

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP**

**CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP - CAUNESP**

CAMPUS DE JABOTICABAL

**Balço de energia no sistema de produo do lambari em monocultivo e em  
cultivos integrados com camarão-da-amazônia e curimatá**

Paulo Victor Leme Mantoan

*Biólogo*

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

2021

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP**

**CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP - CAUNESP**

CAMPUS DE JABOTICABAL

**Balço de energia no sistema de produo do lambari em monocultivo e em  
cultivos integrados com camarão-da-amazônia e curimatá**

**PAULO VICTOR LEME MANTOAN**

**Orientador: Prof. Dr. Wagner Cotroni Valenti**

**Co-orientador: Prof. Dr. Érico Tadao Teramoto**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Aquicultura do Centro de Aquicultura da Unesp – CAUNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Aquicultura.

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

2021

Mantoan, Paulo Victor Leme

M293b Balanço de energia no sistema de produção do lambari em monocultivo e cultivo integrado com camarão-da-amazônia e curimatã. / Paulo Victor Leme Mantoan. -- Jaboticabal, 2021  
vi, 86 p. : il, 3 ; 29 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura, 2021

Orientador: Wagner Cotroni Valenti

Co-orientador: Érico T. Teramoto

Banca examinadora: Alessandra S. Augusto, Gelcirene A. da Costa  
Bibliografia

1. Balanço de energia. 2. Aquicultura sustentável. 3. Lambari. 4. Cultivo integrado. 5. Sustentabilidade. I. Título. II. Jaboticabal-Centro de Aquicultura.

CDU 639.3



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



### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Balanço de energia no sistema de produção do lambari em monocultivo e em cultivos integrados com camarão-da-amazônia e curimatá.

AUTOR: PAULO VICTOR LEME MANTOAN  
ORIENTADOR: WAGNER COTRONI VALENTI  
COORIENTADOR: ÉRICO TADAO TERAMOTO

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

Prof. Dr. WAGNER COTRONI VALENTI (Participação Virtual)  
Setor de Carcinicultura / Centro de Aqüicultura da UNESP, CAUNESP, Jaboticabal-SP

Profa. Dra. GELCIRENE DE ALBUQUERQUE COSTA (Participação Virtual)  
Departamento de Pesca e Aqüicultura / Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE

Profa. Dra. ALESSANDRA DA SILVA AUGUSTO (Participação Virtual)  
Instituto de Biociências - Câmpus do Litoral Paulista / UNESP

Jaboticabal, 22 de fevereiro de 2021

Renda-se, como eu me rendi.  
Mergulhe no que você não conhece,  
como eu mergulhei.  
Não se preocupe em entender,  
viver ultrapassa qualquer entendimento.  
*(Clarice Lispector)*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família por todo o amor verdadeiro que já conheci e a todos os cientistas brasileiros, pois em tempos de escuridão na Ciência, caminharemos unidos, duplicando nossas forças.

A Ciência vencerá!

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>7</b>
<b>APOIO INSTITUCIONAL E FINANCEIRO.....</b>	<b>8</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO 1 – <i>Introdução Geral</i>.....</b>	<b>11</b>
Objetivo Geral.....	18
Objetivo Específicos.....	19
Referências.....	19
<b>CAPÍTULO 2 – <i>Balanço de energia no sistema de produção do lambari em monocultivo e em cultivos integrados com camarão-da-amazônia e curimatá</i>.....</b>	<b>24</b>
Resumo.....	24
Introdução.....	25
Material e Métodos.....	28
Resultados.....	39
Discussão.....	44
Conclusão.....	53
Referências.....	54
<b>CAPÍTULO 3 – <i>Determinação do saldo de calor a partir do balanço de energia em viveiros de aquicultura</i>.....</b>	<b>59</b>
Resumo.....	59
Introdução.....	60
Material e Métodos.....	62
Resultados.....	68
Discussão.....	71
Conclusão.....	78
Referências.....	79
<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS.....</b>	<b>84</b>

## AGRADECIMENTOS

À toda minha família que sempre está presente em cada passo nesta caminhada. Obrigado por me ensinarem o caminho do amor, do carinho e da honestidade, vocês serão sempre minhas inspirações.

Ao meu orientador Professor Wagner Valenti por me mostrar que aprendemos nas nossas maiores dificuldades, nos maiores desafios e que o caminho do cientista é encantador. Minha eterna admiração e gratidão.

Ao meu co-orientador Professor Érico Tadao pela participação neste trabalho e paciência em todas as discussões, muito obrigado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) *Processo FAPESP N° 2018/23993-9*, pela concessão da bolsa de mestrado e todo suporte financeiro necessário para a realização desse projeto de pesquisa;

Aos meus eternos amigos que fiz ao longo da graduação (Unesp - São Vicente), vocês estarão no meu coração por onde eu for; Aos amigos que Jaboticabal me deu, conheci pessoas que sempre estarão no meu coração. Em pouco tempo eu sei que tenho uma família, sinto saudade de vocês todos os dias!

Ao melhor setor do CAUNESP, Carcino, obrigado por cada conversa, diálogos, risadas e principalmente amizade. Gostaria que todas as pessoas pudessem viver a nossa rotina e a nossa amizade, VAI CARCINO!!

À toda equipe de funcionários e docentes do CAUNESP pela dedicação e apoio em todas as nossas pesquisas.

E a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desse projeto, sendo tecnicamente, cientificamente, emocionalmente etc, tenho certeza que sou uma pessoa abençoada por todos que estão em meu caminho.

## **APOIO FINANCEIRO E INSTITUCIONAL**

Agradeço ao Centro de Aquicultura da Unesp (CAUNESP) pelo apoio institucional. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fornecimento da bolsa de mestrado no período de 01/03/2019 a 30/04/2019. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), **Processo FAPESP N° 2018/23993-9** pelo fornecimento da bolsa de mestrado e apoio financeiro, de 01/05/2019 à 28/02/2021 durante toda a execução desta pesquisa.

## RESUMO

O cultivo integrado melhora a utilização dos recursos naturais e associado ao uso racional da energia pode aumentar a sustentabilidade na aquicultura. O conhecimento do balanço energético demonstra como a energia em suas diferentes formas é distribuída nos compartimentos ecológicos do sistema a partir das entradas e saídas de energia em Megajoule (MJ) para cada sistema de cultivo. Este experimento teve duração de dois meses, possuindo três tratamentos e quatro repetições, o monocultivo de lambari-do-rabo-amarelo (*Astyanax lacustris* - LM) e cultivos integrados de lambari-do-rabo-amarelo com camarão-da-amazônia (*Macrobrachium amazonicum* - LCa) e lambari-do-rabo-amarelo, camarão-da-amazônia e curimatá (*Prochilodus lineatus* - LCaC). Os lambaris foram alimentados com dieta comercial (32% PB) duas vezes ao dia e as demais espécies se alimentaram dos resíduos produzidos no sistema. Foram medidas as radiações solar e atmosférica para calcular o saldo de calor disponível nos viveiros, e coletadas amostras de água de entrada, infiltrada e saída, animais, ração, sedimento, CH<sub>4</sub> absorvidos e emitidos. Entradas de energia elétrica e do trabalho humano foram estimadas. Com base nesses dados, foram determinados o balanço energético dos três sistemas e o saldo de calor. A entrada total de energia foi igual em todos os sistemas, apresentando em média  $241,8 \pm 10 \times 10^3$  MJ ha<sup>-1</sup>. Embora não houve diferença na entrada total para os sistemas, a energia incorporada na biomassa total de interesse econômico é maior em LCaC com  $80,1 \pm 10 \times 10^3$  MJ ha<sup>-1</sup>. A saída total de energia foi maior no sistema com três espécies ( $463,4 \pm 31,1 \times 10^3$  MJ ha<sup>-1</sup>). A entrada total de energia a partir das radiações de ondas curtas (SW) e longas (LWa) foi  $1018,4 \pm 126,6$  MJ ha<sup>-1</sup> e a saída total de energia por meio da onda longa pela água (LWw), calor latente de evaporação ( $\lambda E$ ) e fluxo de calor sensível (C) foi  $261,6 \pm 42,1$  MJ ha<sup>-1</sup>. Assim, o saldo de calor é  $756,7 \pm 102,5$  MJ ha<sup>-1</sup>. Portanto, o cultivo do lambari integrado ao camarão-da-amazônia e o curimatá constitui um sistema produtivo mais eficiente energeticamente, resultando no aumento da sustentabilidade e o saldo de calor disponível caracteriza a capacidade dos viveiros em armazenar calor para o funcionamento de todo o ecossistema.

**Palavras-chave:** balanço de energia, aquicultura integrada, saldo de calor, radiações, lambari, camarão-da-amazônia, curimatá.

## ABSTRACT

Integrated systems improves the use of natural resources and associated with the rational use of energy can increase sustainability in aquaculture. The knowledge of the energy budget demonstrates how the energy in its different forms is distributed in the ecological compartments of the system from the inputs and outputs of energy in Megajoule (MJ) for each cultivation system. This experiment lasted two months, with three treatments and four replications, the monoculture of yellow-tailed lambari (*Astyanax lacustris* - LM) and integrated culture of yellow-tailed lambari with Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum* - LCa) and yellow-tailed lambari, Amazon river prawn and curimbatá (*Prochilodus lineatus* - LCaC). The lambaris were fed a commercial diet (32% CP) twice a day and the other species were fed with waste classified in the system. Were measured as solar and atmospheric radiation to calculate the budget of heat available in the ponds, and collected from incoming, infiltrating and leaving water, animals, feed, sediment, CH<sub>4</sub> absorbed and emitted. Electricity and human labor inflows were estimated. Based on these data, the energy budget of the three systems and the heat balance were determined. The total energy input was the same in all systems, it implements an average of  $241.8 \pm 10 \times 10^3$  MJ ha<sup>-1</sup>. Although there was no difference in the total input for the systems, the energy incorporated in the total biomass of economic interest is greater in LCaC with  $80.1 \pm 10 \times 10^3$  MJ ha<sup>-1</sup>. The total energy output was higher in the system with three species ( $463.4 \pm 31.1 \times 10^3$  MJ ha<sup>-1</sup>). The total energy input from short wave (SW) and long wave (LWa) radiation was  $1018.4 \pm 126.6$  MJ ha<sup>-1</sup> and the total energy output through the long wave through water (LWw), heat latent evaporation ( $\lambda E$ ) and sensitive heat flow (C) for  $261.6 \pm 42.1$  MJ ha<sup>-1</sup>. Thus, the heat budget is  $756.7 \pm 102.5$  MJ ha<sup>-1</sup>. Therefore, the system production of lambari integrated with the Amazon river prawn and curimbatá constitute a more energy-efficient production system, increasing sustainability and the available heat budget, highlighting the capacity of the ponds to store heat for the functioning of the entire ecosystem.

