\pm 13,27)$ $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para os tratamentos TC0 e TC15, respectivamente (Figura 6), sendo observada uma redução em C2 para todos os tratamentos.

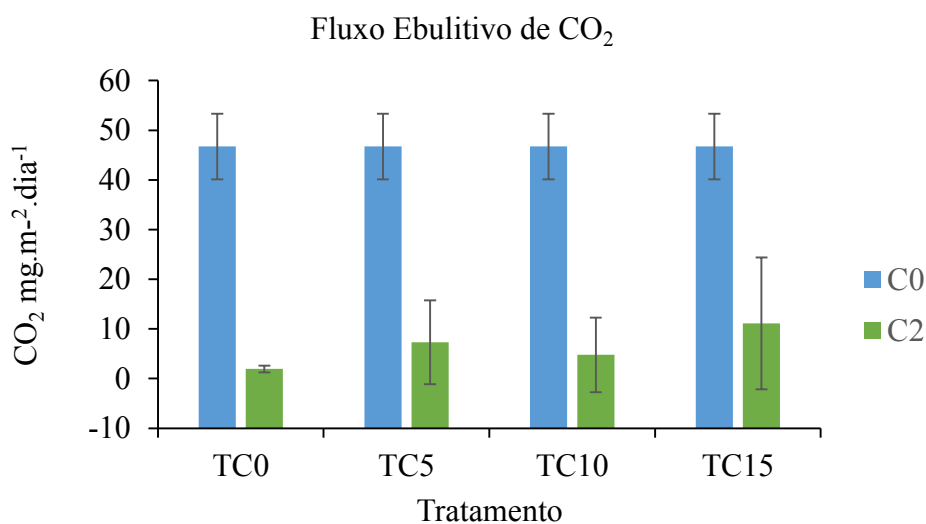


Figura 6. Valores médios e desvio padrão de emissão ebulitiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás dióxido de carbono (CO_2) mensurado em cada tratamento durante a primeira (C0) e a coleta

final (C2). Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

Os resultados de emissão observados para o gás N_2O tiveram variações baixas, com fluxos médios variando de 0,08 ($\pm 0,11$) a 0,38 ($\pm 0,53$) $mg.m^{-2}.dia^{-1}$ para TC15 e TC5 (Figura 7). Na coleta C2, houve um leve aumento na emissão do gás de TC5 à TC15. Na mesma coleta, não foram observadas emissões de N_2O para o TC0.

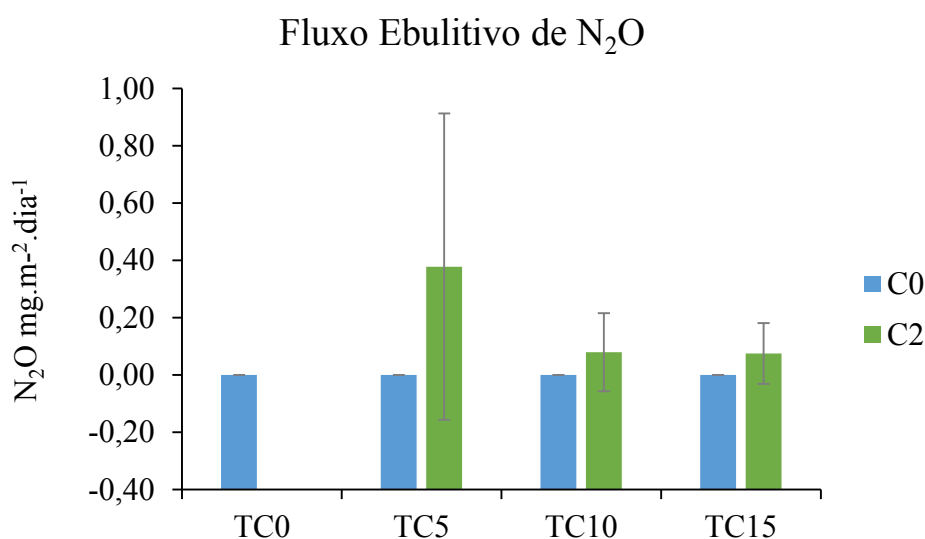


Figura 7. Valores médios e desvio padrão de emissão ebulitiva em $mg.m^{-2}.dia^{-1}$ para o gás óxido nitroso (N_2O) mensurado em cada tratamento durante a primeira (C0) e a coleta final (C2). Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

3.1.3 Fluxos Difusivos

Para os gases de emissão difusiva, foram observados fluxos positivos (emissão de gás) e fluxos negativos (absorção do gás). Na análise dos fluxos difusivos durante o período experimental, os resultados obtidos tiveram, em geral, menores emissões (totalizando 10392,56 $mg.m^{-2}.dia^{-1}$) e maiores absorções (totalizando -24724,70 $mg.m^{-2}.dia^{-1}$) de gases, com destaque para o CO_2 , que absorveu mais do que emitiu nas duas últimas coletas (Figura 8).

Na primeira coleta (C0), que corresponde ao ambiente sem animais, o fluxo de gases difusivos variou de -0,21 ($\pm 0,38$) a 9735,32 ($\pm 6523,51$) $\text{mg.m}^2.\text{dia}^{-1}$, com maiores valores observados na emissão do gás CO_2 (Figura 8). Já na segunda coleta (C1), o fluxo de gases variou de -17178,01 ($\pm 4015,59$) a 654,32 ($\pm$) $\text{mg.m}^2.\text{dia}^{-1}$, sendo observadas maior absorção de CO_2 (Figura 8). Na coleta final (C2), o fluxo de gases difusivos variou de -7468,77 ($\pm 4085,02$) a 1,37 ($\pm 0,31$) $\text{mg.m}^2.\text{dia}^{-1}$, com maior absorção de CO_2 .

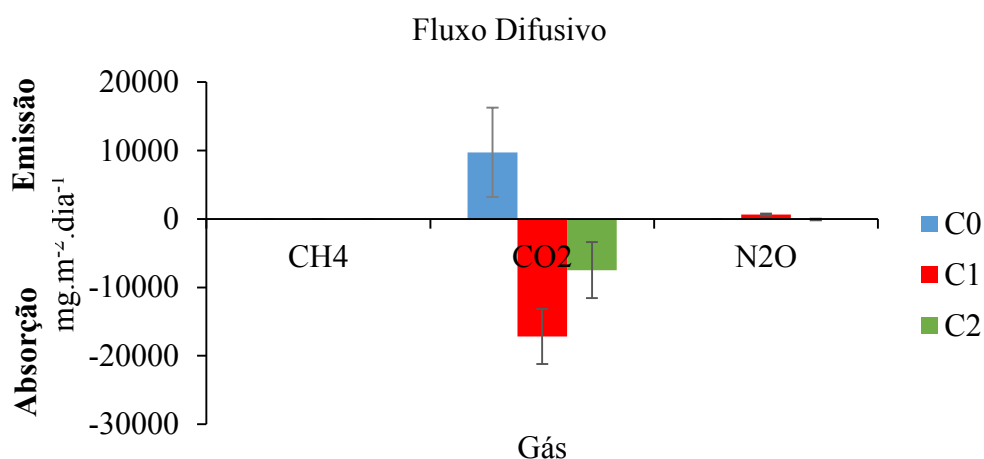


Figura 8. Valores médios e desvios padrão para os gases de efeito estufa (GEE) de emissão difusiva mensurados na primeira coleta (C0), na coleta do meio (C1) e na coleta final (C3). Legenda: C0: coleta antes de iniciar o cultivo; C1: coleta do meio do cultivo; C2: coleta ao final do cultivo. CH₄ – Metano, CO₂ – dióxido de carbono, N₂O – Óxido nitroso.

3.1.3.1 Fluxos difusivos de metano (CH₄)

As médias de emissão difusiva para o CH₄ mostram uma redução significativa de emissão em todos os tratamentos após a coleta inicial (C0), onde TC10 e TC15 apresentaram taxas menores, com absorção do gás. Na coleta final (C2), TC5 e TC15, tiveram um aumento no fluxo de CH₄ em relação a coleta anterior (Figura 9).

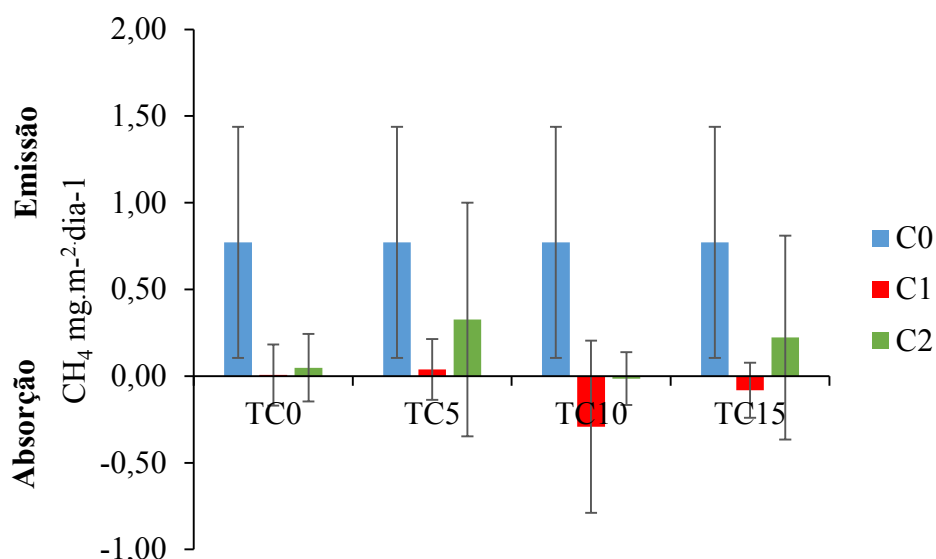
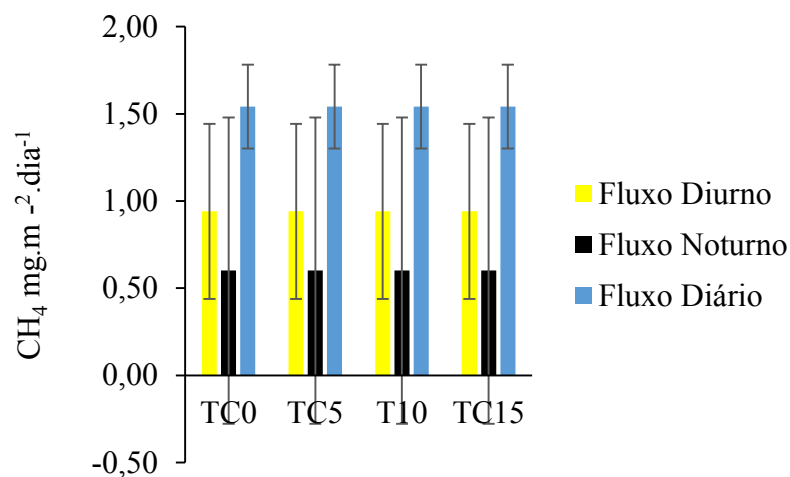


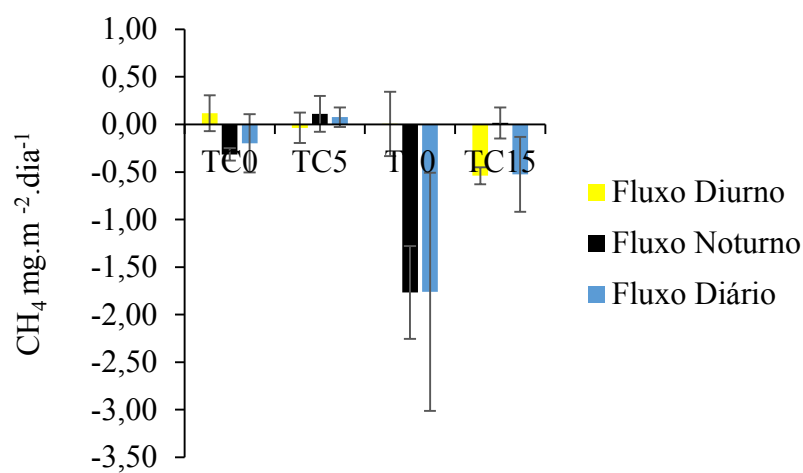
Figura 9. Valores médios e desvio padrão de emissão difusiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás metano (CH_4) mensurado em cada tratamento na primeira (C0), segunda (C1) e terceira coleta (C2). Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

Para o balanço diurno e noturno dos fluxos difusivos de CH_4 , na C0 (Figura 10 A) foi observado que a taxa de emissão difusiva apresentou fluxo positivo, com um fluxo médio difusivo diário de $1,54 \text{ mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Na coleta C1 (Figura 10 B) houve redução das taxas de emissão em todos os tratamentos, com fluxos negativos no período diurno para TC5 e TC15 e noturno para TC0 e TC10 e fluxos positivos no período diurno para TC0 e TC10 e noturno para TC5 e TC15, com um fluxo médio difusivo diário de $-0,60 \text{ mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Em C2 houve um aumento das taxas de emissão em todos os tratamentos, com fluxos negativos no período diurno para TC0 e noturno para TC10, e fluxos positivos no período diurno para TC5, TC10 e TC15 e noturno para TC0, TC5 e TC15, com um fluxo médio difusivo diário de $0,34 \text{ mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. (Figura 10C).