**Key words:** energy budget, integrated aquaculture, heat budget, radiation, lambari, Amazon river prawn, curimbatá.

## **CAPÍTULO 1**

### **Introdução Geral**

A aquicultura é o cultivo de organismos que passam pelo menos uma fase da vida em ambiente aquático, incluindo peixes, moluscos, crustáceos e plantas aquáticas para produzir alimentos, biomassa e óleos para a geração de energia, peixes e isca-viva para a pesca esportiva, organismos ornamentais e matéria prima para a indústria farmacêutica, de aditivos alimentares ou cosméticos. A atividade cresceu ao longo do desenvolvimento da humanidade e tem sido praticada por milênios, orrendo desde tempos antigos, na China, Egito e Roma (Costa-Pierce, 2010; Smith, 2012; Troell *et al.*, 2017). De acordo com Nash (2011), a linha do tempo da aquicultura pode ser dividida da seguinte forma: produção e coleta de alevinos de peixes na antiguidade (2000 AC-500 DC), cultivo de subsistência na Idade Média (500-1450), primeiros passos da ciência na aquicultura (1450-1900), início da aquicultura moderna (1750-1880), cultivos marinhos (1880-1920). Dessa maneira, a aquicultura global atingiu um desenvolvimento significativo por meio da diversidade e intensificação dos sistemas de produção, sendo denominada a revolução azul (Costa-Pierce, 2002; Simpson, 2011; Ahmed & Thompson, 2019). A produção mundial alcançou mais um recorde histórico em 2018, atingindo 114,5 milhões de toneladas e uma taxa de crescimento de 5,3% por ano durante o período de 2001-2018 (FAO, 2020).

No Brasil, foi estimado que, em 2019, a produção na aquicultura foi mais de 800 mil toneladas (Valenti *et al.*, 2021). Segundo a Associação Brasileira da Piscicultura – PEIXE BR (2020), 38% da produção foi proveniente do cultivo de peixes nativos. Os cultivos de espécies nativas causam poucos impactos ambientais e apresentam um caminho de desenvolvimento que pode ser mais adequado aos ecossistemas e mercados

locais (Naylor *et al.*, 2001; Ross *et al.*, 2008; Saint-Paul, 2017). A utilização de espécies exóticas na aquicultura pode resultar em ameaças ao meio ambiente, como invasões de genótipos, aumento da produção de híbridos interespecíficos e introdução de parasitas não-nativos, resultando em novas doenças na aquicultura brasileira (Nobile *et al.*, 2019). No Brasil, a tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) e a carpa comum (*Cyprinus carpio*) são exemplos de espécies introduzidas que se dispersaram rapidamente em todo o país (Ueda *et al.*, 2013). Isso aconteceu devido ao fácil cultivo, às tecnologias e às técnicas de gestão bem estabelecidas (Paula *et al.*, 1989). Na metade dos anos 90, foi expressivo o número de espécies nativas cultivadas, tais como pirapitinga (*Piaractus brachypomus*); matrinhã, piracanjuba e piraputanga (*Brycon spp.*); curimatã, curimbatá e curimba (*Prochilodus spp.*); e piaus (*Leporinus spp.*) em diferentes densidades (Saint-Paul, 2017). Atualmente, muitos pesquisadores mostraram a viabilidade produtiva de espécies nativas como: *Colossoma macropomum*, *Macrobrachium amazonicum*, *Prochilodus lineatus*, *Astyanax lacustris* em diferentes sistemas produtivos da aquicultura (Fonseca *et al.*, 2017; Dantas *et al.*, 2020; Franchini *et al.*, 2020).

O desenvolvimento de pesquisas direcionadas aos cultivos de espécies nativas e melhoria da sustentabilidade na aquicultura, levou este trabalho a utilizar as espécies: *Astyanax lacustris*, *Prochilodus lineatus* e *Macrobrachium amazonicum*, sendo conhecidas popularmente como lambari-do-rabo-amarelo, curimbatá e camarão-da-amazônia, respectivamente. O lambari-do-rabo-amarelo é encontrado nas bacias hidrográficas do alto Paraná, Paraguai, Tocantins, São Francisco e Rio Doce (Lima *et al.*, 2003; Lucena & Soares, 2016). Essa espécie pode alcançar 15 cm de comprimento, atingindo a maturidade sexual com 8 cm e se reproduzindo ao longo do ano (Rodrigues *et al.*, 1992; Sato *et al.*, 2006). A alimentação é ampla e com hábito oportunista onívoro,

comendo algas e microcrustáceos (Gomiero & Braga, 2003; Adrian *et al.*, 2006; Fonseca *et al.*, 2017). O curimatá é um peixe nativo da América do Sul, ocorrendo entre as bacias dos rios Paraná-Paraguay e Paraíba do Sul; realiza longas migrações para alcançar áreas adequadas de reprodução (Sivasundar *et al.*, 2001; Castro & Vari, 2004; Antonio *et al.*, 2007; Froese & Pauly, 2009). Tem hábito alimentar detritívoro e grandes populações ocorrem em diversas bacias hidrográficas desempenhando papel significativo no fluxo energético de sistemas aquáticos tropicais que eles habitam (Winemiller, 1996). O camarão-da-amazônia é amplamente distribuído em diversos sistemas aquáticos tropicais e subtropicais da América do Sul, ocorrendo nas bacias Orinoco, Amazônica, Araguaia-Tocantins, São Francisco e La Plata (bacias hidrográficas do Paraná e Paraguay) e em pequenos rios (Magalhães, 2000; 2001; 2002; Melo, 2003; Valencia & Campos, 2007). Essa espécie é amplamente explorada pela pesca artesanal na região norte e nordeste do Brasil, sendo consumida e comercializada por diferentes classes econômicas da população (Moraes-Riodades & Valenti, 2001). O hábito alimentar é onívoro oportunista e os machos de *M. amazonicum* possuem morfotipos (TC, CC, GC1 e GC2) que caracterizam a estrutura social da população no ambiente (Moraes-Valenti & Valenti, 2004). As três espécies apresentam potencial para o desenvolvimento da aquicultura.

O monocultivo é a principal forma utilizada na aquicultura, apesar de acarretar em preocupações ambientais e econômicas. Segundo Folke & Kautsky (1992) um monocultivo intensivo pode possuir as mesmas características de um ecossistema estressado, apresentando baixa eficiência no uso dos recursos e alta liberação de resíduos não utilizados. Isso significa que a homeostase do ambiente foi alterada por uma diminuição na eficiência dos processos ecológicos (Odum, 1985). Dessa forma, um

paralelo pode ser feito entre o monocultivo na agricultura com a aquicultura, pois este sistema intensivo leva a perda de biodiversidade, a degradação do solo e um impacto negativo sobre o meio ambiente (Peyraud *et al.*, 2014). Isso ocorre, por exemplo, com o excesso de matéria orgânica acumulada ao fundo dos viveiros ao longo do cultivo, favorecendo o crescimento de parasitas (Richard *et al.*, 2007; Alonso-Pérez *et al.*, 2010; McKindsey *et al.*, 2011; Molloy *et al.*, 2013; Lunstrum *et al.*, 2018). A degradação ambiental gerada pelas produções intensivas e a falta do manejo ecológico adequado, além de gerar um excesso de material não utilizado pela espécie, pode diminuir o desempenho produtivo do sistema. (Park *et al.*, 2018). Assim, a baixa eficiência dos sistemas em monocultivo, o esgotamento de recursos naturais e a busca por sistemas na aquicultura mais sustentáveis direcionam o avanço das pesquisas em otimizar a produção da aquicultura por meio dos sistemas integrados.

De acordo com a FAO (2020), a aquicultura integrada é definida como um cultivo de animais aquáticos compartilhando recursos (água, alimentos, manejo, etc.) com a agricultura, a agroindústria, os efluentes eutrofizados entre outras atividades. Assim, sistemas integrados de aquicultura otimizam o uso de recursos, contribuindo para a conservação dos mesmos, podendo explorar a interação sinérgica entre as espécies e o ambiente, resultando em processos de biomitigação (Marques *et al.*, 2016). A tecnologia que combina organismos com diferentes níveis tróficos para aumentar a utilização de nutrientes e energia acumulados nos compartimentos ecológicos do sistema de produção tem sido chamada genericamente de IMTA (integrated multi-trophic aquaculture) (Meijer & Avnimelech, 1999; Neori *et al.*, 2004; Joyni *et al.*, 2011). Os cultivos integrados que incluem camarões dulcícolas resultam em um nível mais estável de oxigênio, um aumento da eficiência alimentar, a redução de predadores

e um possível aumento do valor total despedido por agregar uma espécie de alto valor (New, 2002). As funções ecológicas complementares das espécies são as características mais importantes dos cultivos integrados. Então, usaremos a definição de aquicultura integrada para o cultivo de espécies em um mesmo viveiro que ocupem diferentes nichos ecológicos, combinando a proporção adequada de organismos com a maximização do uso de recursos para uma diminuição da liberação de poluentes nos ecossistemas adjacentes e aumento da sustentabilidade (Boyd *et al.*, 2020).

O termo sustentabilidade é caracterizado por diferentes definições, sendo amplamente utilizado em propagandas, empresas, produtos, sistemas de produção etc, e muitas vezes não é fundamentado (Kimpara *et al.*, 2012; Grunert *et al.*, 2014). A sustentabilidade está associada às necessidades do homem para a sobrevivência da própria espécie, e discussões acerca desse tema ganharam visibilidade. Assim, para a criação de uma nova tecnologia, é necessário buscar fontes energéticas alternativas mais sustentáveis que as usadas atualmente, baseadas em combustíveis fósseis. Essa necessidade é para evitar que os recursos naturais sejam degradados, esgotando esses estoques para as gerações futuras. Os processos produtivos foram baseados em preceitos da economia linear, ou seja: extraia a matéria-prima, produza, utilize e descarte. Por outro lado, com o aumento da população mundial, a demanda por mais tecnologias e a diminuição dos recursos finitos, foi criado um novo conceito econômico que embasou os sistemas de produção, a economia circular. A dinâmica da economia circular reconhece que, a partir das matérias-primas, a extração acontece de forma consciente (design), ocasionando a síntese dos produtos, a distribuição aos mercados, o consumo (utilização, reutilização, reparação), a coleta e a reciclagem (descarte somente de resíduos não-aproveitados), atingindo seu ponto máximo e recomeçando o ciclo.

Aplicar este conceito à aquicultura direciona o sistema a ser produtivo e rentável, resultando em benefícios por meio da otimização dos recursos naturais e financeiros e conservando os ecossistemas periféricos. A estabilidade dos sistemas aquícolas acontece a partir da inclusão de diretrizes de sustentabilidade (Valenti, 2008). As diretrizes estão relacionadas aos impactos ambientais, sociais e econômicos, pois um sistema produtivo estruturado somente em mercados financeiros não se sustenta ao longo do tempo (Valenti *et al.*, 2010). Portanto, a aquicultura sustentável apresenta um custo-benefício na produção dos organismos aquáticos, no qual se mantém a harmonia e interação contínua com os ecossistemas e comunidades locais (Valenti *et al.*, 2018).

Embora diferentes métodos possam avaliar a sustentabilidade do sistema produtivo, pouco se utiliza da energia presente nos compartimentos ecológicos para esta finalidade. O conceito de energia mais usual foi desenvolvido em meados do século XIX juntamente com o desenvolvimento das leis da termodinâmica. Desse modo, ficou estabelecido que “energia é a medida da capacidade de efetuar trabalho”, mas este conceito se aplica a alguns tipos de energia, como a mecânica e a elétrica. Embora esses tipos de energia sejam totalmente conversíveis em outras formas de energia, este conceito perde o sentido quando aplicado ao calor, pois este é parcialmente conversível em trabalho (Nogueira, 2001). A busca para encontrar um conceito de base comum a toda forma existente de energia direcionou as teorias de Maxwell (1872) para definir esse conceito como sendo, “energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança”. Neste contexto, o conceito se refere a mudanças de condições e a alterações do estado de um sistema, que por meio da energia se vence essas resistências. Assim, aquecer ou esfriar um volume de gás, transformar uma semente em uma planta e alimentos em tecidos de animais, são

processos que implicam no fluxo energético desses sistemas. A termodinâmica estuda a troca de matéria e energia pelo trabalho e pelo calor entre sistemas e compartimentos. Existem quatro leis que organiza a teoria da termodinâmica: lei zero, associada ao conceito de temperatura; primeira lei, associada ao conceito de energia; segunda lei, associada à entropia, e terceira lei ou postulado de Nernst, associada ao limite constante da entropia quando a temperatura Kelvin se aproxima de zero. Essas teorias e as diferentes fontes energéticas disponíveis nos dias de hoje, regem diversos sistemas essenciais para o desenvolvimento do ser humano na terra, como por exemplo, os sistemas de produção.