(A)



(B)



(C)

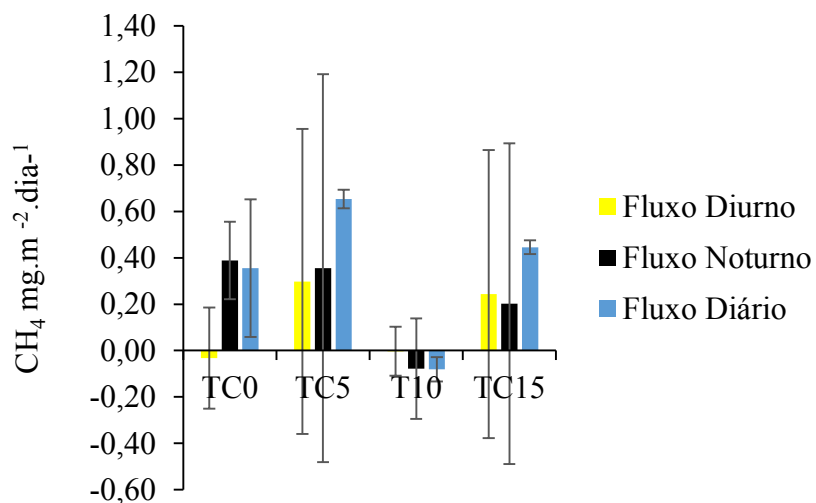


Figura 10. Fluxos difusivos diurno, noturno e diário em mg.m⁻².dia⁻¹ para o gás metano (CH₄) mensurado em cada tratamento, onde as letras (A)- emissão na primeira coleta (C0); (B)-

emissão na segunda coleta (C1) e (C)- emissão na terceira coleta (C2). Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

3.1.3.2 Fluxos difusivos de dióxido de carbono (CO₂)

As médias de emissão difusiva para o CO₂ mostram uma redução significativa de emissão em todos os tratamentos após a coleta inicial (C0), onde houve absorção de gás na maioria dos tratamentos (exceto TC5 e TC15), onde os tratamentos TC5 e TC10 taxas menores, com absorção do gás. Na coleta final (C2), os tratamentos TC5, TC10 e C15, tiveram um leve aumento no fluxo de CO₂ em relação a coleta anterior (Figura 11)

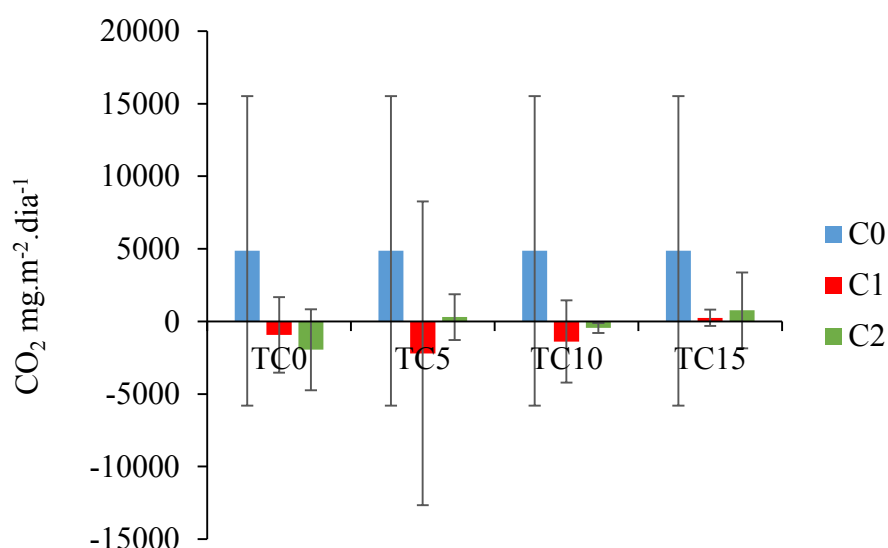
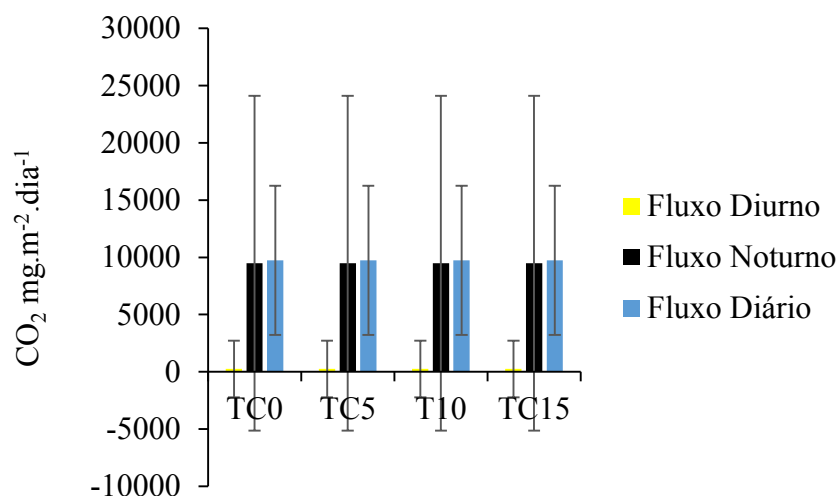


Figura 11. Valores médios e desvio padrão de emissão difusiva em mg.m⁻².dia⁻¹ para o gás dióxido de carbono (CO₂) mensurado em cada tratamento na primeira (C0), segunda (C1) e terceira coleta (C2). Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

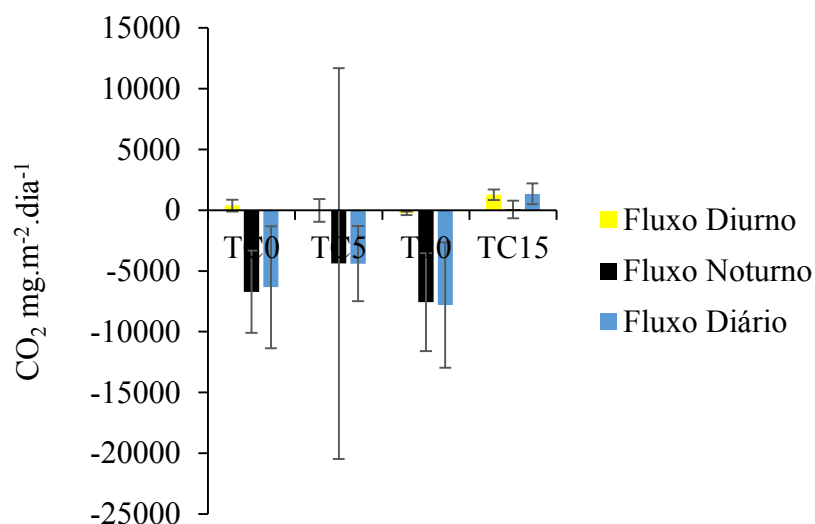
No balanço diurno e noturno dos fluxos difusivos de CO₂, na C0 (Figura 12 A) foi observado que a taxa de emissão difusiva apresentou fluxo positivo, com um fluxo médio difusivo diário de 9735,32 mg.m⁻².dia⁻¹. Na coleta C1(Figura 12 B), houve redução das taxas

de emissão em todos os tratamentos, com fluxos negativos no período diurno para TC5 e TC10 e noturno para TC0, TC5 e TC10, e fluxos positivos no período diurno para TC0 e TC15 e noturno para TC15, com um fluxo médio difusivo diário de $-4294,50 \text{ mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Em C2 (Figura 12 C), houve uma flutuação das taxas de emissão em todos os tratamentos, com fluxos negativos no período diurno para TC0, TC10 e TC15 e noturno para TC0 e TC10, e fluxos positivos no período diurno para TC5 e noturno para TC5 e TC15, com um fluxo médio difusivo diário de $-1867,19 \text{ mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

(A)



(B)



(C)

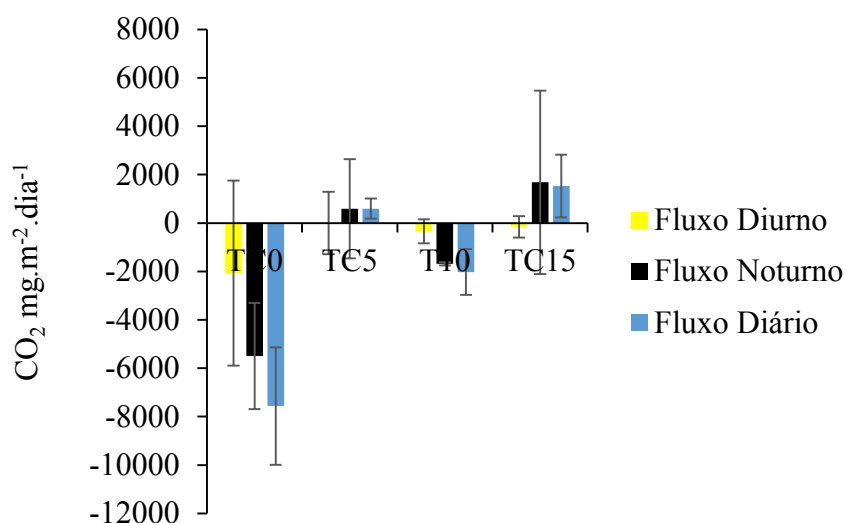


Figura 12. Fluxos difusivos diurno, noturno e diário em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás metano (CO_2) mensurado em cada tratamento, onde as letras (A)- emissão na primeira coleta (C0); (B)- emissão na segunda coleta (C1) e (C)- emissão na terceira coleta (C2). Legenda: TC0: tratamento com três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

3.1.3.3 Fluxos difusivos de óxido nitroso (N_2O)

As médias de emissão difusiva para o N_2O (Figura 13) mostram um aumento de emissão em todos os tratamentos após a coleta inicial (C0), seguido de uma redução na última coleta (C2), onde houve absorção de gás na maioria dos tratamentos (exceto em TC10).

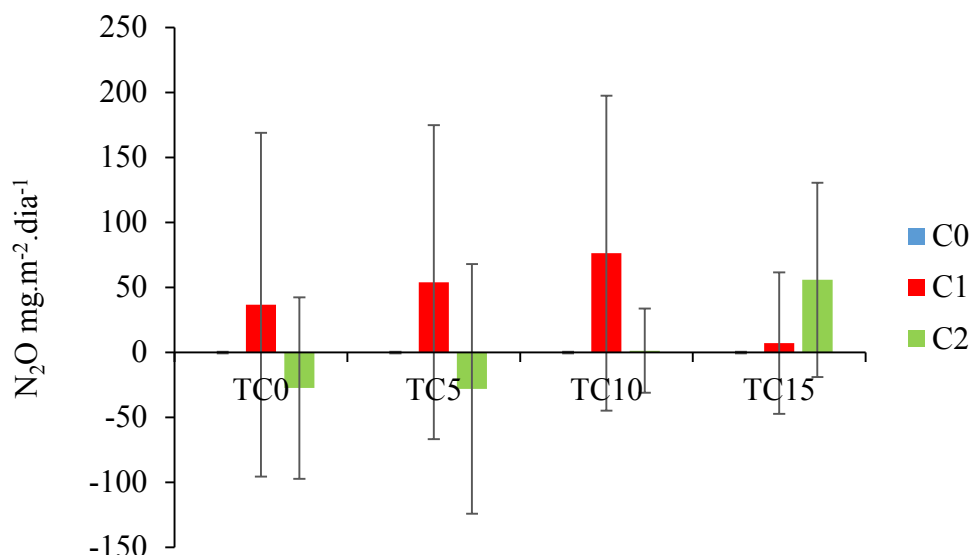
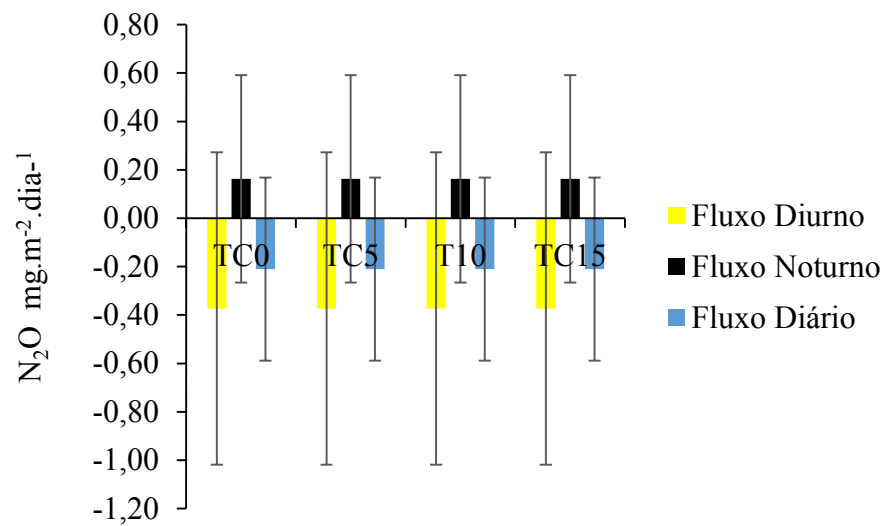
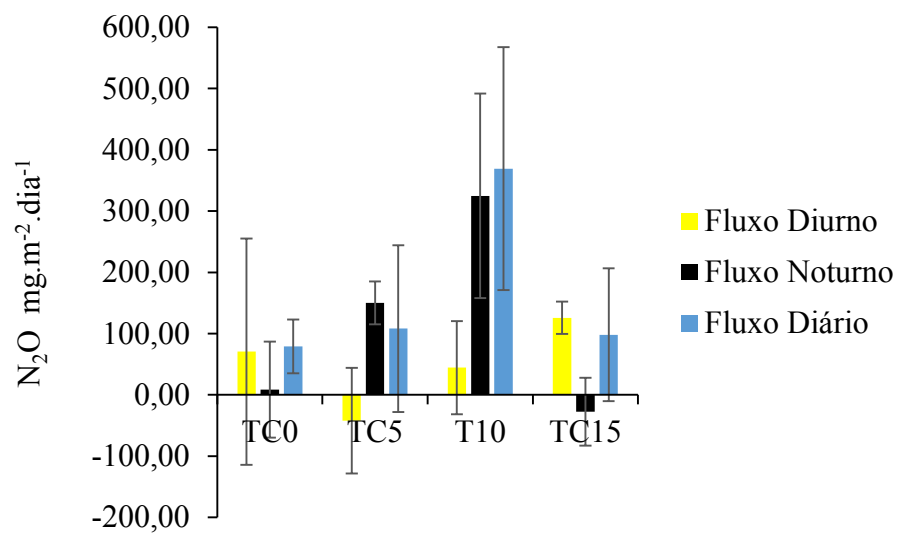


Figura 13. Valores médios e desvio padrão de emissão difusiva em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o gás óxido nitroso (N_2O) mensurado em cada tratamento na primeira (C0), segunda (C1) e terceira coleta (C2). Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

No balanço diurno e noturno dos fluxos difusivos de N_2O , na C0 (Figura 14 A) foi observado que a taxa de emissão difusiva apresentou fluxo negativo, com um fluxo médio difusivo diário de $-0,21 \text{ mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Na coleta C1, houve aumento das taxas de emissão em todos os tratamentos, com fluxos negativos no período diurno para TC5 e noturno para TC15, e fluxos positivos no período diurno para TC0, TC10 e TC15 e noturno para TC10, TC5 e TC10, com um fluxo médio difusivo diário de $163,58 \text{ mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. (Figura 14 B). Em C2 houve maiores taxas de absorção, com fluxos negativos no período diurno para TC0 e TC5 e noturno para TC0, TC5 e TC10, e fluxos positivos no período diurno para TC10 e TC15 e noturno para TC15, com um fluxo médio difusivo diário de $-18,88 \text{ mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (Figura 14 C).