Como na agricultura, a demanda de energia na aquicultura pode ser representada pelas energias disponíveis nos recursos naturais (energia solar, ar, água, nutrientes orgânicos etc), transformados ou não, e pelas energias inseridas pelo homem como trabalho humano, fertilizantes, dietas, combustíveis etc (Beber, 1989). O crescimento populacional e a preocupação com as reservas energéticas aumentaram a importância do entendimento do quanto dela é utilizado para produzir qualquer produto (Santos *et al.*, 2007). Nesse contexto, o balanço de energia é uma ferramenta para quantificar todos os insumos utilizados e produzidos que são transformados em energia. De acordo com Campos & Campos (2004), o balanço energético auxilia na tomada de decisões relacionadas à adoção de técnicas e manejos para os sistemas, aumentando a eficiência de insumos e reduzindo os custos em sistemas de produção. A energia consumida pelos insumos aplicados para a realização do cultivo como ração, minerais, combustíveis fósseis, fertilizantes químicos, eletricidade, máquinas etc causam degradação de recursos ambientais com possíveis consequências para a humanidade (Martinho, 2016; Kumar *et al.*, 2019). As análises energéticas nos cultivos são essenciais para a melhor

utilização dos recursos naturais (Soni *et al.*, 2013). Portanto, aumentando a eficiência energética com tecnologias alternativas pode-se economizar energia e reduzir a emissão de gases do efeito estufa (Pishgar-Komleh *et al.*, 2012; Meena *et al.*, 2017a). A relação de entrada e saída de energia usualmente avalia a eficiência energética e ecológica diante dos impactos ambientais do sistema produtivo. A análise de energia é importante para conhecer a eficiência dos cultivos com potencial para uma produção limpa e sustentável (Rathke & Diepenbrock, 2006). Assim, a melhora da performance ambiental na aquicultura pode ser alcançada por meio da redução na quantidade de energia inserida nos cultivos, levando o sistema ao seu aproveitamento máximo. A combinação de espécies cultiváveis que compartilhem o mesmo ambiente pode maximizar os recursos aplicados, havendo uma diversidade de produtos e aumento de proteínas disponíveis para a população. A escolha por sistemas energéticos integrados mais eficientes poderá desacelerar a destruição de recursos naturais e promover a aquicultura sustentável. Dessa forma, sistemas produtivos exequíveis diante dos objetivos do desenvolvimento sustentável adotados pela Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU) em 2015, poderá classificar a aquicultura como o principal modo de produção de proteína do futuro para alimentação, devido ao crescimento da população mundial.

## **2.0 Objetivos**

### **2.1 Geral**

Avaliar o balanço de energia nos sistemas de monocultivo de *A. lacustris*, sistema integrado de *A. lacustris* e *M. amazonicum* e sistema integrado de *A. lacustris*, *M. amazonicum* e *P. lineatus*, seguindo a ideia de que a energia em cada compartimento pode ser diferente nos sistemas a partir da inserção de espécies com necessidades ecológicas complementares, compartilhando o uso de recursos disponíveis.

## 2.2 Específicos

- Medir a quantidade de energia que se acumula nos compartimentos que compõem os sistemas de monocultivo e os dois cultivos integrados.
- Avaliar se a quantidade de energia incorporada na produção difere do monocultivo de lambari para os tratamentos de cultivo integrado que apresentaram também camarão-da-amazônia e curimatá.

## 3.0 Referências

- Alonso-Pérez, F., Ysebaert, T., Castro, C.G. 2010. Effects of suspended mussel culture on benthic-pelagic coupling in a coastal upwelling system (Ría de Vigo, NW Iberian peninsula). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 382:96–107.
- Ahmed, N., Thompson, S. 2019. The blue dimensions of aquaculture: A global synthesis. *Science of the Total Environment*, 652:851-861.
- Anuário Peixe Br. 2020. Associação Brasileira de Piscicultura. Disponível em: <https://www.peixebr.com.br/anuario-2020/> Acesso em: 03 junho 2020.
- Antonio RR, Agostinho AA, Pelicice FM, Bailly D, Okada EK, Dias JHP (2007) Blockage of migration routes by dam construction: can migratory fish find alternative routes? *Neotropical Ichthyol* 5:177–184
- Barrington, K., Chopin, T., Robinson, S. 2009. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters. *Integrated mariculture: a global review*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, 529:7–46.
- Beber, J.A.C. 1989. Eficiência energética e processos de produção em pequenas propriedades rurais, Agudo, RS. 1989. 295p. Dissertação (Mestrado em Extensão Rural) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Boyd, C.E., D’Abramo, L.R., Glencross, B.D., Huyben, D.C., Juarez, L.M., Lockwood, G.S., McNevin, A.A., Tacon, A.G.J., Teletchea, F., Tomasso Jr, J.R., Tucker, C.S., Valenti, W.C. 2020. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51:578-633.
- Campos, A.T., Campos, A.T. 2004. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. *Revista Ciência Rural*, Santa Maria, 34:1977-1985.
- Castro, R.M.C., Vari, R. 2004. Detritivores of the South American family Prochilodontidae (Teleostei: Ostariophysi: Characiformes): a phylogenetic and revisionary study. *Smithsonian Contributions to Zoology*, 622:1-190.
- Castagnolli, N., 1996. *Aqüicultura para o ano 2000*. CNPq, Brasília, p. 1.
- Chopin, T., Robinson, S.M.C., Troell, M., Neori, A., Fang, J. 2008. Multitrophic Integration for Sustainable Marine Aquaculture. In: Jørgensen, S.E., Fath, B.D. (Eds.), *The Encyclopedia of Ecology, Ecological Engineering*, 3:2463–2475.
- Costa-Pierce, B.A. 2002. *Ecological Aquaculture: The Evolution of the Blue Revolution*. Blackwell Science Ltd, Oxford.
- Costa-Pierce, B.A. 2010. Sustainable Ecological Aquaculture Systems: The Need for a New Social Contract for Aquaculture Development. *Marine Technology Society Journal*, 44(3):88-112.

- Dantas, D.P., Flickinger, D.L., Costa, G.A., Batlouni, S.R., Moraes-Valenti, P., Valenti, E., 2020. Technical feasibility of integrating Amazon river prawn culture during the first phase of tambaqui grow-out in stagnant ponds, using nutrient-rich water. *Aquaculture* 516:73411.
- FAO. 2018. The State of World Fisheries and Aquaculture. Contributing to food security and nutrition for all. FAO, Rome.
- Folke, C., Kautsky, N. 1992. Aquaculture with its Environment: Prospects for Sustainability. *Ocean & Coastal Management*. 17:5-24.
- Fonseca, T., Costa-Pierce, B. A., Valenti, W. C. 2017. Lambari Aquaculture as a Means for the Sustainable Development of Rural Communities in Brazil. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 25(4):316-330.
- Franchini, A.C., Costa, G.A., Valenti, W.C., Pereira, S.A., Moraes-Valenti, P. 2020. Improving production and diet assimilation in fish-prawn integrated aquaculture, using *Iliophagus* species. *Aquaculture*, 521:735048.
- Froese, R., Pauly, D. 2009. FishBase. Available at <http://www.fishbase.org> (accessed 5 January 2021).
- Grunert, K.G., Hieke, S., Wills, J. 2014. Sustainability labels on food products: Consumer motivation, understanding and use. *Food Policy*. 44: 177–189.
- IBGE. 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Pecuária Municipal. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.
- Joynt, M.J., Kurup, B.M., Avnimelech, Y. 2011. Bioturbation as a possible means for increasing production and improving pond soil characteristics in shrimp-fish brackish water ponds. *Aquaculture*, 318:464–470.
- Kimpara, J.M., Zajdband, A.D., Valenti, W.C. 2012. Métodos para medir a sustentabilidade da aquicultura. EMBRAPA Meio Norte, Teresina. 72 p.
- Kubitza, F., 2016. Brazilian Aquaculture: Constraints and Challenges (Part 1), Vol. 19. *Global Aquaculture Advocate*, pp. 1–5.
- Kumar, S., Ravi, K., Amitava, D. 2019. Energy budgeting of crop-livestock/poultry integrated farming system in irrigated ecologies of eastern India. *Indian Journal of Agricultural Science*, 89:1017-1022
- Lima, F.C.T., Malabarba, L.R., Buckup, P.A., Pezzi da Silva, J.F., Vari R.P., Harold, A., Benine, R., Oyakawa, O.T., Pavanelli, C.S., Menezes, N.A., Lucena, Lucena, C.A.S., Malabarba, M.C.S.L., Lucena, Z.M.S., Reis, R.E., Langeani, F., Casatti, L., Bertaco, V.A., Moreira, C., Lucinda, P.H.F. 2003. Genera incertae sedis in Characidae, pp. 106–169. In: Check List of the Freshwater Fishes of South and Central America (Reis, R. E., S. E. Kullander and C. J. Ferraris Jr., Eds.), Porto Alegre, RS, Brazil: Edipucrs.
- Lucena, C.A., Soares, H.G. 2016. Review of the species of *Astyanax bimaculatus* “caudal peduncle spot” subgroup sensu Garutti & Langeani (Characiformes, Characidae) from the rio La Plata and rio São Francisco drainages and coastal systems of southern Brazil and Uruguay. *Zootaxa*, 4072:101–125.
- Lunstrum, A., McGlathery, K., Smyth, A., 2018. Oyster (*Crassostrea virginica*) aquaculture shifts sediment nitrogen processes toward mineralization over denitrification. *Estuaries Coast*. 41:1130–1146.
- Maciel, C.R., Valenti, W.C. 2009. Biology, Fisheries, and Aquaculture of the Amazon River Prawn *Macrobrachium amazonicum*: a review. *Nauplius*, 17(2):61-79.
- Magalhaes, C. 2000. Diversity and abundance of decapod crustaceans in the Rio Negro basin, Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brazil. p. 56-62. In: P. W. Willink; B. Chernoff; L. E. Alonso; J. R. Montambault and R. Lourival (eds) A Biological Assessment of the Aquatic

Ecosystems of the Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brazil. RAP Bulletin of Biological Assessment 18. Washington, Conservation International.

- Magalhaes, C. 2001. Diversity, distribution, and habitats of the macro-invertebrate fauna of the Rio Paraguay and Rio Apa, Paraguay, with emphasis on decapod crustaceans. p. 68-72. *In*: B. Chernoff; P. W. Willink and J. R. Montambault (eds) A Biological Assessment of the Aquatic Ecosystems of the Rio Paraguay Basin, Alto Paraguay, Paraguay. RAP Bulletin of Biological Assessment 19. Washington, Conservation International.
- Magalhaes, C. 2002. A rapid assessment of the decapod fauna in the Rio Tahuamanu and Rio Manuripi Basins, with new records of shrimps and crabs for Bolivia (Crustacea, Decapoda, Palaemonidae, Sergestidae, Trichodactylidae). *Revista Brasileira de Zoologia*, 19(4):1091-1103.
- Marques, H.L.A., New, M.B., Boock, M.V., Barros, H.P., Mallasen, M., Valenti, W.C. 2016. Integrated freshwater prawn farming: state-of-the-art and future potential. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 24(3):264–293.
- Martinho, V.J.P.D. 2016. Energy consumption across European Union farms: efficiency in terms of farming output and utilized agricultural area. *Energy*, 103:543-556.
- McKindsey, C.W., Archambault, P., Callier, M.D., Olivier, F., 2011. Influence of suspended and off-bottom mussel culture on the sea bottom and benthic habitats: a review. *Journal of Zoology*, 89:622–646.
- Meijer, L.E., Avnimelech, Y. 1999. On the use of micro-electrodes in fish pond sediments. *Aquacultural Engineering*, 21:71–83.
- Meena, R.S., Gogoi, N., Kumar, S. 2017. Alarming issues on agricultural crop production and environmental stresses. *Journal of Cleaner Production*, 142:3357-3359.
- Melo, A.G. 2003. Manual de identificação dos Crustacea Decapoda de água doce do Brasil. São Paulo, Edições Loyola/Museu de Zoologia, USP, 430 p.
- Molloy, S.D., Pietrak, M.R., Bricknell, I., Bouchard, D.A., 2013. Experimental transmission of infectious pancreatic necrosis virus from the blue mussel, *Mytilus edulis*, to cohabitating Atlantic Salmon (*Salmo salar*) smolts. *Applied Environmental Microbiology*, 79:5882–5890.
- Moraes-Rioldades, P.M.C., Valenti, W.C. 2001. Freshwater prawn farming in Brazilian Amazonia shows potential for economic, social development. *Global Aquaculture Advocate*, 4(5):73-74.
- Nash, C.E. 2011. *The History of Aquaculture*. Wiley-Blackwell, Iowa.
- Naylor, R.L., Williams, S.L., Strong, D.R. 2001. Aquaculture a gateway for exotic species. *Science*, 294:1655–1656.
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A.H., Kraemer, G.P., Halling, C., Shpigel, M., Yarish, C. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, 231:361–391.
- Nobile, A.B., Cunico, A.M., Vitule, J.R.S., Queiroz, J., Vidotto-Magnoni, A.P., Garcia, D.A.Z., Orsi, M.L., Lima, F.P., Acosta, A.A., Da Silva, R.J., Do Prado, F.D., Porto-Foresti, F., Brandão, H., Oliveira, C., Ramos, I.P. 2019. Status and recommendations for sustainable freshwater aquaculture in Brazil. *Reviews in Aquaculture*, 1-23.
- Odum, E.P. 1985. Trends expected in stressed ecosystems. *BioScience*, 35:419-422.
- Park, M., Shin, S.K., Do, Y.H., Yarish, C., Kim, J.K. 2018. Application of open water integrated multi-trophic aquaculture to intensive monoculture: A review of the current status and challenges in Korea. *Aquaculture*, 497:174-183.

- Paula, J., Morais-Filho, M., Bernardino, G., Melo, J., & Ferrari, V. 1989. Estudo da vegetação relacionada com a alimentação do “pacu” *Colossoma mitrei* Berg (1895) no Pantanal mato-grossense. *Acta Botanica Brasilica*, 2:73-96.
- Pincinato, R., Asche, F. 2016. The development of Brazilian aquaculture: Introduced and native species. *Aquaculture Economics & Management*, 20:312-323.
- Pishgar-Komleh, S.H., Ghahderijani, M., Sefeedpari, P. 2012. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions analysis of potato production based on different farm size levels in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 33:183-191.
- Peyraud, J.L., Taboada, M., Delaby, L. 2014. Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: a review. *European Journal of Agronomy*, 57:31-42.
- Pishgar-Komleh, S.H., Ghahderijani, M., Sefeedpari, P. 2012. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions analysis of potato production based on different farm size levels in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 33:183-191.
- Rathke, G.W., Diepenbrock, W. 2006. Energy balance of winter oilseed rape (*Brassica napus* L) cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. *European Journal of Agronomy*. 24:35–44.
- Ren, J.S., Stenton-Dozey, J., Plew, D.R., Fang, J., Gall, M. 2012. An ecosystem model for optimizing production in integrated multitrophic aquaculture systems. *Ecological Modelling*, 246:34–46.
- Richard, M., Archambault, P., Thouzeau, G., Desrosiers, G. 2007. Summer influence of 1 and 2 year old mussel cultures on benthic fluxes in Grande-Entrée lagoon, Îles-de-la-M.
- Ross, L.G., Palacios, C.A.M., Morales, E.J. 2008. Developing native fish species for aquaculture: the interacting demands of biodiversity, sustainable aquaculture and livelihoods. *Aquaculture Research*, 39(7):675–683.
- Saint-Paul, U. 2017. Native fish species boosting Brazilian’s aquaculture development. *Acta of Fisheries and Aquatic resources*, 5:1-9.
- Santos, H.P., Tomm, G.O., Spera, S.T., Ávila, A.L. 2007. Efeito de práticas culturais na conversão e no balanço energético. *Bragantia*, Campinas, 66:2. Disponível em < <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/908/90866214.pdf> > Acesso em: 01 nov. 2020.
- Simpson, S. 2011. The blue food revolution: making aquaculture a sustainable food source. *Scientific American* February, 54–61.
- Sivasundar A, Bermingham E, Ortí G (2001) Population structure and biogeography of migratory freshwater fishes (Prochilodus: Characiformes) in major South American rivers. *Mol Ecol* 10:407–417
- Smith, T. 2012. Greening the Blue Revolution: How History Can Inform a Sustainable Aquaculture Movement. Harvard Law School, University of Harvard, Boston.
- Soni, P., Taewichit, C., Salokhe, V.M. 2013. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in rainfed agricultural production systems of Northeast Thailand. *Agricultural Systems*, 116:25-36.
- Thia-Eng, C. 1997. Sustainable aquaculture and integrated coastal management. In: Bardach, J.E. (Ed.), *Sustainable Aquaculture*. John Wiley and Sons, New York, 77–200.
- Ueda, B.H., Karing, L.C., Takemoto, R.M., Pavanelli, G.C. 2013. Parasites of the freshwater fish trade in Brazil: science metric study. *Pesquisa Veterinaria Brasileira*, 33:851–854.
- Valencia, D.M., Campos, M.R. 2007. Freshwater prawns of the genus *Macrobrachium* Bate, 1868 (Crustacea: Decapoda: Palaemonidae) of Colombia. *Zootaxa*, 1456:1-44.
- Valenti, W.C. 2008. A aqüicultura brasileira é sustentável? *Aqüicultura & Pesca*, 34:36-44.
- Valenti, W.C., Kimpara, J.M., Preto, B.L., Moraes-Valenti, P. 2018. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecological Indicators*, 88:402-413.

- Valenti W.C., New M.B., Salin K.R., Ye, J. 2010. Grow-out systems - monoculture. In: *Freshwater Prawns: Biology and Farming* (ed by M.B. New, W.C. Valenti, J.H. Tidwell, L.R. D'Abramo & M.N. Kutty), pp. 154-179. Wiley-Blackwell, Oxford, UK.
- Valenti, W.C., Barros, H.P., Moraes-Valenti, P., Bueno, G.W., Cavalli, R.O. 2021. Aquaculture in Brazil: past, presente and future. *Aquaculture Reports*, 19:100-611.
- Wang, D. 2001. Development and application of shellfish aquaculture technology. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas*, 19:78–81.
- Winemiller K.O. 1996. Factors driving spatial and temporal variation in aquatic foodplain food webs. In: *FoodWebs: Integration of Patterns and Dynamics* (ed. by G.P. Polis & K.O. Winemiller), pp. 298-312. Chapman and Hall, New York, NY, USA.
- Yang, H., Wang, J., Zhou, Y., Zhang, T., Wang, P., He, Y., Zhang, F., 2000. Comparison of efficiencies of different culture systems in the shallow sea along Yantai. *Journal of Fishery Sciences of China*, 24:140–145

## CAPÍTULO 2

### **Balço de energia no sistema de produo do lambari em monocultivo e em cultivos integrados com camarão-da-amazônia e curimatá.**

#### **Resumo**

O trabalho determinou o balanço de energia por meio da acumulao energética nos compartimentos ecológicos para monocultivo e cultivos integrados, utilizando espécies com nichos complementares ao cultivo do lambari. Um experimento completamente casualizado foi realizado em doze viveiros de fundo natural, de aproximadamente 150 m<sup>2</sup>, 3 tratamentos e 4 repeties cada um: monocultivo de lambari-do-rabo-amarelo (*Astyanax lacustris*) (LM), cultivo integrado do lambari-do-rabo-amarelo e camarão-da-amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) (LCa) e lambari-do-rabo-amarelo, camarão-da-amazônia e curimatá (*Prochilodus lineatus*) (LCaC). Água de entrada, da despesca e infiltrada, sedimento, gases metano (CH<sub>4</sub>), rao, animais povoados e despescados, eletricidade e mão-de-obra foram coletados ao longo do experimento para análise energética. O desempenho zootécnico demonstrou a viabilidade da produo do lambari em ambos os sistemas. A taxa de converso alimentar foi melhor no cultivo com três espécies LCaC (1,37±0,29). A produtividade primária demonstrou que em todos os tratamentos a fotossíntese assimila um alto valor energético e muito carbono é assimilado pelos próprios produtores. O balanço de energia mostra que a entrada de energia total é mais expressiva nos compartimentos água de entrada, rao e mão-de-obra, sendo similar em todos os tratamentos. O sedimento foi o único compartimento ecológico de saída energética que diferiu significativamente, tendo a maior quantidade nos sistemas integrados (211,5.10<sup>3</sup>; 250,4.10<sup>3</sup>) comparado ao monocultivo (129.10<sup>3</sup>). A saída total de energia diferiu entre os tratamentos e demonstrou que LCa e LCaC são mais eficientes energeticamente do que LM, 356.10<sup>3</sup>±48,6.10<sup>3</sup>; 463,4.10<sup>3</sup>±31,1.10<sup>3</sup> e 276,7.10<sup>3</sup>±48,6.10<sup>3</sup> MJ/ha, respectivamente. Portanto, a aplicao do balanço de energia confirma a hipótese de que os cultivos integrados podem otimizar o uso de recursos e insumos aplicados aos sistemas produtivos na aquicultura e fornece subsídios para a expanso da lambaricultura mais sustentável.

**Palavras-chave:** cultivo integrado, balanço de energia, aquicultura sustentável, lambari, camarão-da-amazônia, curimatá.

## **Introdução**

Aquicultura é uma atividade em expansão e a cada ano se torna mais importante como fonte de renda e alimentos para a humanidade. Com a finalidade de melhorar a qualidade do desenvolvimento humano, a ONU estabeleceu na nova Agenda 2030, os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), que constituem uma lista de metas a serem cumpridas até 2030 (ONU, 2015). Desse modo, as atividades produtivas, devem se adequar a essa nova ordem internacional, e com isso direcionar o desenvolvimento da aquicultura dentro desses princípios. Neste sentido, a ideia de aquicultura sustentável vem ganhando expressividade e vários trabalhos publicados mostraram esse foco, por exemplo, a utilização de ferramentas para mensurar a sustentabilidade nos diferentes sistemas de produção (Samuel-Fitwi *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015; Valenti *et al.*, 2018).

Para tornar o manejo e o sistema produtivo mais sustentável na aquicultura, podemos estabelecer o cultivo de diferentes espécies compartilhando o mesmo espaço, água e outros recursos como um caminho para esse objetivo. A aplicação desta ecoengenharia exige que as necessidades ecológicas das espécies sejam complementares para resultar em um cultivo integrado. Um policultivo de peixes e camarões é caracterizado como um cultivo integrado se a utilização dos recursos naturais acontece de forma compartilhada entre as espécies (Marques *et al.*, 2016). Assim, o alimento pode ser ofertado para uma espécie enquanto que as demais utilizarão os resíduos produzidos e nutrientes disponíveis no sistema, aumentando sua eficiência de uso e tornando o cultivo em sistema integrado promissor (Chopin *et al.*, 2013).