(A)**(B)****(C)**

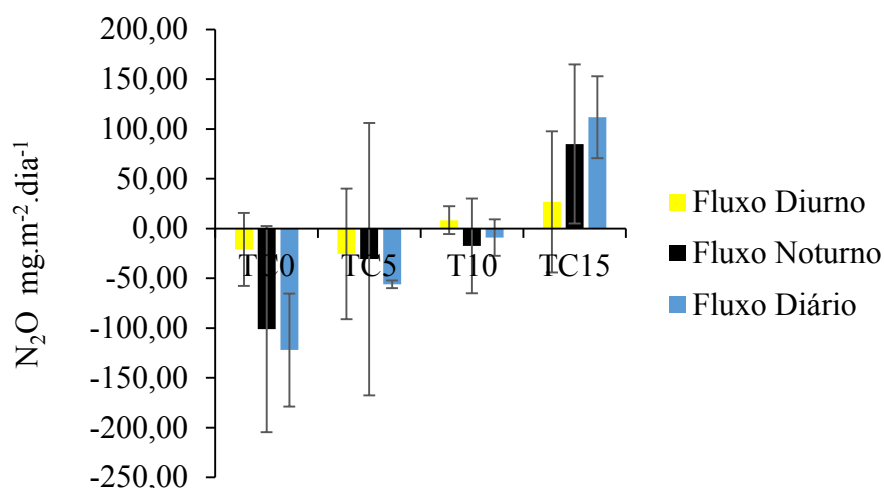


Figura 14. Fluxos difusivos diurno, noturno e diário em $\text{mg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para óxido nitroso (N_2O) mensurado em cada tratamento, onde as letras (A)- emissão na primeira coleta (C0); (B)- emissão na segunda coleta (C1) e (C2) - emissão na terceira coleta (C2). Legenda: TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado.

3.2 Fluxo total de gases

Somando-se os valores médios dos fluxos ebulitivos e difusivos foi obtido a distribuição quantitativa correspondente a contribuição de cada GEE durante o período experimental em todos os tratamentos. Dentre os gases, o maior percentual de gás obtido foi o CO_2 , que correspondeu a 98% dos gases observados no experimento, seguido do N_2O (2,3%) e do CH_4 (menos 1%) (Figura 15).

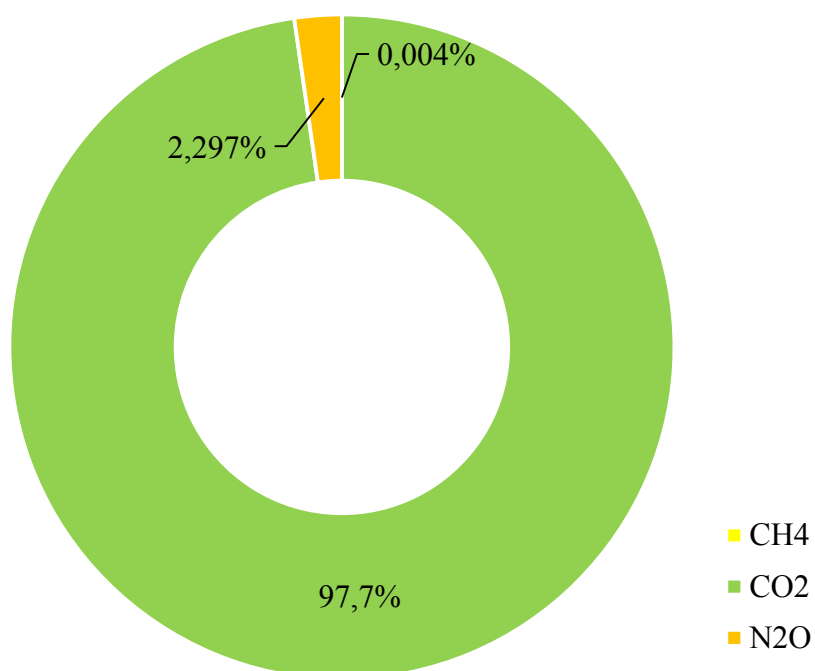


Figura 15. Distribuição quantitativa dos gases produzidos durante o período experimental em todos os tratamentos. Legenda: CH₄ – Metano, CO₂ – dióxido de carbono, N₂O – Óxido nitroso.

As maiores contribuições foram de gases de emissão difusiva, totalizando 99,94% dos gases observados (Figura 16).

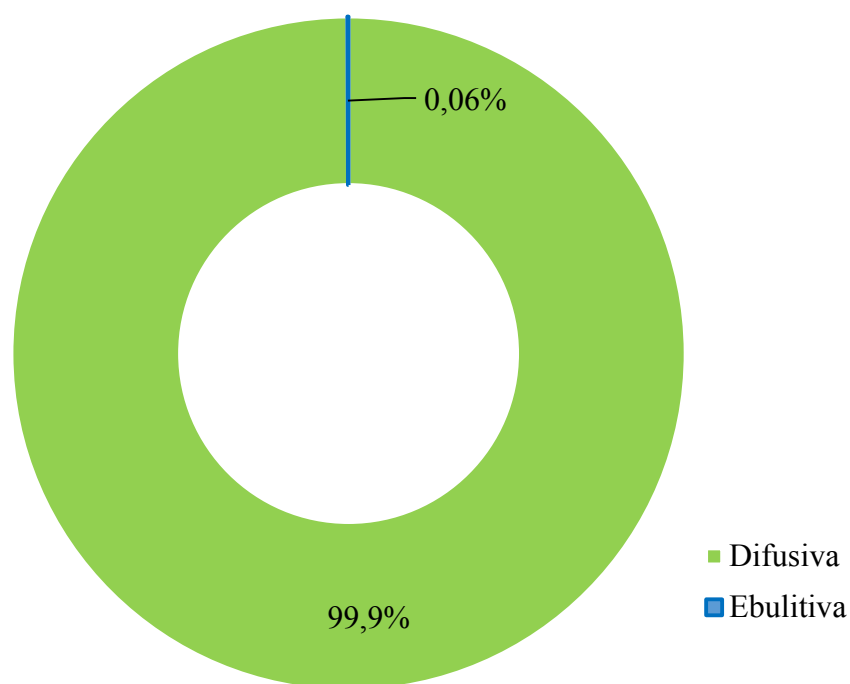


Figura 16. Contribuição percentual dos gases obtidos pelos dois métodos ebulitivo e difusivo para todos os tratamentos.

Foram observados padrões de emissão semelhantes para os gases de efeito estufa nos diferentes tratamentos. Em todos os tratamentos o CO_2 teve maior contribuição, e em geral teve médias negativas, o que indica que houve absorção do gás, sendo 99,7% para TC0, 98,6% em TC5, 96,45% em TC10 e 92,9% em TC15. N_2O apresentou maior contribuição para os tratamentos que continham maior densidade de camarão TC10 e TC15. Em contrapartida, o CH_4 apresentou baixos valores de emissão, sendo o de maior emissão no TC15 (Figuras 17)

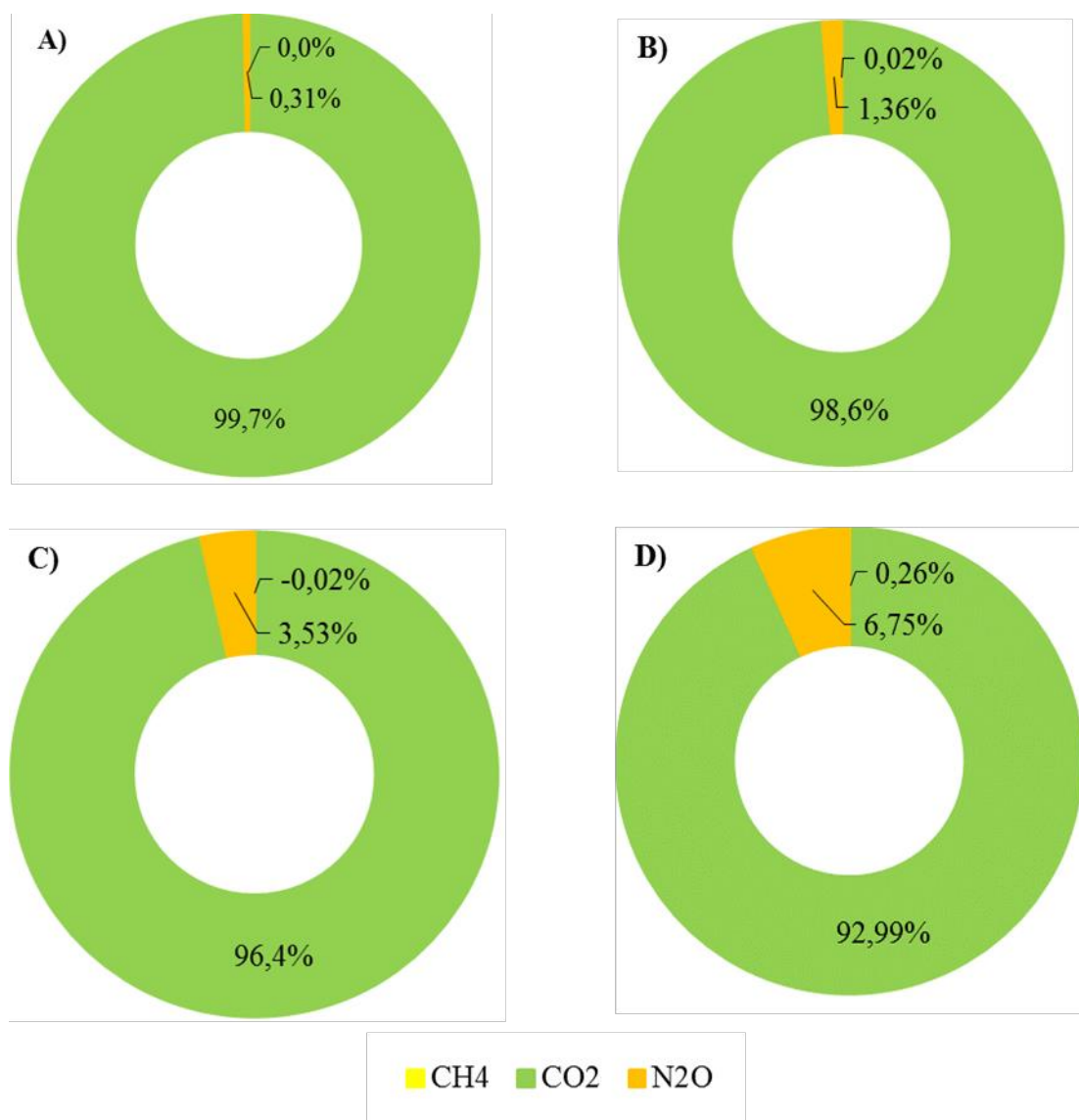


Figura 17. Contribuição percentual de todos os gases obtidos para: A) TC0; B) TC5; C) TC10 e D) TC15. Legenda: CH₄ – Metano, CO₂ – dióxido de carbono, N₂O – Óxido nitroso; TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado.

4. DISCUSSÃO

4.1. Fluxos de CH₄

O gás CH₄ teve contribuições reduzidas na quantificação de gases. Os fluxos ebulitivos de CH₄ foram maiores na coleta C2 para os tratamentos com cultivo AMTI. Diversos são os fatores que podem estar associados a esse aumento: condições óxicas na interface sedimento-água elevam as taxas de atividade de oxidação do metano (SABU *et al.*, 2022), processos de eutrofização, que aumenta a produção do gás (IWATA *et al.*, 2020), viveiros com alimentação emitem mais CH₄ (YAN CHEN *et al.*, 2016). Estudos demonstraram que emissões de metano foram controladas pela temperatura (IWATA *et al.*, 2020; ZHAO *et al.*, 2021; Yini Pu *et al.*, 2022), além disso, essas emissões também podem variar de acordo com áreas funcionais de estocagem (FANG *et al.*, 2022). Essa variação pode ser explicada pelo fato de que o metano é gerado na etapa final da degradação da matéria orgânica, conforme evidenciado por Conrad *et al.* (2010). Logo, as emissões desse gás podem ser afetadas à medida que o sistema fica mais complexo, como o caso dos sistemas de cultivo AMTI apresentados em nosso estudo.

Os resultados do estudo conduzido por Yuan *et al.* (2021), esclarecem o papel da ebulição como principal via de transporte de CH₄, reafirmando o padrão observado neste trabalho. É importante destacar também o papel do oxigênio dissolvido na presença do gás metano. Liu *et al.* (2016) cita que dentre as práticas de manejo, uma melhor aeração auxiliaria na redução de emissão de gases como o CH₄. Yuan *et al.* (2019) verificaram emissões significativamente menores de metano em sistemas intensificados com aeração contínua. Assim, aeração dos tanques em nosso trabalho, aumentou as concentrações de oxigênio dissolvido na água e pode ter sido eficaz na redução desse gás.

Por outro lado, a redução nos valores de emissão difusiva de CH₄, que notamos em nosso estudo, inclusive com processos de absorção nos fluxos diurno e noturno em alguns tratamentos, apresentando fluxo diário negativo na coleta C1 (absorção diurna em TC5 e TC15 e noturna em TC0 e TC10) e fluxo diário positivo C2 (absorção diurna em TC0 e noturna em TC10), constitui uma descoberta de grande relevância e nos traz uma visão otimista para a aquicultura nas nossas condições semiáridas, tanto para monocultivos como para cultivos AMTI, demonstrando o potencial da atividade de reduzir e atuar como fonte de sequestro de GEE's.

4.2 Fluxos de CO₂

Nosso estudo encontrou um padrão geral de diminuição no fluxo de CO₂ quando comparamos as duas coletas inicial (C0) e final (C2). Maiores fluxos de gases ocorrem no início do cultivo devido à adubação inicial (SOARES e HENRY-SILVA, 2019), assim valores mais elevados de gases, especialmente de CO₂ em C0, podem estar atrelados ao uso de uréia para fertilização das unidades amostrais.

Em nosso experimento ficou evidente o potencial de redução nos fluxos ebulitivos de CO₂ em C2 para todos os tratamentos, todavia, maiores médias de emissão foram observadas para os tratamentos de cultivo multitrófico integrado (TC10<TC5<1C15) demonstrando que a densidade de espécies cultivadas pode ser um ponto a afetar as emissões de GEE's, já que há um número maior de organismos no cultivo, fazendo com que haja maior aporte do gás por diversos processos metabólitos, acarretando numa ciclagem mais lenta desse gás. Uma entrada de carbono importante também está relacionada ao fitoplâncton, sendo as saídas de carbono provenientes da respiração e sedimentação desses organismos (YANG *et al.*, 2022), que conseguem, através do processo de fotossíntese, remover grande quantidade de CO₂ e injetar oxigênio na água durante o dia, em contrapartida, durante a noite contribuem para injeção de CO₂ no sistema. Assim, temos a clorofila *a* como uma medida importante para quantificar os ambientes aquáticos quanto a produtividade primária. Podemos observar que os níveis reduzidos de CO₂ em TC0 podem estar associados a esse fato, já que o tratamento apresentou a menor média de clorofila *a* dentre os tratamentos (124,24±111,27). Além da clorofila *a*, o pH da água também pode ser um indicador para as emissões de CO₂ (ZHANG *et al.*, 2020), porém em nosso estudo não tivemos diferenças significativas para este parâmetro.

No balanço geral do fluxo difusivo, tivemos maior absorção do CO₂, nas coletas C1 e C2, com absorção e fluxos diários negativos para as duas coletas, incluindo fluxos diurnos negativos em C1 (TC0, TC5 e TC10) e C2 (TC0 e TC10), o que pode ter sido ocasionado pela aeração constante durante todo o período experimental. Em TC15, apesar de baixos valores de emissão se comparado a coleta inicial, não observamos fluxos diários negativos, os quais indicam absorção do gás pelo sistema de cultivo. Isso pode estar relacionado ao fato de que nestas unidades havia mais organismos, por unidade de área, contribuindo para uma maior emissão de CO₂. Cultivos de camarão podem ser fonte antropogênica de CO₂ para a atmosfera, no entanto práticas de cultivo adequadas e otimizadas mitigam essas emissões, logo, taxas de conversão alimentar baixas e renovação adequada da água limitam os fluxos de CO₂ (AIME *et al.*, 2018).

4.4. Fluxos de N₂O

Um aumento nas emissões de óxido nitroso (N₂O), com exceção dos tratamentos de monocultivo, pode sugerir que a presença ou ausência de espécies específicas ou mesmo que o período de cultivo influencia na emissão ou absorção desse gás. Soares e Henry-Silva (2019) estudando fluxos de GEE em viveiros de camarão com diferentes densidades de cultivo numa região semiárida brasileira, observaram uma contribuição quantitativamente menor de NO₂ em relação aos outros gases, no entanto os autores verificaram o mesmo padrão de emissão em todos os tratamentos. Tian *et al.* (2023) verificaram que o cultivo de camarão costeiro a taxa de produção de N₂O foi maior no sedimento do que na coluna d'água. Portanto, em nosso estudo a presença do camarão nos tratamentos AMTI pode ter influenciado a liberação de N₂O nesses tratamentos, visto que a medida que se aumentava a densidade de cultivo, também aumentava o percentual de gás emitido.

É importante destacar que a temperatura da água pode contribuir para a emissão de GEE'S (PAUDEL *et al.* 2015; REINO *et al.*, 2017), sendo que temperaturas superiores a 15 °C contribuem para maior produção de N₂O (REINO *et al.*, 2017). Assim, é possível que temperaturas mais elevadas, próximas a 30°C, tenham influenciado o aumento nas emissões de N₂O na segunda coleta (C2) nos tratamentos com cultivo AMTI, já que tivemos temperaturas próximas a 30° C em todos os tratamentos. O N₂O é um poderoso gás de efeito estufa, portanto, conhecer o impacto das variações de temperatura e as mudanças nas emissões, podem ter implicações diretas para avaliar o impacto das atividades aquícolas e suas contribuições para o aquecimento global.

Além da temperatura, o oxigênio dissolvido pode contribuir nas emissões de N₂O (YANG *et al.*, 2023). Estudos demonstraram que a aeração em tanques de aquicultura podem contribuir para regulação e aumento da emissão de GEE'S (ZHAO *et al.*, 2021; YANG *et al.*, 2023), assim, águas bem oxigenadas podem limitar a produção de N₂O, este fato pode ter sido observado neste trabalho, com valores médios mais elevados de oxigênio dissolvido em TC0.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O metano (CH₄) desempenhou um papel secundário na contabilização das emissões totais de gases. Já o dióxido de carbono (CO₂), se destacou como o gás de maior representatividade. É importante destacar que os tratamentos de AMTI apresentaram emissões mais elevadas de óxido nitroso (N₂O), um gás com impacto significativo no efeito estufa. Pode-se concluir que os cultivos AMTI utilizando as espécies *C. macropomum* e *P. vannamei*, apresentaram maior potencial de emissão de gases em relação ao monocultivo, à medida que aumentou a densidade de cultivo. Assim, é fundamental desenvolver estratégias específicas de controle nas práticas de cultivo AMTI, visando a redução desses GEE's. Além disso, é importante destacar que os camarões, como organismos bentônicos, que revolvem o sedimento em busca de alimento, podem acelerar na liberação de gases de efeito estufa para a coluna d'água.

6. AGRADECIMENTOS

Este estudo recebeu apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIMÉ, J.; ALLENBACH, M.; BOURGEOIS, C.; LÉOPOLD, A.; JACOTOT, A.; VAN VINH, T.; NHO, N.T.; PATRONA, L.D; MARCHAND, C. Variability of CO₂ emissions during the rearing cycle of a semi-intensive shrimp farm in a mangrove coastal zone (New Caledonia). **Marine pollution bulletin**, v. 129(1), p. 194-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.025>

BOYD, C.E. Water quality in ponds for aquaculture Auburn. Alabama: **Alabama Agricultural Experiment Station**, 1990. 482p.

CONRAD, R.; KLOSE, M.; CLAUS, P.; ENRICH-PRAST, A. Methanogenic pathway, ¹³C isotope fractionation, and archaeal community composition in the sediment of two clear-water lakes of Amazonia. **Limnology and Oceanography**, v.55, 2010. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.2.0689>

DA SILVA, M.G.; PACKER, A.P.; SAMPAIO, F.G.; MARANI, L.; MARIANO, E.V.; PAZIANOTTO, R.A.; FERREIRA, W.J.; ALVALÁ, P.C. Impact of intensive fish farming on methane emission in a tropical hydropower reservoir. **Climatic Change**, v.150, p.195-210, 2018.

FANG, X., ZHAO, J., WU, S., YU, K., HUANG, J., DING, Y.; HU, T.; XIAO, S.; L., SHUWEI; ZOU, J. A two-year measurement of methane and nitrous oxide emissions from freshwater aquaculture ponds: Affected by aquaculture species, stocking and water management, **Science of The Total Environment**, v. 813, p. 151863, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151863>.

FAO (Fisheries and Aquaculture Department). The State of World Fisheries and Aquaculture. **Towards Blue Transformation**. Rome, FAO, 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>

FENG, J.; LIU, Y.; LI, F.; ZHOU, X.; XU, C.; FANG, F. Effect of phosphorus and potassium addition on greenhouse gas emissions and nutrient utilization of a rice-fish co-culture system. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 38034-38042, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12064-5>

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa pecuária municipal. IBGE (2022). Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/3940>>. Acesso em: 10 de out. 2023.

IGARASHI, M.A. Estudo sobre o cultivo de camarões marinhos Fortaleza: **SEBRAE**, 1995.

IWATA, H.; NAKAZAWA, K.; SATO, H.; ITOH, M.; MIYABARA, Y.; HIRATA, R.; TAKAHASHI, Y.; TOKIDA, T.; ENDO, R. Temporal and spatial variations in methane emissions from the littoral zone of a shallow mid-latitude lake with steady methane bubble emission areas. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 295, p. 108184, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108184>

LIU, S.W.; HU, Z.Q.; WU, S.; LI, S.Q.; LI, Z.F.; ZOU, J.W. Methane and nitrous oxide emissions reduced following conversion of rice paddies to inland crab-fish aquaculture in

Southeast China. **Environ. Sci. Technol.** 50, 633–642, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04343>

MACLEOD, M.; GERBER, P.; MOTTET, A.; TEMPIO, G.; FALCUCCI, A.; OPIO, C.; VELLINGA, T.; STEINFELD, H. Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains—A global life cycle assessment. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2013.

MACLEOD, M. J., HASAN, M. R., ROBB, D. H., & MAMUN-UR-RASHID, M. Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. *Scientific reports*, v. 10(1), p. 11679, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68231-8>

POTENZA, R. F.; QUINTANA, G. O.; CARDOSO, A. M.; TSAI, S. D.; CREMER, M. S., SILVA, F. B.; GRACES, I.; CARVALHO, K.; COLUNA, I.; SHIMBO, J.; SILVA, C.; SOUZA, E.; ZIMBRES, B.; ALENCAR A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T. Análise das Emissões Brasileiras de e suas Implicações para as metas Climáticas do Brasil 1970–2020 Gases de Efeito Estufa. **Revista Brasileira de Ecoturismo**, p. 630-645, 2021.

ROSS, B.; ROSS, L.G. The oxygen requirements of *Oreochromis niloticus* under adverse conditions. In: **Proceedings of the first International symposium on Tilapia in Aquaculture**. Tel Aviv University Press, 1983. p. 134-143.

SABU, E.A.; GONSALVES, M.J.; NAZARETH, D.; SREEPADA, R.A. Influence of environmental variables on methane related microbial activities in a tropical bio-secured zero-exchange shrimp culture system. **Aquaculture Reports**, v.22, p.100950, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100950>

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa, MG, SBCS/EMBRAPA/CNPS, v.5, p. 100, 2005.

SCHOTT, A.B.S.; WENZEL, H.; JANSEN, J.C. Identification of decisive factors for greenhouse gas emissions in comparative life cycle assessments of food waste management e an analytical review. **Journal of Cleaner Production**, v.119, p. 13-24, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.079>.

SOARES, D.C.E.; HENRY-SILVA, G.G. Emission and absorption of greenhouse gases generated from marine shrimp production (*Litopenaeus vannamei*) in high salinity. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 367-376, 2019.

TAN, L.; GE, Z.; ZHOU, X.; LI, S.; LI, X.; TANG, J. Conversion of coastal wetlands, riparian wetlands, and peatlands increases greenhouse gas emissions: A global meta-analysis. **Global Change Biology**, 26(3), 1638-1653, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.14933>

TUBIELLO, F.N.; SALVATORE, M.; CÓNDR GOLEC, R.D.; FERRARA, A.; ROSSI, S.; BIANCALANI, R.; FEDERICI, S.; JACOBS, H.; FLAMMINI, A. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. **Rome, Italy**, 2014.

TIAN, Y.; YANG, P. ; YANG, H. ; WANG, H. ; ZHANG, L. ; TONG, C. ; LAI, D.Y.F. ; LIN, Y. ; TAN, L. ; HONG, Y. ; TANG, C. ; TANG, K.W. Diffusive nitrous oxide (N₂O) fluxes across

the sediment-water-atmosphere interfaces in aquaculture shrimp ponds in a subtropical estuary: Implications for climate warming. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 341, p. 108218, 2023.