O cultivo de espécies nativas reduz diversos impactos ambientais nos ecossistemas, como a disseminação de agentes patogênicos e os riscos de instalação de espécies exóticas no ambiente por escape (Naylor *et al.*, 2001; Ross *et al.*, 2008).

Assim, a utilização do lambari-do-rabo-amarelo (*Astyanax lacustris*), camarão-da-amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) e curimatã (*Prochilodus lineatus*) em cultivo integrado pode ser uma combinação para a produção com menor impacto ambiental. A primeira espécie habita a parte pelágica e possui hábitos alimentares oportunistas onívoros (Garutti, 2003; Fonseca *et al.*, 2017). A segunda apresenta um alto potencial para a aquicultura (New, 2005), é bentônica e associada a substratos, se alimentando da fauna bentônica e detritos (Magalhães, 2000; 2001; Maciel & Valenti, 2009). A terceira espécie se alimenta da comunidade planctônica quando jovens, tornando-se gradualmente detritívora e consumindo principalmente sedimentos inorgânicos, partículas orgânicas, algas e micro invertebrados da superfície de plantas ou do fundo de corpos de água (Bayo & Yuan, 1996; Fugi *et al.*, 2001). Portanto, o cultivo das três espécies permite a exploração de diferentes nichos ecológicos no interior dos viveiros e os produtores podem explorar diferentes mercados com esses três produtos.

O cultivo integrado do lambari com o camarão pode ser uma combinação interessante para produtores que focam no mercado de iscas vivas, este é o principal mercado para o lambari (Fonseca *et al.*, 2017) e os camarões de água doce são bastante utilizados como isca na pesca da corvina (*Plagioscion squamosissimus*) e tucunaré (*Cichla spp*) (Rodrigues, 2017), mas provém da coleta em ambientes naturais o que pode ocasionar o impacto ambiental. No entanto, estudos prévios mostraram que a quantidade de nutrientes acumulada no fundo do viveiro ao final de cultivos integrados de peixes pelágicos e camarões ainda é grande, o que possibilita a inclusão de mais uma espécie de hábito alimentar detritívoro (David *et al.*, 2017 a, b; Flickinger *et al.*, 2019; 2020 a, b). Resultados favoráveis foram encontrados na inclusão do curimatã (*Prochilodus lineatus*) em cultivo integrado de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e camarão-da-amazônia (Franchini *et al.*, 2020). A disponibilidade e os níveis elevados

de nutrientes e conseqüentemente de energia inseridos nos sistemas, abre mais uma oportunidade de maximização da produção com a adição do curimbatá visando o comércio de alevinos. Antoniutti *et al.* (1995), apontou o comércio de alevinos de curimbatá como uma atividade economicamente lucrativa, apresentando o preço de US\$ 14.00 por milheiro há mais de duas décadas. Essa situação permanece até o presente e a produção de alevinos dessa espécie vem crescendo com o seu uso em projetos de repovoamento realizados por empresas de produção de energia. Portanto, a inclusão do curimbatá em cultivos integrados pode ser uma alternativa para aumentar a utilização dos recursos naturais com responsabilidade e também a diversificação de produtos e mercados, assegurando a maior sustentabilidade para a aquicultura (Meriwether *et al.*, 1984; Hsieh *et al.*, 1989; Rhodes *et al.*, 2010; Valenti *et al.*, 2018).

Energia e sustentabilidade estão relacionadas principalmente porque para aumentar a sustentabilidade da aquicultura e melhorar a eficiência dos sistemas integrados é importante conhecer como a energia é aproveitada nos sistemas. Esta flui nos viveiros e outros sistemas de cultivo entre compartimentos bem definidos e se acumula de forma diferente em cada um deles. O uso da energia e o custo dela depende da fonte e quantidade de energia utilizada para a transformação em produto (Badiola *et al.*, 2018). Atualmente a quantificação, a eficiência energética e o balanço de energia em agroecossistemas é bastante investigado (Santos *et al.*, 2011; Choudhary *et al.*, 2017; Yadav *et al.*, 2017). A energia é adicionada nos diversos sistemas, como produtos denominados insumos energéticos. Ela visa aumentar os índices de produtividade e rentabilidade dos cultivos (Medeiros, 2011). Assim, o balanço de energia surge como uma ferramenta para quantificar e entender como a energia de entrada é fracionada para os diferentes compartimentos, assimilada em cada um deles e o quanto de energia sai do sistema, mensurando a energia utilizada na síntese do produto. Identificando a demanda

total de energia, é possível estabelecer a eficiência energética refletida pelo ganho líquido de energia por meio da relação de saída/entrada e consecutivamente o quanto é necessário para produzir um quilograma de determinado produto (Siqueira *et al.*, 1999).

Esse projeto foi desenvolvido em conjunto com outros quatro que analisaram a) a sustentabilidade ambiental, social e econômica dos três sistemas, por meio de indicadores de sustentabilidade; b) a contribuição das fontes de alimento disponíveis para as espécies cultivadas, por meio do uso de isótopos estáveis, c) o balanço de nitrogênio do sistema de monocultivo e dos dois sistemas de cultivo integrado, medindo quanto de nitrogênio se deposita nos compartimentos e d) o balanço de fósforo proveniente dos cultivos. Dessa forma, os sistemas poderão ser compreendidos como um todo por meio de trabalhos que se complementam e otimizam o uso das instalações e dos recursos destinados a pesquisa. Nesse projeto foram realizadas análises atuais e muito importantes para a sustentabilidade ambiental, para subsidiar pesquisas futuras e políticas públicas. Portanto este trabalho avaliou o balanço de energia no sistema de produção do lambaria a partir dos compartimentos ecológicos definidos em monocultivo e cultivos integrados que utilizaram espécies com necessidades ecológicas complementares.

## **2.0 Material e Métodos**

### **2.1 Área de estudo e manejo dos viveiros**

O experimento foi conduzido no Centro de Aquicultura da Unesp (CAUNESP), em Jaboticabal - SP, no Setor de Carcinicultura (21°15'22''S e 48°18'48''O). Utilizou-se doze viveiros experimentais retangulares de fundo natural, com área aproximada de 0,015 ha e profundidade média de 1 m. Inicialmente, os viveiros foram drenados, secos ao ar e abastecidos com água hipereutrófica submetida a filtragem mecânica

proveniente de duas represas. A utilização da água hipereutrófica em cultivos sem renovação não ocasiona problemas (Kimpara *et al.*, 2011; David *et al.*, 2017a, b; Dantas *et al.*, 2020). Durante o período experimental os viveiros permaneceram sem renovação de água, sendo utilizada a água de abastecimento apenas para repor as perdas por infiltração e evaporação. Em cada viveiro estava presente um aerador Bernauer, modelo B-500 Aquahobby monofásico – água doce para manter os níveis de oxigênio dissolvido na faixa adequada ao cultivo em situações de emergências.

## **2.2 Delineamento experimental e monitoramento da qualidade de água**

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, composto por três tratamentos e com quatro repetições. Os tratamentos utilizados foram: 1. Monocultivo do *A. lacustris*, na densidade de (50 ind.m<sup>-2</sup>) (LM); 2. Cultivo integrado (I) de *A. lacustris* (50 ind.m<sup>-2</sup>) e *M. amazonicum* (30 ind.m<sup>-2</sup>) (LCa); 3. Cultivo integrado do *A. lacustris* (50 ind.m<sup>-2</sup>), *M. amazonicum* (30 ind.m<sup>-2</sup>) e *P. lineatus* (10 ind.m<sup>-2</sup>) (LCaC). O ciclo de cultivo teve duração de 60 dias. Esse período foi suficiente para que o lambari e o camarão alcançassem o tamanho de aproximadamente sete e seis centímetros, respectivamente, para o comércio como isca viva. O curimbatá despescado possibilita sua comercialização como alevinos em cultivos de engorda ou para repovoamento dos ambientes naturais. As principais variáveis físicas e químicas de interesse para aquicultura foram monitoradas diariamente com sonda multiparâmetros YSI Professional Pro-Plus, sendo essas as seguintes variáveis: oxigênio dissolvido (mg/L), saturação de oxigênio (%), temperatura (°C), condutividade elétrica (µS.cm<sup>-2</sup>) e pH.

**Tabela 1.** Média  $\pm$  desvio padrão das variáveis da água monitoradas durante o ciclo de 60 dias nos diferentes tratamentos. Valores mínimo e máximo durante todo o período são mostrados entre parêntesis. Temp. = temperatura, OD = oxigênio dissolvido, condut. = condutividade, Pressão atm = pressão atmosférica, LM = lambari, LCa = lambari e camarão, LCaC = lambari, camarão e curimatã. Nenhuma variável diferiu estatisticamente entre os tratamentos.

	LM	LCa	LCaC
Temp (°C)	27,6 $\pm$ 0,1 (25,2 – 30,8)	27,6 $\pm$ 0,5 (25,2 – 31,1)	27,8 $\pm$ 0,1 (24,2 – 31)
OD(mg.L)	4,8 $\pm$ 0,3 (1,3 – 9,2)	5,9 $\pm$ 0,5 (1,4 – 12)	5,3 $\pm$ 0,2 (1,6 – 12)
pH	7,9 $\pm$ 0,1 (6,2 – 9,6)	8,1 $\pm$ 0,3 (6,4 – 10,3)	8,1 $\pm$ 0,1 (6,6 – 9,7)
Condut ( $\mu$ S.cm <sup>-2</sup> )	135,9 $\pm$ 1,2 (114 – 153)	134,2 $\pm$ 1,2 (112 – 154)	135,6 $\pm$ 1,0 (112 – 153)
Pressão atm (mmHG)	712,9 $\pm$ 0,1 (710,2 – 716,8)	713,0 $\pm$ 0,2 (709,6 – 717,2)	713,0 $\pm$ 0,2 (710 – 716,8)

### 2.3 Obtenção dos animais e alimentação

Os juvenis de *M. amazonicum* foram produzidas no próprio Setor de Carcinicultura do Centro de Aquicultura da Unesp, campus de Jaboticabal e mantidas 45 dias de berçário. A seguir, foram estocados nos viveiros experimentais. Portanto, para o camarão foi realizada a fase de engorda para crescimento final. O plantel de reprodutores de *M. amazonicum* foi formado inicialmente por animais capturados no nordeste do Pará, Brasil (01°14'30" S e 48°19'52"O) em 2001. Os juvenis de *A. lacustris* e *P. lineatus* foram provenientes das fazendas de pisciculturas parceiras do CAUNESP, ou seja, os produtores Jomar Delafrate e Sueli Marlene Rodrigues.

Os lambaris foram alimentados com uma dieta comercial de 32% de proteína bruta e grânulos de 2,5 mm, duas vezes ao dia, em quantidade proporcional à biomassa presente em cada viveiro (Fonseca *et al.*, 2017). Nos primeiros 31 dias a quantidade fornecida foi 10% da biomassa de lambari estocado. Depois deste período, por meio da biometria intermediária a ração ofertada nos últimos 22 dias correspondeu a 5% da

biomassa. O *M. amazonicum* e o *P. lineatus* se alimentaram da biota natural, dos restos do alimento ofertado aos *A. lacustris* e dos resíduos produzidos por eles.