CHEN, Y.; DONG, S.; WANG, F.; GAO, Q.; TIAN, X. Carbon dioxide and methane fluxes from feeding and no-feeding mariculture ponds. *Environmental Pollution*, v.212, p. 489-497, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.039>

YANG, P.; TANG, K.W.; TONG, C.; LAI, D. Y.; ZHANG, L.; LIN, X.; LIN, Y. Conversion of coastal wetland to aquaculture ponds decreased N₂O emission: Evidence from a multi-year field study. **Water Research**, v.227, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119326>

YANG, L.; LU, F.; WANG, X.; DUAN, X.; SONG, W.; SUN, B., CHEN, S.; ZHANG, Q.; HOU, P.; ZHENG, F.; ZHANG, Y. Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117, no. D10, 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JD017362>

YANG, P.; ZHANG, Y.; LAI, D. Y.; TAN, L.; JIN, B.; TONG, C. Fluxes of carbon dioxide and methane across the water-atmosphere interface of aquaculture shrimp ponds in two subtropical estuaries: The effect of temperature, substrate, salinity and nitrate. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 1025-1035, 2018.

YANG, P.; TANG, K. W.; YANG, H.; TONG, C.; ZHANG, L.; LAI, D. Y.F.; HONG, Y.; TAN, L.; ZHU, W.; TANG, C. Contrasting effects of aeration on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions from subtropical aquaculture ponds and implications for global warming mitigation. *Journal of Hydrology*, v.617, p.128876, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128876>

PU, Y.; ZHANG, M.; JIA, L.; ZHANG, Z.; XIAO, W.; LIU, S.; ZHAO, J.; XIE, Y.; LEE, X. Methane emission of a lake aquaculture farm and its response to ecological restoration. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, v. 330, p. 107883, 2022.

YUAN, J.; XIANG, J.; LIU, D.; KANG, H.; HE, T.; KIM, S.; LIN, Y.; FREEMAN, C.; DING, W. Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture. **Nature Climate Change**, 9(4), 318-322, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0425-9>

YUAN, J.; LIU, D.; XIANG, J.; HE, T.; KANG, H.; DING, W. Methane and nitrous oxide have separated production zones and distinct emission pathways in freshwater aquaculture ponds. *Water Research*, v.190, p.116739, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116739>

ZHANG, L.; XIA, X.; LIU, S.; ZHANG, S.; LI, S.; WANG, J.; WANG, G.; GAO, H.; ZHANG, Z.; WANG, Q; WEN, W.; LIU, R.; YANG, Z.; STANLEY, E.H.; RAYMOND, P. A. Significant methane ebullition from alpine permafrost rivers on the East Qinghai-Tibet Plateau. **Nature Geoscience**, v. 13(5), p. 349-354, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0571-8>

ZHAO, J.; ZHANG, M.; XIAO, W.; JIA, L.; ZHANG, X.; WANG, J.; ZHANG Z.; XIE, Y.H.; PU, Y.N.; LIU, S.D.; FENG, Z.Z.; LEE, X.H. Large methane emission from freshwater aquaculture ponds revealed by long-term eddy covariance observation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 308, p. 108600, 2021.

CAPÍTULO IV- Taxa de sedimentação de material particulado e nutrientes no cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão branco do pacífico (*Penaeus vannamei*) em sistemas aquícolas integrados e monocultivo.

TAXA DE SEDIMENTAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO E NUTRIENTES NO CULTIVO DE TAMBAQUI E CAMARÃO BRANCO DO PACÍFICO EM SISTEMAS AQUÍCOLAS INTEGRADOS E MONOCULTIVO

RESUMO

Avaliamos as taxas de sedimentação de nutrientes e material particulado em cultivos de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em sistemas monocultivo e em sistemas de aquicultura multitrófica integrada (AMTI) de tambaqui com camarão branco do Pacífico (*Penaeus vannamei*) cultivados em tanques de alvenaria no semiárido brasileiro. O experimento foi desenvolvido por sete meses em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e três repetições, em um total de doze unidades experimentais, sendo eles: monocultivo de tambaqui (TC0 com 3 peixes.m⁻²) e cultivo multitrófico integrado de tambaqui e diferentes densidades de camarão (TC5 - 3 peixes.m⁻² e 5 camarões.m⁻², TC10 - 3 peixes.m⁻² e 10 camarões.m⁻² e TC15 - 3 peixes.m⁻² e 15 camarões.m⁻²). Três coletas (C0, C1 e C2) foram realizadas para quantificar o sedimento e nutrientes gerado nos sistemas de produção. Os parâmetros de qualidade de água mantiveram-se próximos ao ideal para a atividade. Os valores médios da taxa de sedimentação de material particulado e dos nutrientes não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos ao longo do período de cultivo, exceto para a taxa da amônia e carbono orgânico total que apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos na última coleta. Podemos concluir que as taxas de sedimentação de nutrientes e material particulado podem ser influenciadas pelo aumento da densidade de cultivo e tempo de estocagem. Outro aspecto relevante que contamos é que apesar dos camarões revolverem o sedimento e poderem causar a bioturbação, os mesmos não influenciaram no aumento das taxas de sedimentação nos sistemas multitróficos.

Palavras-chave: Aquicultura Multitrófica Integrada; Sustentabilidade; Manejo;

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, vem aumentando a preocupação sobre os resíduos e efluentes gerados pela atividade aquícola, sendo que estes podem impactar o ambiente negativamente se não houver uma destinação adequada dos mesmos. A exigência de utilização dos recursos sem trazer prejuízos ao meio ambiente é o motivo que fomenta a adoção de sistemas integrados (FAO, 2022). A "Aquicultura Multitrófica Integrada" (AMTI), ou cultivo de espécies aquáticas de diferentes níveis tróficos e com funções ecossistêmicas complementares (MARQUES *et al.*, 2016) vem sendo amplamente adotada nos últimos anos para especialmente para que os resíduos de uma espécie sejam utilizados como nutrientes para outras. Nesses sistemas, novas fontes de alimentos podem ser aproveitadas, e assimilados por espécies de níveis tróficos inferiores (LANDER *et al.*, 2012; CHOPIN, 2019; SICKANDER e FILGUEIRA, 2022; MORAIS *et al.*, 2023), além de melhoria na qualidade da água e potencial aumento de renda econômica.

Portanto, o conceito de aquicultura integrada é aos poucos adotado e, se implementado de forma correta, pode ser uma medida para mitigar os impactos negativos produzidos pela aquicultura intensiva, fazendo com que os cultivos aquícolas caminhem para o mais próximo da sustentabilidade (FAO, 2019). Os nutrientes como, a exemplo de nitratos, nitritos, amônia e fosfatos, são essenciais para o crescimento de organismos aquáticos, porém em concentrações elevadas, podem causar problemas ambientais, como o crescimento excessivo de algas, o que pode levar à eutrofização da água. Esses nutrientes são comumente drenados para o ambiente (PEREIRA *et al.*, 2013; OTTINGER *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2016; BESSA *et al.*, 2021), o que podem gerar prejuízos para os ecossistemas adjacentes. Já no ambiente de cultivo, pode ocorrer o processo de sedimentação de nutrientes, quando partículas em suspensão na água, incluindo nutrientes, sólidos orgânicos e inorgânicos, se acumulam no fundo do tanque.

O excesso de sedimentos e nutrientes na aquicultura, não só tem impactos negativos na qualidade de água e na produção, mas é uma preocupação ambiental, principalmente quando da devolução desse efluente para o ambiente. No semiárido brasileiro, alguns autores já discutiram sobre a sedimentação de nutrientes e material particulado em ambientes aquícolas nos mais diversos sistemas (MOURA *et al.*, 2014; CACHO *et al.*, 2020; BESSA *et al.*, 2021). Dessa forma, o objetivo deste estudo foi avaliar as taxas de sedimentação de nutrientes e material particulado no monocultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e em sistemas de

aquicultura multitrófica integrada (AMTI) de tambaqui com camarão branco do Pacífico (*Penaeus vannamei*) em uma região semiárida.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado no setor de Aquicultura pertencente a Universidade Federal Rural do Semi-Árido localizada em Mossoró, RN, região nordeste do Brasil, Latitude: 5°12'S e Longitude: 37°19' W (Figura 1).

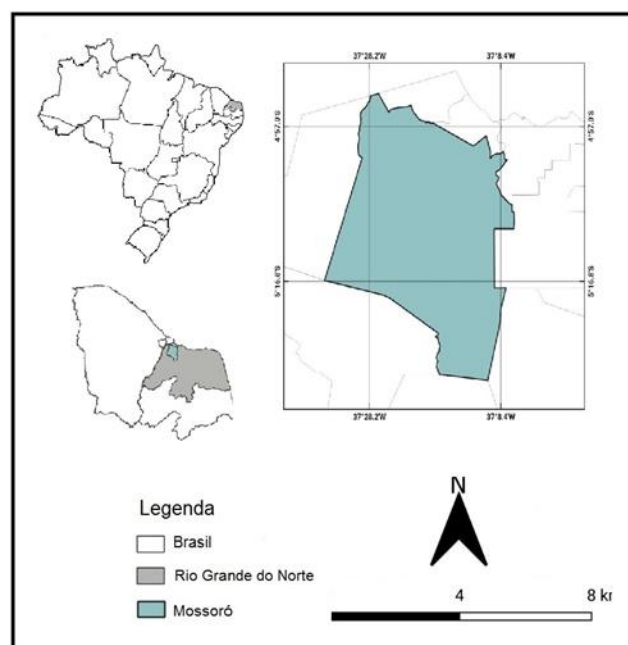


Figura 1. Localização da área de estudo. Legenda: Figura 1 - na cor branca, parte superior esquerda, está o mapa do Brasil com destaque para o estado do Rio Grande do Norte, abaixo, na cor cinza o mapa do estado do Rio Grande do Norte com destaque para a localização da cidade de Mossoró e na cor azul, destaque a direita, o mapa da cidade de Mossoró.

2.2 Delineamento Experimental e Manejo

No mês de agosto de 2021, doze unidades experimentais foram preparadas para receber os organismos cultivados. As unidades experimentais foram constituídas por tanques de alvenaria, com áreas de 7 m², uma profundidade de 1,40 m (efetivamente foram utilizados 1 m

de lâmina de água - 0,4 m de borda livre) e um volume aproximado de 7 m³. As unidades foram abastecidas com água salina numa concentração de 4 ppt e fertilizadas com uréia (3g.m⁻²), conforme necessidade após análise de água. A renovação ou reposição de água nos tanques foi realizada para compensar as perdas por evaporação. A oxigenação da água nos tanques foi constante, através do uso de sopradores e trocas com a superfície (vento). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e três réplicas, de acordo com a densidade de organismo cultivado e o tipo de cultivo (monocultivo e cultivo multitrófico integrado): TC0 - tratamento com três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5 - tratamento com três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10 - tratamento com três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15 - tratamento com três peixes e quinze camarões por metro quadrado (Figura 2).

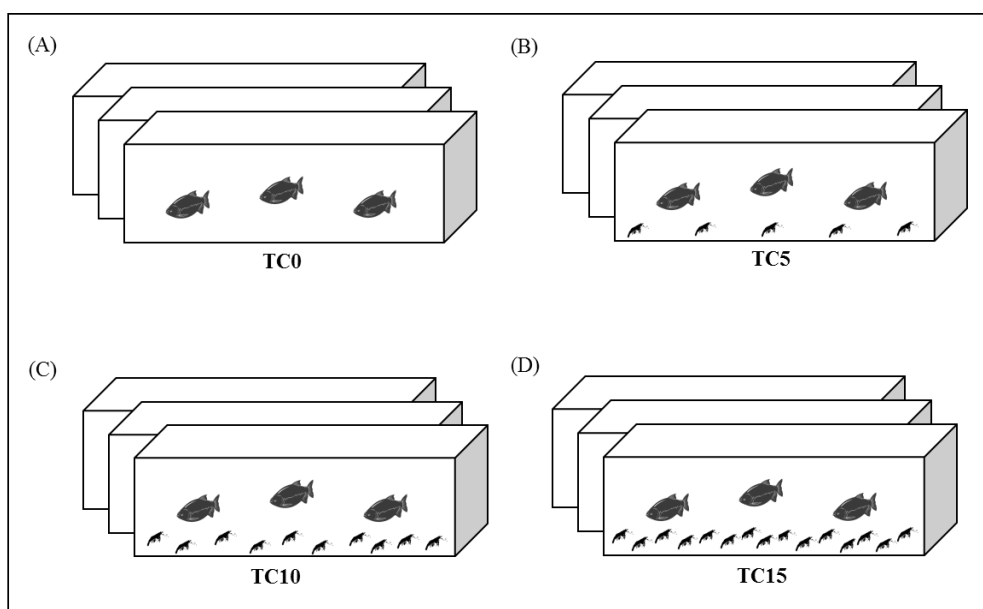


Figura 2. Representação esquemática dos sistemas de cultivo em tanques de alvenaria com três réplicas por tratamento, onde as letras maiúsculas representam: A) TC0 - monocultivo de tambaqui com 3 peixes.m⁻²; B) TC5 - cultivo multitrófico integrado de tambaqui e camarão branco do Pacífico com 3 peixes.m⁻² e 5 camarões.m⁻²; C) TC10 - cultivo multitrófico integrado de tambaqui e camarão branco do Pacífico com 3 peixes.m⁻² e 10 camarões.m⁻²; D) TC15 - cultivo multitrófico integrado de tambaqui e camarão branco do Pacífico com 3 peixes.m⁻² e com 15 camarões.m⁻².