#### **2.4 Dados biométricos e desempenho zootécnico**

Amostras aleatórias de 100 indivíduos por espécie foram coletadas e submetidas a uma biometria antes do povoamento e ao final do experimento. A massa total dos animais (g) foi obtida utilizando balança semi-analítica (Marte – AS 2000C) com precisão de 0,01. O comprimento total do *M. amazonicum* é determinado pela distância entre a margem distal do rostro até a extremidade distal do telson (Moraes-Riodades & Valenti, 2002). O comprimento total dos peixes corresponde à distância entre a boca e a extremidade do lobo mais comprido da nadadeira caudal, enquanto que o comprimento padrão refere-se à distância entre a boca e a extremidade do pedúnculo caudal (Holden & Raitt, 1974). As medições foram determinadas com paquímetro digital de precisão 0,1 mm e ictiômetro de madeira com precisão de 0,1 cm. Para avaliar o desempenho zootécnico foram calculadas as seguintes variáveis: Sobrevivência (S), Ganho de massa (GB), Taxa de Conversão Alimentar (TCA), Produtividade (PV) e Taxa de crescimento específico (TCE).

#### **2.5 Povoamento**

O povoamento de todas as espécies foi realizado seguindo o protocolo de aclimação utilizado pelos produtores. Para os sistemas integrados foram estabelecidas uma ordem de povoamento das espécies. Os camarões foram povoados duas semanas antes da estocagem dos alevinos de lambari e curimbatá para se adaptarem ao ambiente. Essa estratégia mitiga o potencial de predação do camarão pelos peixes (Santos & Valenti, 2002). A média do comprimento inicial e massa  $\pm$  desvio padrão foram: *A.*

*lacustris* =  $3,43 \pm 0,83$  cm e  $0,80 \pm 0,84$  g; *M. amazonicum* =  $5,42 \pm 0,39$  cm e  $1,06 \pm 0,24$  g; e *P. lineatus* =  $2,45 \pm 0,27$  cm e  $0,22 \pm 0,08$ g.

## **2.6 Despesca**

No 60º dia de cultivo, os viveiros foram secos e despescados. Todos os peixes e camarões sobreviventes foram contados e uma amostra aleatória de 5% dos animais de cada viveiro foi pesada em balança semi-analítica (Marte – AS 2000C; precisão 0,1g) e submetida à análise biométrica.

## **2.7 Coleta e processamento de amostras**

As coletas das amostras de material nos diferentes compartimentos foram realizadas quinzenalmente durante o ciclo de cultivo, sendo descritas a seguir.

### **2.7.1 Água de entrada, infiltrada e de saída dos viveiros**

Amostras de água foram acondicionadas em garrafas de polietileno e mantidas em freezer (-18°C). Para estimar a perda de água por infiltração em cada viveiro e assim mensurar a quantidade de água que entrou como reposição, uma vez a cada quinze dias, a entrada de água do viveiro foi fechada por um período de oito horas (8h00 – 16h00) e colocado uma ripa de madeira com uma fita métrica dentro do viveiro. Foi anotada a altura (m) que se encontrava a água antes e após as 8 horas em que a entrada de água foi fechada. A partir da diferença no nível da água e da área do viveiro, estimou-se a quantidade de água que se perde por evaporação e infiltração e conseqüentemente a quantidade de água que entra nos viveiros para compensar essas perdas. Esses valores foram extrapolados para o período de 15 dias e, a seguir, calculou-se o valor para todo o período de cultivo. Como os viveiros são estáticos, a única saída de água total ocorre na despesca. As amostras de água não apresentaram concentrações de energia mínima para leitura pela bomba calorimétrica. De acordo com a literatura e estudos prévios de

balanço de energia na agricultura, é aplicado um fator de conversão para a energia da água. Assim, a energia dos compartimentos de água de entrada, infiltrada e de saída foram estimadas a partir do fator de conversão energético de 1,02 MJ/m<sup>3</sup> multiplicado pelos volumes de água calculados (Taylor *et al.*, 1993; Sayin *et al.*, 2005).

### **2.7.2 Eletricidade**

A potência dos equipamentos elétricos utilizados como aeradores e as balanças da biometria para pesagem dos animais, foram anotadas e transformadas em quilowatts (kW). Esses valores foram multiplicados pelas horas utilizadas de cada equipamento, resultando valores em Quilowatt-hora (kWh). Estes foram convertidos em Megajoules. O valor para equivalente em energia de 3,6 MJ foi aplicado à quantidade de horas de funcionamento do equipamento durante todo o período experimental, transformando essas horas em MJ e obtendo energeticamente quanto de energia elétrica foi inserido nos três sistemas (Ozkan *et al.*, 2004; Paramesh *et al.*, 2019).

### **2.7.3 Animais e ração**

Amostras em triplicatas do lambari, camarão e curimatá foram coletadas em cada viveiro experimental, tanto no povoamento quanto na despesca. A eutanásia foi realizada em gelo e os animais foram acondicionados em estufa à 60°C até que a massa seca permaneceu constante para posterior análise energética em bomba calorimétrica (IKA, C2000 basics). Amostras de ração foram coletadas e analisadas. Os dados obtidos em Joule por grama (J/g) a partir da amostra de ração, animais povoados e despescados, foram multiplicados pela quantidade total em gramas desses compartimentos. Para a ração, o valor energético da amostra (J/g) foi multiplicado pela quantidade em gramas ofertada para todo o ciclo de cultivo em cada viveiro experimental. A carga referente ao compartimento de animais povoados e despescados foi a partir do total de indivíduos

inseridos e retirados do sistema. A quantidade de indivíduos de cada espécie foi multiplicada pela sua massa média obtida por meio da biometria inicial e final. Após obter o valor total em gramas de cada espécie por viveiro tanto no povoamento quanto na despesca, este valor foi multiplicado pela concentração de energia em J/g da amostra dos animais, resultando na carga total de energia inserida e despesada. Ao final, todos os dados foram convertidos para Megajoule (MJ).

#### **2.7.4 Sedimento**

As amostras de sedimento nos viveiros foram avaliadas utilizando coletores de Tripton. Estes coletores são constituídos por seis tubos de PVC de 1,876 L com 9,7 cm de diâmetro e 25,4 cm de comprimento. Os coletores em cada viveiro continham água misturada com sal e foram mantidos por 24h para que ocorresse a sedimentação dentro dos mesmos. Todas as amostras de sedimento foram acondicionadas em garrafas de polietileno, congeladas e armazenadas em freezer (-18°C). Assim, as amostras foram armazenadas em placas de Petri e colocadas em estufa com circulação forçada de ar (Nova Ética - 700-7DE) a 60°C até obter massa constante e posteriormente pesadas em balança analítica (Mettler Toledo – Classic AB104S) para determinar a taxa de sedimentação e submetidas a análise energética em bomba calorimétrica (IKA, C2000 basics). Os dados obtidos em Joule por grama (J/g) a partir das amostras de sedimento para cada coleta foram multiplicados pela quantidade total em gramas desse compartimento por viveiro durante o ciclo de cultivo. Para cada coleta, a quantidade de sedimento (g) retirada pelo tripton durante 24h foi extrapolada para o tamanho de cada viveiro. O valor obtido foi multiplicado por 15 (dias) para cada coleta, totalizando todo o sedimento presente no ciclo de cultivo. Ao final, todos os dados foram convertidos para Megajoule (MJ).

### **2.7.5 Mão de Obra**

O dispêndio de energia em trabalho humano para o sistema de cultivo tem sido discutido e considerado dentro das formas de energia envolvidas nos sistemas produtivos agrícolas. Segundo Yousefi & Mohammadi (2011) um trabalhador agrícola consome em média 468,15 kcal/h de trabalho. Esse valor foi convertido em MJ/h, resultando em 1,96 MJ/h e aplicado no presente trabalho. O valor foi multiplicado pelo número de trabalhadores e horas trabalhadas, obtendo a carga de energia inserida pelo trabalho humano nos sistemas estudados.

### **2.7.6 Gases Absorvidos e Emitidos**

O gás metano ( $\text{CH}_4$ ) é primordial para avaliação da sustentabilidade na aquicultura por possuir características e funções na atmosfera que podem elevar o efeito estufa. Este gás é emitido para a atmosfera por meio de emissões ebulitivas (bolhas) e por difusão, sendo que esta última acontece na interface água-ar (Matvienko *et al.*, 2000). Utilizou-se para a coleta ebulitiva funis de fibra de vidro instalados na superfície dos viveiros e suspensos por flutuadores. O funil apresenta um diâmetro inferior de 300 mm, com um ângulo de  $60^\circ$ , chegando a parte superior a um diâmetro de 20 mm. Na extremidade do funil, foi acoplado um recipiente graduado (600 mL), o qual armazenou as bolhas liberadas durante 24 horas. As coletas difusivas foram realizadas em dois períodos (diurno e noturno) por meio do método do equilíbrio (Matvienko *et al.*, 2000). Uma amostra de ar é coletada junto à superfície e armazenada em uma câmara de difusão. Neste primeiro momento da instalação, foi realizada a coleta de uma parcela da amostra no tempo 0 min, em ampolas de vidro (com tampa vedada em gel) e mais três, após 1, 2 e 4 minutos, determinando se depois do tempo de equilíbrio o gás foi absorvido no sistema ou liberado para a atmosfera. As amostras coletadas foram analisadas no cromatógrafo gasoso GC-2014 Permanent Gas Analyzer – Shimadzu. O

aparelho possui dois sensores para detecção, o detector de condutividade térmica (TCD) e o de ionização por chama (FID). A análise do TCD acontece na diferença de condutividade térmica entre o efluente que está na coluna comparada à condutividade do gás de arraste. O FID detecta os compostos orgânicos através de íons formados durante a combustão dos mesmos. A geração desses íons será proporcional à concentração de fontes orgânicas contidas na amostra passando por uma coluna metanadora, que transforma estes compostos para detecção pelo FID. A identificação do gás ocorre pela diferença do tempo de retenção na coluna, o que gerou um pico determinado de acordo com o tempo de retenção na coluna. A energia perdida na forma de CH<sub>4</sub> foi estimada para cada sistema de cultivo através do total de metano emitido durante todo o cultivo, considerando que cada grama de metano contém 13,334 kcal (Brouwer, 1965; Machado *et al.*, 2015).

## **2.8 Balanço de Energia**

O balanço energético avalia as entradas e saídas de energia, para que se determine a quantidade de energia obtida na formação do produto em relação à energia que os sistemas utilizaram em todo o processo de síntese e suporte (Heitschmidt *et al.*, 1996). Para a descrição do balanço energético o sistema foi dividido em duas partes de energia, a de entrada e saída. Para a porção não contabilizada de energia (PNC) foi subtraído o total de energia input (TE<sub>in</sub>) sobre o total de energia output (TE<sub>out</sub>). As equações utilizadas foram:

$$\mathbf{TE_{in} = AE + JL + JCM + JCB + DT + EL + MO + GA}$$

$$\mathbf{TE_{out} = AS + AI + SD + GEb + GEd + LD + CMD + CBD}$$

$$\mathbf{TE_{in} - TE_{out} = PNC}$$

Sendo AE (água de entrada), JL (juvenis de lambari), JCM (juvenis de camarão) e JCB (juvenis de curimatá), DT (Dieta), EL (eletricidade), MO (mão de obra) e GA (gases absorvidos) os conteúdos de entrada (input) de energia no sistema, e AS (água de saída), AI (Água infiltrada), SD (sedimento), GEb (gases emitidos por bolhas), GEd (gases emitidos por difusão), LD (lambari despescado), CBD (curimatá despescado), CMD (camarão despescado) referido aos conteúdos de saída (output) de energia no sistema. Quando os valores são positivos de PNC, indica que a energia não contabilizada foi no output, enquanto valores negativos indicam que a energia não contabilizada foi no input (David *et al.*, 2017a,b).

## 2.9 Estimativa da Produtividade Primária

A produção primária foi avaliada quinzenalmente na água da superfície (~0,3m), meio (~0,6m) e fundo (~0,9m) do viveiro por meio do método do oxigênio (APHA 2005; Gaarder & Gran, 1927). A quantidade inicial de oxigênio foi medida nas três profundidades. Em seguida, amostras de água foram acondicionadas em frascos claros e escuros e incubadas por três horas nestas mesmas profundidades. Após este período, foi determinada a concentração final de OD. A partir destes dados, foram calculados os valores de produção e produtividade primárias medidos pelo oxigênio liberado no processo da fotossíntese:

$$\text{Respiração} = C1 - C2$$

$$\text{Produção primária líquida} = C3 - C1$$

$$\text{Produção primária bruta} = C3 - C2$$

$$\text{Produtividade primária bruta (mg/LO}_2\text{/m}^3\text{/h)} = (C3 - C1) + (C1 - C2) / \text{tempo de incubação}$$

Sendo:

C1: concentração de oxigênio dissolvido inicial; C2: concentração de oxigênio dissolvido no frasco escuro incubado; C3: concentração de oxigênio dissolvido no frasco claro incubado.

Para o cálculo em energia (MJ) de produtividade bruta, líquida e respiração, utilizamos a equação da fotossíntese:



A cada molécula de oxigênio liberada no processo fotossintético foram absorvidas 112,5 kcal de energia. Sabe-se que a molécula de O<sub>2</sub> possui massa molecular de 32 g/mol e cada mol contém  $6,02 \times 10^{23}$  moléculas. Assim, com o dado de produtividade primária bruta, líquida e respiração de cada viveiro, foi calculado a carga total de oxigênio liberado em todo o ciclo de cultivo (g/ha/ciclo) e posteriormente foi calculada a energia fixada em Megajoules (MJ). Esses cálculos foram deduzidos a partir de Long *et al.* (1994) e Taiz & Zeiger, (2013).

## 2.10 Análises Estatísticas

As médias de todas as variáveis foram submetidas à análise de normalidade e homocedasticidade por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Brown-Forsythe, respectivamente. Como as premissas foram satisfeitas, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) de um fator paramétrica (Sokal & Rohlf, 1995). Se diferenças significativas foram encontradas ( $P < 0,05$ ), as médias dos tratamentos foram comparadas, utilizando o teste Fisher-LSD. As análises foram realizadas usando o software SigmaStat 3.5.

### 3.0 Resultados

Os dados de desempenho zootécnico apresentados na tabela 2 mostram que não há diferença estatística entre as espécies quando colocadas em monocultivo ou cultivo integrado, apresentando um crescimento e massa final do lambari semelhante entre os sistemas e uma média na taxa de sobrevivência e produtividade de 50% e 1924,67 kg/ha, respectivamente. O *M. amazonicum* e *P. lineatus* apresentaram em média produtividade e sobrevivência de 521,15 kg/ha; 80,5% e 533,9 kg/ha; 70,3%, respectivamente. Os três tratamentos LM, LCa e LCaC utilizaram a mesma quantidade de ração por ciclo (tabela 2). Embora a taxa de conversão alimentar (TCA) do lambari foi igual em todos os sistemas, quando analisada a TCA do sistema todo o monocultivo foi significativamente maior ( $2,49 \pm 0,79$ ) quando comparado aos cultivos integrados. Os sistemas que possuem espécies integradas ao cultivo do lambari diferem significativamente, melhorando a conversão alimentar com valor de  $1,37 \pm 0,29$  para o sistema LCaC. A biomassa produzida diferiu estatisticamente entre os três tratamentos ( $P < 0,05$ ), sendo a maior produção no tratamento LCaC,  $3163 \pm 498$  kg/ha/ciclo.

**Tabela 2.** Dados de desempenho zootécnico em monocultivo e cultivos integrados. Massa final, comprimento final, sobrevivência, produtividade individual e geral, taxa de conversão alimentar do sistema (TCA) e ração total ofertada, obtidos em cada tratamento, LM = lambari, LCa = lambari e camarão, LCaC = lambari, camarão e curimatã.

		LM	LCa	LCaC
<i>Astyanax lacustris</i>	Massa final (g)	$7,7 \pm 0,8^a$	$7,8 \pm 0,9^a$	$7,7 \pm 0,8^a$
	Comp. final (cm)	$7,3 \pm 0,2^a$	$7,4 \pm 0,3^a$	$7,4 \pm 0,1^a$
	Sobrevivência (%)	$46,4 \pm 7,9^a$	$48,0 \pm 9,4^a$	$55,9 \pm 14,4^a$
	Produtividade (kg.ha <sup>-1</sup> )	$1788 \pm 378^a$	$1850 \pm 183^a$	$2136 \pm 455^a$
	Taxa de Conversão Alimentar (TCA)	$2,49 \pm 0,8^a$	$2,21 \pm 0,3^a$	$2 \pm 0,6^a$
	<i>Macrobrachium amazonicum</i>	Massa final (g)	-	$2,7 \pm 0,2^a$
Comprimento (cm)		-	$6,8 \pm 0,2^a$	$6,6 \pm 0,2^a$
Sobrevivência (%)		-	$79,7 \pm 4,2^a$	$81,3 \pm 3,0^a$
Produtividade (kg.ha <sup>-1</sup> )		-	$549,0 \pm 59,5^a$	$493,3 \pm 25,4^a$
<i>Prochilodus</i>	Massa final (g)	-	-	$6,1 \pm 2,2$

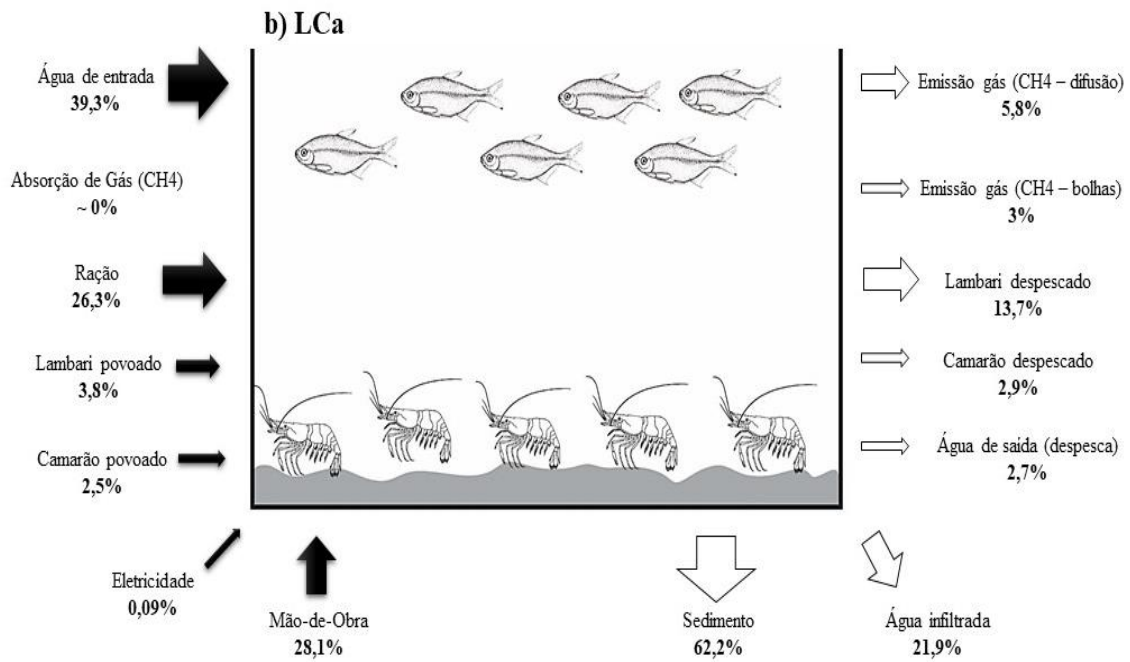
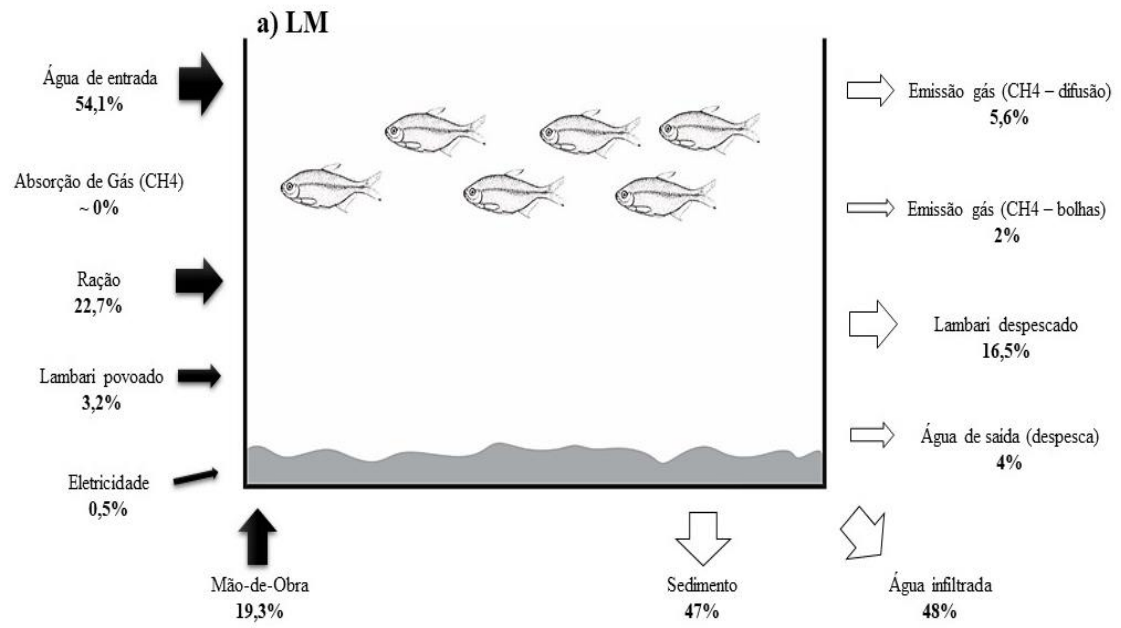
<i>lineatus</i>	Comprimento (cm)	-	-	7,3 ± 9,5
	Sobrevivência (%)	-	-	70,3 ± 9,5
	Produtividade (kg.ha <sup>-1</sup> )	-	-	533,9 ± 123,0
Total do Cultivo	Produtividade (kg/ha/ciclo)	1788 ± 378 <sup>a</sup>	2399 ± 173 <sup>b</sup>	3163 ± 498 <sup>c</sup>
	Taxa de Conversão Alimentar (TCA)	2,49 ± 0,79 <sup>a</sup>	1,84 ± 0,25 <sup>ab</sup>	1,37 ± 0,29 <sup>b</sup>
	Ração total ofertada por ciclo (kg)	46,6 ± 8,8 <sup>a</sup>	40,6 ± 2,9 <sup>a</sup>	43,6 ± 7,8 <sup>a</sup>