Todas as unidades experimentais foram povoadas com o mesmo número de peixes, variando apenas a densidade de camarão de acordo com o tratamento. O sistema AMTI baseou-

se no emprego do tambaqui (*C. macropomum*), como espécie alvo. Além disto, o camarão branco do pacífico (*P. vannamei*) foi utilizado como espécie extrativa orgânica. Apenas os peixes foram alimentados, sendo que a fonte de alimento dos camarões foi basicamente composta de restos alimentares dos peixes, matéria orgânica decomposta (fezes, carapaça provenientes de muda e resíduos) e alimento natural do ambiente. O alimento foi fornecido diariamente de forma manual e consistiu de ração comercial extrusada, com frequência alimentar de acordo com a fase de crescimento em refeições espaçadas durante o dia e teor protéico e quantidade variando conforme o crescimento dos animais de acordo com a biomassa estimada e ajustada após as biometrias (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização das rações comerciais utilizadas no experimento.

Fase	PB (%)	EE (%)	P (%)	Granulometria (mm)
Fase 1 (alevino)	36	7	6	2-3
Fase 2 (juvenil)	32	6,5	6	4-5
Fase 3 (crescimento)	32	6,5	6	6-7

Legenda: PB (%): percentual de proteína bruta na ração; E.E (%): percentual de extrato etéreo; P (%): percentual de fósforo na ração.

2.2 Coleta de Dados

2.2.1 Variáveis limnológicas

As variáveis limnológicas que caracterizaram o cultivo (Tabela 2) foram coletadas ao longo do cultivo (quinzenalmente e mensalmente), mensuradas *in situ*, com auxílio de uma sonda multiparamétrica (HORIBA, U-50, Kyoto, Japan) e em ambiente laboratorial, seguindo o protocolo de cada análise.

Tabela 2. Valores médios e desvios-padrão das variáveis limnológicas mensuradas na coluna d'água nos tanques de cultivo nos diferentes tratamentos durante o período experimental.

Parâmetro	Tratamento			
	TC0	TC5	TC10	TC15
Temperatura (°C)	29,0±1,3 ^a	29,1±1,4 ^a	29,0±1,3 ^a	29,0±1,4 ^a

pH	8,38±1,69 ^a	8,28±1,18 ^a	8,30±1,18 ^a	8,35±1,11 ^a
Transparência (cm)	29,0±8,3 ^a	28,9±6,5 ^a	28,4±6,9 ^a	29,2±7,3 ^a
Condutividade	6,1±1,4 ^a	6,0±0,9 ^a	5,9±0,9 ^a	6,2±1,0 ^a
Oxigênio Dissolvido (mg.L ⁻¹)	8,5±1,8 ^a	7,5±1,3 ^a	7,6±1,2 ^a	7,3±1,2 ^a
Saturação do oxigênio (%)	97,6±23,6 ^a	100,6±18,2 ^a	101,6±16,0 ^a	97,1±16,0 ^a
Sólidos totais dissolvidos (TDS)	3,9±0,9 ^a	3,9±0,6 ^a	3,8±0,5 ^a	3,9±0,6 ^a
Salinidade (g.L)	3,2±0,8 ^a	3,2±0,6 ^a	3,2±0,5 ^a	3,3±0,6 ^a
Clorofila a (µg.L ⁻¹)	115,6±111,2 ^d	315,6±296,6 ^a	221,2±317,2 ^b	173,7±141,0 ^c
Fósforo total(µg.L ⁻¹)	32,9±29,9 ^c	49,8±20,6 ^b	55,5±53,8 ^b	72,5±69,7 ^a
Nitrogênio total (mg.L ⁻¹)	2,6±0,01 ^b	4,6±3,97 ^a	2,7±1,0 ^b	4,5±5,2 ^a
Carbono Total (mg.L ⁻¹)	96,7±4,7 ^c	143,8±8,6 ^a	113,6±20,9 ^b	120,1±41,2 ^b

Legenda: TC0: tratamento com três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: tratamento com três peixes e cinco camarões por metro quadrado; TC10: tratamento com três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: tratamento com três peixes e quinze camarões por metro quadrado. Médias seguidas por letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre os tratamentos, pela ANOVA e teste de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

2.2.2 Taxas de sedimentação de material particulado e nutrientes

Para quantificar o sedimento gerado nos sistemas de produção, câmaras de sedimentação (Coletores de Tripton) foram instaladas nos tanques a 1,20 m de profundidade e três períodos distintos: antes, durante e ao final do experimento. As câmaras eram compostas por três cones de área de 76,97 cm², os quais continham um volume de aproximadamente 1 L de água deionizada por cone (para que não houvesse deposição de material antes do início da coleta) e permaneciam em pontos específicos dos tanques por até 72h.

As amostras coletadas na superfície e interior das câmaras de sedimentação eram armazenadas em frascos opacos e encaminhadas para laboratório para determinação de clorofila *a*, amônia, nitrito, nitrato, carbono total, orgânico e inorgânico, material particulado, nitrogênio total e fósforo total segundo métodos específicos.

Os cálculos das taxas de sedimentação foram feitos segundo descrito por Buffon *et al.*, (2009) e Bessa (2017). A concentração de material em suspensão foi expressa em mg/L e estimada pela equação:

$$C = (M2 - M1 / VF) \times 1000 \times 1000.$$

A taxa de sedimentação (TS) foi expressa em mg/cm²/dia e estimada pela seguinte fórmula:

$$TS = VC \times C / AC \times T.$$

Onde:

Vc = volume das câmaras de sedimentação (2,28 L);

Vf = volume filtrado (mL);

C = concentração de material em suspensão dentro das câmaras (mg/L);

Ac = área da abertura da superfície da câmara de sedimentação (76,97 cm²);

T = tempo em dias.

Os sólidos sedimentáveis foram estimados utilizando cones de Inhoff, onde as amostras da câmaras de sedimentação foram depositadas, registradas os volumes no cone e após um período de 45 min foi mensurado o volume de material sedimentado (ml.l⁻¹).

Tubos de ensaios (50 mL) previamente limpos e secos em estufa foram utilizados para coleta de água da superfície para análise de carbono total (CT), carbono orgânico total (COT) e carbono inorgânico total (CIT), em seguida foram encaminhados para laboratório onde foram analisadas utilizando um Analisador de Carbono VARIO-TOC.

2.2.3 Análise dos Dados

Os dados de valores médios para as taxas de sedimentação de material particulado e nutrientes, foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk's do programa computacional SISVAR 5.6 e avaliados utilizando uma Análise de Variância (ANOVA) e a posteriori o teste de Tukey para identificação de diferenças significativas entre os tratamentos para cada coleta ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS

Os valores médios da taxa de sedimentação de material particulado e dos nutrientes não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos ao longo do período de cultivo, exceto para a taxa da amônia e carbono orgânico total que apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos na última coleta. Para o material particulado, as médias de taxas de sedimentação variaram em todo período de cultivo de 0,31 a 11,92 mg.cm⁻².dia⁻¹. Houve uma tendência de crescimento durante as coletas em todos os tratamentos. O maior valor médio foi observado em TC15 durante C2, que compreendeu a coleta final do cultivo, sendo superior aos demais tratamentos (Figura 3a).

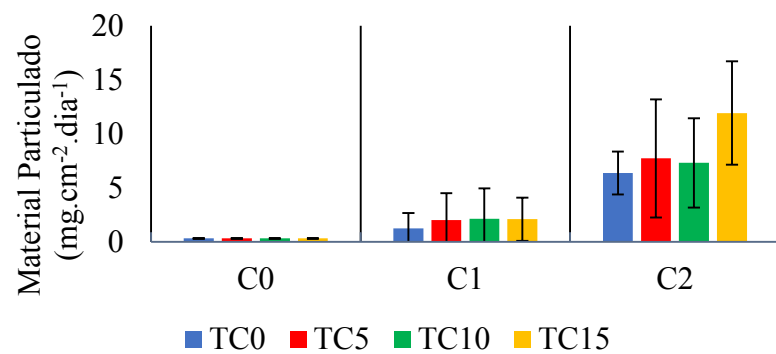
A médias da taxa de sedimentação da amônia apresentaram valores menores que 1 mg.cm⁻².dia⁻¹ em todos os tratamentos (Figura 3b). Houve um padrão de crescimento nas taxas de sedimentação da amônia de C0 para C1 em todos os tratamentos. No período C2, houve decréscimos nas taxas de sedimentação da amônia nos tratamentos TC0, TC10 e TC15, exceto TC5, o qual observou-se um aumento da taxa de sedimentação da amônia e diferença significativa em relação aos demais tratamentos. Para o nitrito, as taxas de sedimentação também apresentaram valores inferiores 1 mg.cm⁻².dia⁻¹ em todos os tratamentos (Figura 3c), apresentado os maiores valores na coleta C2, com maior valor observado em TC0 (0,005 mg.cm⁻².dia⁻¹). Já o nitrato apresentou taxas de sedimentação crescentes durante as coletas. Os maiores valores foram observados em C2 em todos os tratamentos, porém nenhum valor foi superior a 0,005 mg.cm⁻².dia⁻¹ (Figura 3d).

Para a taxa média de sedimentação do nitrogênio total (Figura 3e), foi verificado um padrão de estabilidade TC0 em todos os períodos de coleta. As taxas foram mais elevadas em TC5 e TC15, durante o C2, que corresponde ao período final de cultivo. As taxas de sedimentação do fósforo variaram nos tratamentos ao longo das coletas (Figura 3f). Em C1, a taxa do fósforo foi superior em TC0 (0,11 mg.cm⁻².dia⁻¹). Já em C2, houve uma estabilidade nas taxas, exceto para TC15, que apresentou valor superior aos demais tratamentos (0,07 mg.cm⁻².dia⁻¹).

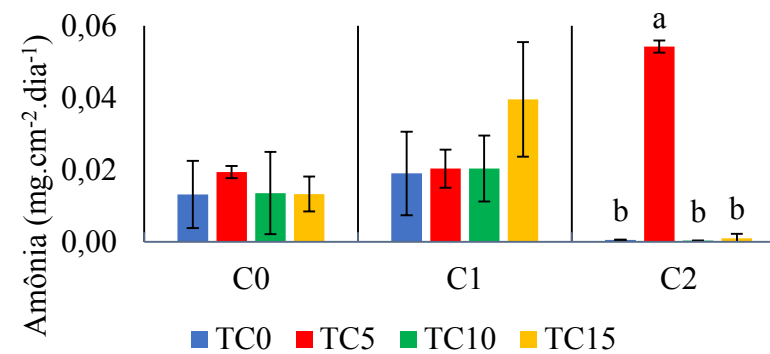
Para as taxas de sedimentação do carbono orgânico total (COT), foram observadas variações em todos os tratamentos nos períodos C1 e C2 (Figura 3g). As maiores médias foram observadas em C1 para os tratamentos TC5 (1,08 mg.cm⁻².dia⁻¹) e TC10 (0,98 mg.cm⁻².dia⁻¹) respectivamente. Já em C2, os tratamentos TC15 e TC5 tiveram taxas superiores aos demais, sendo que o TC15 não diferiu do TC5, porém diferiu dos demais tratamentos neste período. Já as taxas de sedimentação de carbono inorgânico total (CIT) (Figura 3h), os maiores valores

foram observados em C2, onde TC5 qual apresentou o maior valor médio entre os tratamentos ($0,74 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e TC0, o qual apresentou o menor valor médio ($0,56 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

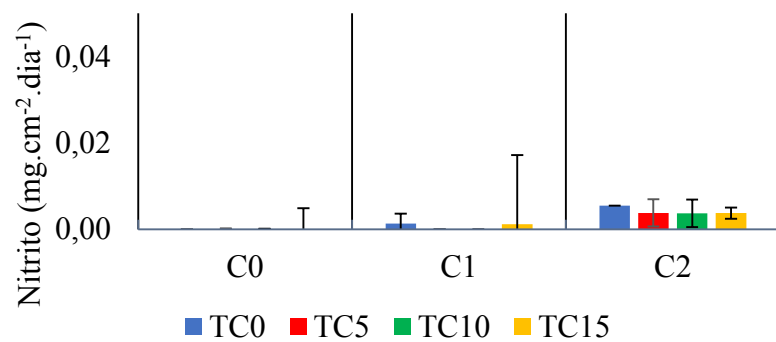
a)



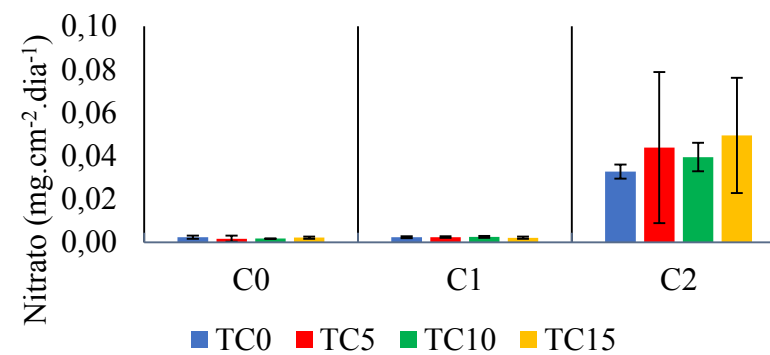
b)



c)



d)



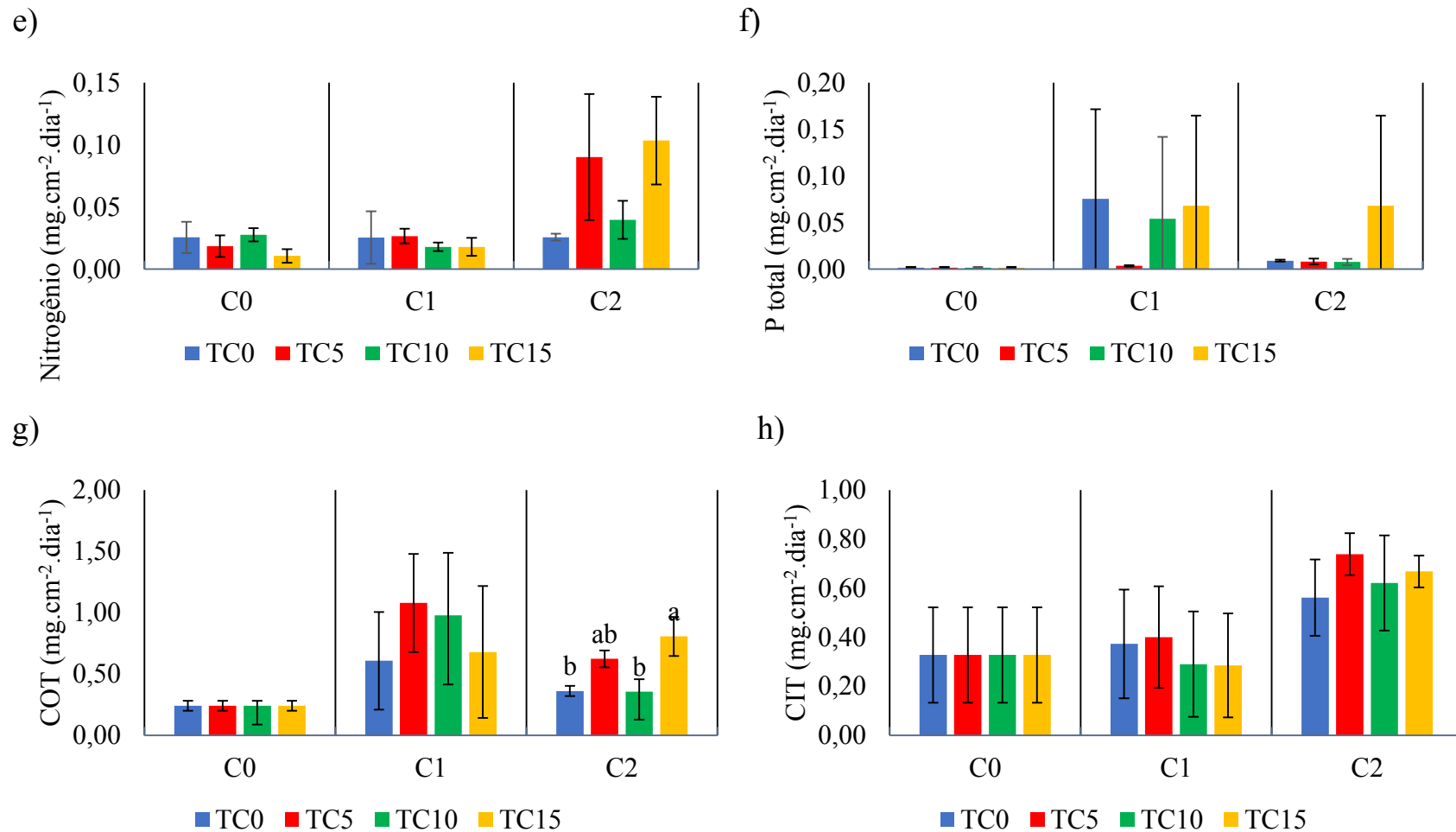


Figura 3. Valores médios das taxas de sedimentação de a) material particulado; b) amônia; c) nitrito; d) nitrato; e) nitrogênio total; f) fósforo total; g) carbono orgânico total; e h) carbono inorgânico total para os diferentes tratamentos em cada coleta. Onde: C0: primeira coleta; C1: coleta do meio do cultivo; C2: coleta do final do cultivo; TC0: três peixes e zero camarão por metro quadrado; TC5: três peixes e cinco camarões por metro

quadrado; TC10: três peixes e dez camarões por metro quadrado; TC15: três peixes e quinze camarões por metro quadrado. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos, pela ANOVA e teste de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

4. DISCUSSÃO

Os resultados demonstram um aumento das taxas de sedimentação de material particulado e nutrientes nos sistemas de cultivo ao longo do período experimental. No entanto, não foram observadas diferenças entre o monocultivo e os sistemas de multitróficos, quanto as taxas de sedimentação de material particulado e as taxas da maioria dos nutrientes analisados, o que é algo positivo para um sistema multitrófico com camarões, visto que esses organismos por meio da bioturbação podem dispersar para a coluna d'água partículas sólidas resultantes da escavação e alimentação, interferindo na ciclagem de nutrientes e nas taxas de sedimentação (ALLER 2001; MEYSMAN *et al.*, 2006; MICHAUD *et al.* 2006; NIZZOLI *et al.*, 2007; ADÁMEK e MARŠÁLEK 2013). De fato, Zhong *et al.* (2015), investigando os efeitos da bioturbação de *P.vannamei* na interface sedimento-água, constataram que a dinâmica do nitrogênio bentônico foi pouco influenciada pelo revolvimento do sedimento por indivíduos dessa espécie.

Um aumento na taxa de sedimentação em TC15 pode estar associado a maior densidade de estocagem de organismos nesses tanques. Pillay (2004) aponta que cerca de 30% da ração ofertada é drenada para a água. Bessa *et al.* (2021), observaram que no cultivo de camarões marinhos, densidades de estocagens elevadas aliado a quantidade de alimentos ofertado, influenciaram as taxas de sedimentação de nutrientes. Cacho *et al.* (2020), verificaram que o aumento nas taxas de sedimentação de nutrientes e material particulado de cultivos em tanques rede, tiveram como principal razão a quantidade de excretas e ração não consumida. Moura *et al.* (2014) relataram que o aumento gradual da ração no sistema de cultivo de peixes em tanque rede podem ter influenciado nas taxas de sedimentação. Esses resultados estão em concordância com os observados no presente trabalho, indicando que à medida que ocorre aumento da biomassa e, conseqüentemente aumento da alimentação artificial, há aumento na taxa de sedimentação de material particulado.

As taxas dos compostos nitrogenados foram reduzidas durante todo o período experimental. A dinâmica observada nas taxas de sedimentação da amônia, indicaram uma redução de amônia ao final do experimento em todos os tratamentos, exceto em TC5. O aumento na taxa de sedimentação de amônia em TC5, provavelmente ocorreu pelo aumento da oferta de alimento e maior perda para o meio. Além disso, esse foi o tratamento que apresentou maior média de clorofila a de todo o período experimental (315,6 $\mu\text{g.L}^{-1}$), o que também pode ter contribuído para aumento nas taxas de amônia, devido a maior decomposição de matéria orgânica. Cavalcante Júnior *et al.* (2021) observaram que elevados valores de amônia no cultivo

de peixes e na etapa de sedimentação foram oriundos de restos de ração e excretas. Portanto, é necessário investigar as causas dessas variações para considerar medidas de manejo adequado para a densidade em questão.

No presente trabalho, os valores de nitrato foram maiores que de nitrito, o que indica que as bactérias nitrificantes juntamente com o oxigênio dissolvido estavam atuando na conversão dos compostos nitrogenados. Nossas observações corroboram com as de Bessa *et al.* (2021), que verificaram taxas de sedimentação de nitrato superiores às do nitrito e da amônia no cultivo de camarão. Jiann-Chu e Chi-Yuan (1992) verificaram diminuição da taxa de excreção de amônia a medida de ocorria o aumento da salinidade, ao mesmo tempo em que o aumento da concentração de amônia elevava a taxa de consumo de oxigênio.

Taxas de sedimentação mais elevadas de N-total ao final do cultivo podem estar ligadas ao aumento de alimentação conforme ocorreu o aumento da biomassa, acarretando também em maior perda de alimento para o ambiente. Alguns autores têm relatado mudanças fisiológicas devido a temperatura da água. Schmidt-Nielsen (2010) sugerem que o aumento da temperatura da água modifica as taxas de atividade enzimática. Guo e Li (2003) relatam que temperaturas de águas tropicais ocorre aceleração do metabolismo animal, reduzindo a metabolização de compostos, e consequentemente uma menor eficiência na utilização de nutrientes da ração. No presente trabalho tivemos temperaturas médias em torno de 29°C, o que pode ter favorecido alterações nas taxas de sedimentação de nutrientes.

As taxas de sedimentação do fósforo variaram nos tratamentos ao longo das coletas, possivelmente devido à alimentação intensiva dos organismos cultivados ao longo do cultivo. Em C1 foi notado um aumento no tratamento TC0, com menor densidade de organismos cultivados. A taxa de sedimentação do fósforo também pode ter sido influenciada pela presença de partículas sólidas na água, fato observado no tratamento de maior densidade de organismos cultivados. Em TC15, durante o C2, constatamos a maior média de sólidos totais dissolvidos em comparação com os demais tratamentos. No presente trabalho, observamos taxas de sedimentação de fósforo inferiores as observadas por Moura *et al.* (2014), Cacho *et al.* (2017) e Bessa *et al.* (2021), que verificaram taxas de sedimentação para este nutriente de 113, 315 e 113 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{dia}$ respectivamente. Todavia o tipo de ambiente e sistema de cultivo eram diferentes, o que pode inferir valores médios diferentes, assim, uma entrada elevada de fósforo nas diferentes etapas do cultivo pode acarretar num aumento das taxas de sedimentação desse nutriente. Ainda, a variação nos valores de clorofila *a* pode ser interpretada como um indicativo de que o aporte de nutrientes, em particular, o fósforo, influencia diretamente a composição do fitoplâncton, evidenciado pelas variações nos valores de clorofila *a* e corroborando com os

achados de Casé *et al.* (2008), que relataram que um elevado aporte de nutrientes afetou a densidade e a composição planctônica durante o período de cultivo de camarão no nordeste brasileiro.

As taxas de sedimentação do carbono variaram em todos os tratamentos durante os períodos de coleta. Essas variações também foram observadas por Moura *et al.* (2014) no cultivo de tilápia em tanques-rede e Bessa *et al.* (2021) no cultivo de camarão em viveiros escavados, quando houve um aumento nos níveis de carbono inorgânico total (CIT) e carbono orgânico total (COT) ao longo do ciclo de produção. O aumento do COT nos tratamentos TC5 e TC15 provavelmente tem relação com o aumento de resíduos que e consequentemente elevando as taxas de sedimentação da forma orgânica do carbono. Cacho (2017) verificou que em um reservatório com cultivo de peixes, elevou a taxa de sedimentação de COT, acima das taxas naturais do reservatório, porém não verificou influência do CIT. Assim, fatores como a densidade de organismos cultivados, a quantidade de ração fornecida e a atividade microbiana no sedimento podem influenciar essas variações deste nutriente nos tratamentos AMTI. Embora nosso estudo não tenha revelado diferenças significativas entre as taxas de sedimentação nos monocultivos e nos cultivos integrados, ele fornece indícios que o aumento da densidade de organismos cultivados desempenha um papel importante nas taxas de sedimentação de material particulado e nutrientes nos diferentes tratamentos, sugerindo que o aumento da densidade de cultivo é diretamente proporcional ao aumento das taxas de sedimentação. Podemos concluir que as taxas de sedimentação de nutrientes e material particulado podem ser influenciadas pelo aumento da densidade de cultivo e tempo de estocagem e que apesar dos camarões revolverem o sedimento em busca de alimento, por serem organismos detritívoros, os mesmos não influenciaram no aumento das taxas de sedimentação nos sistemas multitróficos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADÁMEK, Z.; MARŠÁLEK, B. Bioturbation of sediments by benthic macroinvertebrates and fish and its implication for pond ecosystems: a review. **Aquaculture International**, v. 21(1), p. 1-17, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10499-012-9527-3>
- ALLER, R. Transport and reactions in the bioirrigated zone. In *The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry*; Boudreau, B.P., Jørgensen, B.B., Eds.; Oxford University Press: New York, NY, USA, 2001
- BESSA JÚNIOR, A.B. (tese). Avaliação da sustentabilidade econômica, ambiental e social na criação do camarão marinho *Penaeus vannamei* em diferentes estratégias de manejo. 2017.
- BESSA JUNIOR, A.; FLICKINGER, D.; Henry-Silva, G.G. Sedimentation rates of nutrients and particulate material in pond mariculture of shrimp (*Penaeus vannamei*) carried out with different management strategies. **Aquaculture**, v. 3, p. 736307, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736307>
- BUFFON, A. G. M.; TAUKE-TORNISIELO, S. M.; PIÃO, A. C. S. Tempo de vida útil da represa velha da microbacia do córrego da barrinha, Pirassununga, SP, Brasil. **Arquivos do Instituto Biológico**, v.76, n.4, p.673-679, 2009.
- CACHO, J. C. S. (dissertação). O cultivo de Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em tanques-rede em reservatório do semiárido brasileiro é sustentável economicamente, socialmente e ambientalmente? 2017.
- CACHO, J.C.S.; MOURA, R.S.T.; HENRY-SILVA, G.G. Influence of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fish farming in net cages on the nutrient and particulate matter sedimentation rates in Umari reservoir, Brazilian semi-arid. **Aquaculture Reports**, v. 17, p. 100358, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100358>
- CHOPIN, T. A new economic study demonstrates that an Integrated Multi-Trophic Aquaculture operation is more profitable than salmon monoculture. **International Aquafeed**, 22. 14-15, 2019.
- CASÉ, M.; LEÇA, E. E.; LEITÃO, S.N.; SANTANNA, E.E.; SCHWAMBORN, R.; MORAES-JUNIOR, A.T. Plankton community as an indicator of water quality in tropical shrimp culture ponds. **Marine Pollution Bulletin**. n. 56, p. 1343–1352, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.02.008>
- CAVALCANTE JÚNIOR, V., ANDRADE, L. DO N., BEZERRA, L. N., GURJÃO, L. M.; FARIAS, W. R. L. Reúso de água em um sistema integrado com peixes, sedimentação, ostras e macroalgas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental**, 9, 118–122. 2005. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v9nsupp118-122>
- FAO. **Glossary of aquaculture terms. (2013)** Disponível em: <<http://www.fao.org/fi/glossary/aquaculture/default.asp>>. Acesso em: 30 jul. 2019.

FAO (Fisheries and Aquaculture Department). **The State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation.** Rome, FAO, 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>.

GUO, L.; LI, Z. Effects of nitrogen and phosphorus from fish cage-culture on the communities of a shallow lake in middle Yangtze River basin of China. **Aquaculture**, v.226, p.201–212. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00478-2](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00478-2)

CHEN, Jiann-Chu; LIN, Chi-Yuan. Effects of ammonia on growth and molting of *Penaeus monodon* juveniles. **Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology**, v. 101, n. 3, p. 449-452, 1992. [https://doi.org/10.1016/0742-8413\(92\)90068-I](https://doi.org/10.1016/0742-8413(92)90068-I)

LANDER, T. R.; ROBINSON, S. M.; MACDONALD, B. A.; MARTIN, J. D. Enhanced growth rates and condition index of blue mussels (*Mytilus edulis*) held at integrated multitrophic aquaculture sites in the Bay of Fundy. **Journal of Shellfish Research**, 31(4), 997-1007, 2012. <https://doi.org/10.2983/035.031.0412>

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**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 264–293, 2016. <https://doi.org/10.1080/23308249.2016.1169245>

MEYSMAN, F.J.R.; MIDDELBURG, J.J.; HEIP, C.H.R. Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea. **Trends Ecol Evol.**, v.21(12), p.688–695, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.08.002>

MICHAUD, E.; DESROSIERS, G.; MERMILLOD-BLODIN, F.; SUNDBY, B.; STORA, G. The functional group approach to bioturbation: II. The effects of the *Macoma balthica* community on fluxes of nutrients and dissolved organic carbon across the sediment–water interface. **J. Exp Mar Biol Ecol.**, v. 337, p.178–189, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.06.025>

MORAIS, A.P.M; SANTOS, I.L.; CARNEIRO, R.F.S.; ROUTLEDGE, E.A.B.; HAYASHI, L.; LORENZO, M.A.; NASCIMENTO VIEIRA, F. Integrated multitrophic aquaculture system applied to shrimp, tilapia, and seaweed (*Ulva ohnoi*) using biofloc technology. **Aquaculture**, v. 572, p. 739492, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739492>

MOURA, R. S. T.; LOPES, Y. V. A.; HENRY-SILVA, G. G. Sedimentação de nutrientes e material particulado sob influência de atividades de piscicultura no semiárido do Rio Grande do Norte. **Química Nova**, v.37, p.1283-1288, 2014. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140203>

NIZZOLI, D.; BARTOLI, M.; COOPER, M.; WELSH, D.T.; UNDERWOOD, G.J.C.; VIAROLI, P. Implications for oxygen, nutrient fluxes and denitrification rates during the early stage of sediment colonization by the polychaete *Nereis* spp. in four estuaries. **Estuarine, Coastal Shelf Sci.**, v. 75(1), p.125–134, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.035>

OTTINGER, M.; CLAUSS, K.; KUENZER, C. Aquaculture: Relevance, distribution, impacts and spatial assessments - A review. **Ocean & Coastal Management**, v. 119. p. 244 -266, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.10.015>

PEREIRA, L.A.; VENTURA, R.; PERBICHE-NEVES, G.; SILVA, M.D.; BOEGER, W.; OSTRENSKY, A. Effects of shrimp *Penaeus Vannamei* (Boone, 1931) cage farming on sediment nutrients in a subtropical estuary. **Braz. J. Aquatic Sci. Technol.** v.17, n2.p5-8, 2013.

PILLAY, T.V.R. Aquaculture and the environment. 2 ed. Oxford: Fishing News Books, p.199. 2004.

RIBEIRO, L. F.; EÇA, G. F.; BARROS, F.; HATJE, V. Impacts of shrimp farming cultivation cycles on microbenthic assemblages and chemistry of sediments. **Environmental Pollution**. v. 211, p. 307 - 315, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.031>

Schmidt-Nielsen, K. 2010. Fisiologia animal. 5ª ed. **Editora Santos**, São Paulo, 611 p.

SICKANDER, O.; FILGUEIRA, R. Factors affecting IMTA (integrated multi-trophic aquaculture) implementation on Atlantic Salmon (*Salmo salar*) farms. **Aquaculture**, v. 561, p. 738716, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738716>

ZHONG, D.; WANG, F.; DONG, S.; LI, L. Impact of *Penaeus vannamei* bioturbation on nitrogen dynamics and benthic fluxes at the sediment–water interface in pond aquaculture. **Aquaculture International**, v. 23, p. 967–980, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10499-014-9855-6>

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Nas condições experimentais desta pesquisa, os resultados do estudo apontaram que há sustentabilidade ambiental no monocultivo de tambaqui e cultivo AMTI de tambaqui e camarão. Porém, os sistemas AMTI demonstraram um maior potencial de emissão de gases em comparação com o monocultivo, especialmente à medida que a densidade de estocagem aumentou. Do mesmo modo, as taxas de sedimentação de nutrientes e material particulado podem ser influenciadas pelo aumento da densidade de cultivo e tempo de estocagem.

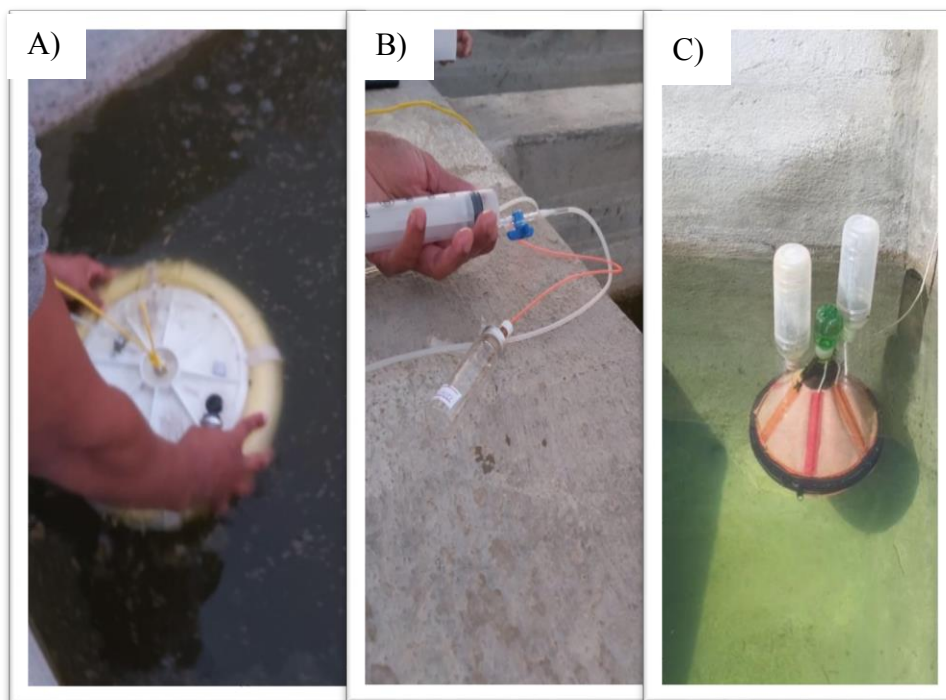
Como perspectivas para futuras pesquisas, aponta-se:

- Que novas pesquisas que venham a utilizar indicadores aquícolas para avaliação da sustentabilidade, considerem práticas de cultivo distintas, incluindo diferentes densidades de cultivo e espécies cultivadas;
- Que seja investigada a influência de diferentes combinações de densidades de tambaqui e camarão branco do Pacífico no desempenho do sistema AMTI;
- Recomenda-se que seja investigado se variações sazonais afetam a eficiência e sustentabilidade do sistema AMTI;
- Que estudos adicionais sejam realizados para monitorar os fluxos de gases em cultivos aquícolas de diversas regiões do país, considerando uma variedade de condições climáticas;
- Recomenda-se que sejam desenvolvidas estratégias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa nos sistemas AMTI;
- Recomenda-se ainda que seja investigado o papel do camarão como influenciador no fluxo de gases e nas taxas de sedimentação em diferentes densidades de cultivo.

APÊNDICE



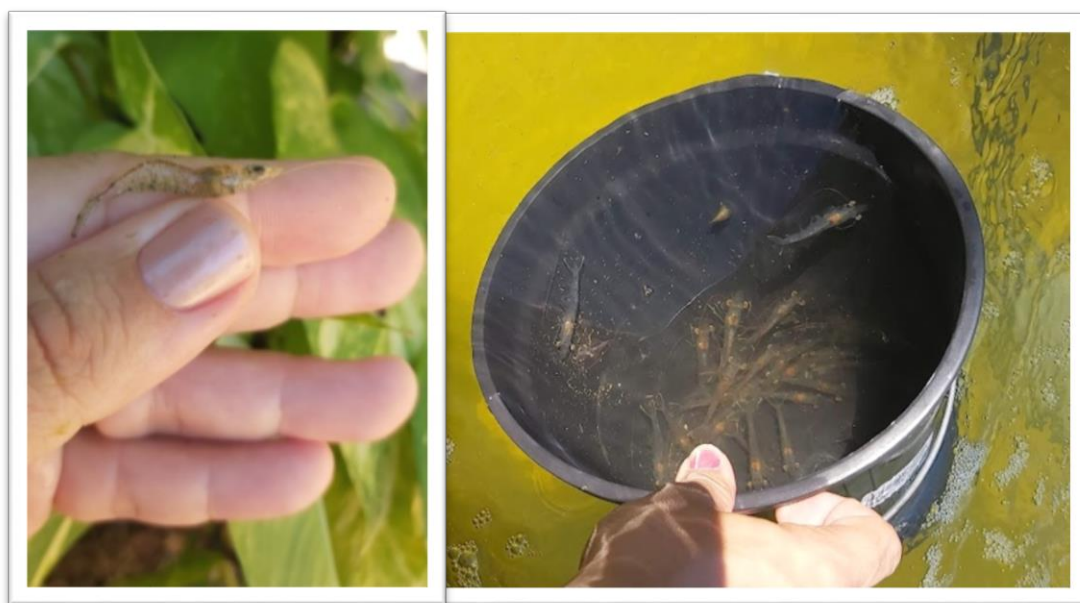
Apêndice 1. Tanques de alvenaria utilizados como unidades experimentais para os tratamentos.



Apêndice 2. Metodologia de coleta de dados de gases difusiva (A e B) e ebulitiva (C).



Apêndice 3. Alevinos de *C. macropomum* utilizados no experimento.



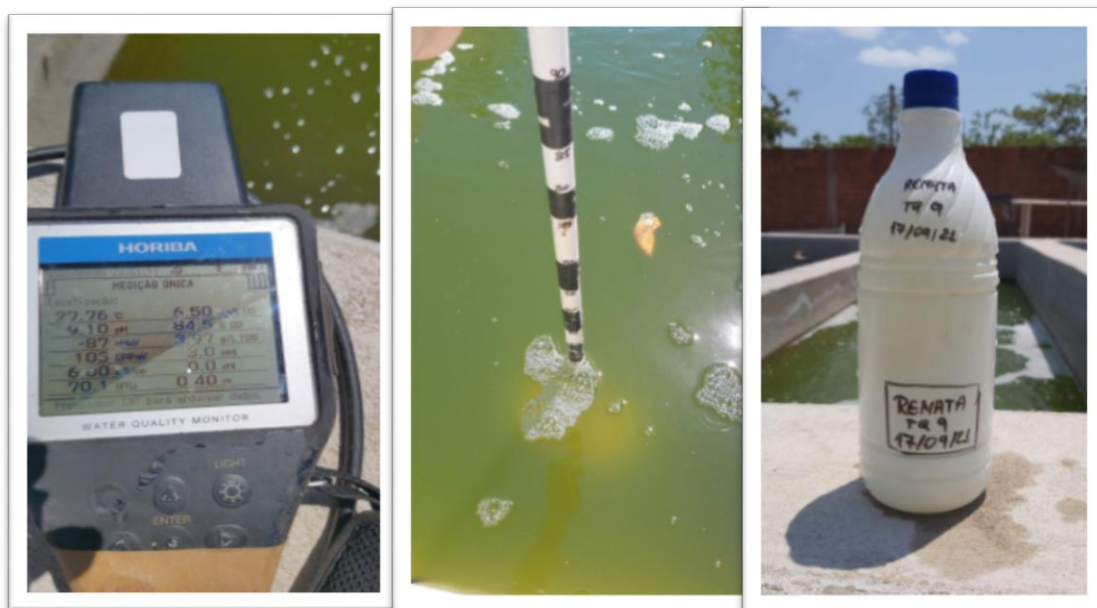
Apêndice 4. *P. vannamei* utilizados no experimento.



Apêndice 5. Procedimento de coleta de dados zootécnicos dos organismos cultivados no experimento.



Apêndice 6. Câmaras de sedimentação (coletores de tripton) instaladas nas unidades experimentais.



Apêndice 7. Coleta de parâmetros de qualidade de água.



Apêndice 8. Procedimentos laboratoriais para análise de água dos tanques de coleta.



Apêndice 9. Apresentação de resultados parciais da tese durante o XIX Simpósio Internacional de Carcinicultura e XVI Simpósio Internacional de Aquicultura durante a XIX Feira Nacional do Camarão 2023 (FENACAM'23).