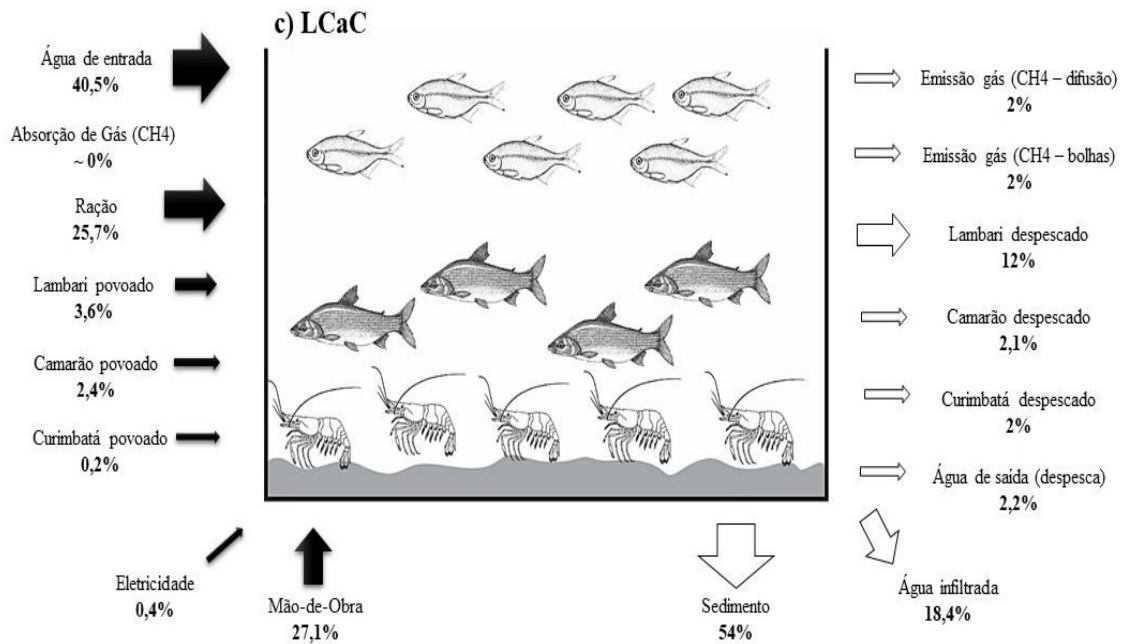
\*Médias seguidas de letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre os tratamentos pela ANOVA seguido do teste Fisher-LSD ( $P < 0,05$ ).

A produtividade primária líquida, bruta e respiração medidas em função da liberação de moléculas de oxigênio (g/ha O<sub>2</sub>) e energia fixada (MJ/ha) não apresentou diferença estatística entre os tratamentos (Tabela 3).

**Tabela 3.** Produtividade primária líquida (PPL) e bruta (PPB) e respiração (RE). Medidos em função da liberação de oxigênio (g/ha O<sub>2</sub>) e fixação de energia ( $\times 10^{23}$  MJ/ha). LM = lambari, LCa = lambari e camarão, LCaC = lambari, camarão e curimatá. O valor negativo indica que a respiração foi maior que a fotossíntese. Nenhuma variável diferiu significativamente entre os tratamentos.

	LM	LCa	LCaC
PPL (g/ha O <sub>2</sub> )	779 ± 823	-1,27 ± 401	816 ± 837
RE (g/ha O <sub>2</sub> )	2823 ± 1677	3776,3 ± 1277	2491 ± 1026
PPB (g/ha O <sub>2</sub> )	3602 ± 1848	3775 ± 1230	3307 ± 1298
PPL $\times 10^{23}$ (MJ/ha)	1,9 ± 1,7	-0,003 ± 0,9	2 ± 1,8
RE $\times 10^{23}$ (MJ/ha)	7,0 ± 4,1	9,2 ± 3,1	6,1 ± 2,5
PPB $\times 10^{23}$ (MJ/ha)	9,0 ± 4,5	9,2 ± 3,0	8,1 ± 3,2





**Figura 1.** Balanço de energia do monocultivo de lambari (*Astyanax lacustris*) – LM (a), do cultivo integrado de lambari com camarão-da-amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) – LCa (b) e do cultivo integrado de lambari com camarão-da-amazônia e curimatá (*Prochilodus lineatus*) – LCaC (c). Porcentagens (%) representam a quantidade energética de cada compartimento de entrada e saída de energia em relação à energia total de entrada ou saída, respectivamente. \*Parte não contabilizada (PNC) representa o efeito dos processos que podem originar erros de medições no balanço de energia ou omissão de compartimentos. O tamanho das setas é proporcional à carga energética em cada compartimento.

A tabela 4 e figura 1, apresentam os valores energéticos nos compartimentos ecológicos definidos para todos os tratamentos com base no balanço de energia em MJ/ha e %, respectivamente. Diferenças significativas ( $P < 0,05$ ) ocorreram no depósito de sedimento, na energia total de saída e na parte não contabilizada (PNC). A maior entrada de energia nos três tratamentos foi por meio da água de entrada, sendo  $144.10^3$ ,  $88.10^3$ , e  $96.10^3$  MJ/ha para LM, LCa e LCaC, respectivamente. Os compartimentos ecológicos de ração e mão-de-obra foram a segunda e terceira parcela de entrada energética mais expressivas em todos os tratamentos (Figura 1). Apesar dos compartimentos de entrada energética apresentarem valores relevantes, não existem diferenças significativas entre os tratamentos. Assim, a entrada final total de energia não apresentou diferenças estatística entre os tratamentos,  $265,6.10^3$ ;  $223,4.10^3$  e  $236,5.10^3$

MJ/ha para LM, LCa e LCaC, respectivamente. A energia incorporada na biomassa total dos organismos despendidos apresenta diferenças significativas ( $P<0,05$ ) e foi maior no cultivo das três espécies (LCaC) quando comparado ao monocultivo LM e cultivo integrado lambari-camarão (LCa),  $80,1 \pm 10$ ;  $45,7 \pm 10$  e  $60,7 \pm 1,63$  ( $\times 10^3$  MJ/ha), respectivamente.

**Tabela 4.** Conteúdo energético em cada compartimento ecológico para os três sistemas de cultivo. LM = monocultivo de lambari; LCa = cultivo integrado de lambari e camarão. LCaC = cultivo integrado de lambari, camarão e curimatá.

Compartimentos Ecológicos	Tratamentos		
	LM ( $10^3$ MJ ha <sup>-1</sup> )	LCa ( $10^3$ MJ ha <sup>-1</sup> )	LCaC ( $10^3$ MJ ha <sup>-1</sup> )
<b>Input</b>			
Água Entrada	144 ± 44,6 <sup>a</sup>	88 ± 14,7 <sup>a</sup>	96 ± 35,2 <sup>a</sup>
Ração	60,3 ± 4 <sup>a</sup>	58,7 ± 3,8 <sup>a</sup>	60,7 ± 2,3 <sup>a</sup>
Eletricidade	1,4 ± 0,8 <sup>a</sup>	0,2 ± 0,3 <sup>a</sup>	1,0 ± 0,8 <sup>a</sup>
Mão de Obra	51,3 ± 6,5 <sup>a</sup>	62,8 ± 7,8 <sup>a</sup>	64,1 ± 7,8 <sup>a</sup>
CH <sub>4</sub> absorvido	0,0	0,0	0,0
Lambari estocado	8,5 ± 0,33 <sup>a</sup>	8,5 ± 0,31 <sup>a</sup>	8,5 ± 0,1 <sup>a</sup>
Camarão estocado	-	5,6 ± 0,40 <sup>a</sup>	5,6 ± 0,1 <sup>a</sup>
Curimatá estocado	-	-	0,49 ± 0,0001
Total	265,6 ± 46,2 <sup>a</sup>	223,4 ± 21,8 <sup>a</sup>	236,5 ± 36,9 <sup>a</sup>
<b>Output</b>			
Água Despesca	11,2 ± 0,8 <sup>a</sup>	9,6 ± 0,6 <sup>a</sup>	10,4 ± 2,1 <sup>a</sup>
Água Infiltrada	132,6 ± 43,9 <sup>a</sup>	77,8 ± 15,2 <sup>a</sup>	85,4 ± 35,2 <sup>a</sup>
CH <sub>4</sub> liberado (bolhas)	5,4 ± 9,5 <sup>a</sup>	10,6 ± 15 <sup>a</sup>	9,3 ± 8 <sup>a</sup>
CH <sub>4</sub> liberado (difusão)	15,45 ± 8,65 <sup>a</sup>	20,54 ± 22,99 <sup>a</sup>	9,15 ± 9 <sup>a</sup>
Lambari despendido	45,7 ± 10 <sup>a</sup>	48,7 ± 4,5 <sup>a</sup>	55,8 ± 12,3 <sup>a</sup>
Camarão despendido	-	10,2 ± 1,1 <sup>a</sup>	9,9 ± 1,7 <sup>a</sup>
Curimatá despendido	-	-	9,3 ± 2,3
Sedimento	129 ± 53,1 <sup>a</sup>	211,5 ± 49,3 <sup>b</sup>	250,4 ± 49,4 <sup>b</sup>
Total	276,7 ± 48,6 <sup>a</sup>	356 ± 38 <sup>a</sup>	463,4 ± 31,1 <sup>b</sup>
<b>Não Contabilizado</b>			
Input – Output	-80 ± 51,3 <sup>a</sup>	-164,4 ± 33,4 <sup>b</sup>	-214,6 ± 33,4 <sup>b</sup>

\*Médias seguidas de letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste ANOVA seguido por Fisher-LSD ( $P<0,05$ ).

A energia total de saída foi maior no sistema integrado com a presença das três espécies (LCaC) quando comparado ao monocultivo (LM) e cultivo integrado (LCa) ( $P<0,05$ ):  $463,4 \cdot 10^3$ ,  $276,7 \cdot 10^3$  e  $356 \cdot 10^3$  MJ/ha, respectivamente. Com exceção do depósito de sedimentos, não houve diferenças significativas nos demais compartimentos

ecológicos de saída de energia entre os tratamentos (tabela 4 e figura 1). A água que infiltra nos viveiros é a segunda fonte de saída energética em todos os tratamentos. O sedimento diferiu significativamente ( $P<0,05$ ), sendo a maior carga energética nos tratamentos LCa e LCaC comparado ao LM (tabela 4). Os valores apresentados em PNC indicam que, em ambos os tratamentos, o valor energético não mensurado foi na entrada de energia, sendo maior nos tratamentos de sistemas integrados ( $P<0,05$ ).

#### **4.0. Discussão**

Nosso trabalho mostrou que em todos os tratamentos tanto os peixes quanto os camarões apresentaram um bom desenvolvimento em viveiros abastecidos com água hipereutrófica sem renovação (tabela 1). Resultados semelhantes foram observados nos cultivos integrados do tambaqui (*Colossoma macropomun*) com camarão-da-amazônia e curimatás (Flickinger *et al.*, 2019; Dantas *et al.*, 2020; Franchini *et al.*, 2020). Os cultivos integrados, apesar de possuírem maior biomassa nos viveiros, permaneceram com a qualidade de água adequada e semelhante ao monocultivo durante todo o experimento e de acordo com as recomendações gerais por Boyd (2020) para sistemas de aquicultura de água doce.

O lambari-do-rabo-amarelo pode ser uma espécie promissora para o cultivo integrado com espécies de necessidades ecológicas complementares. Este estudo apresenta dados que possibilitam a escolha de um sistema produtivo do lambari mais sustentável, executado com a inserção de espécies com nichos ecológicos complementares que não afetam o desempenho da espécie alvo de produção. As espécies integradas como o camarão-da-amazônia e o curimatá podem se beneficiar da elevada quantidade de energia e nutrientes que se depositam ao fundo dos viveiros (Flickinger *et al.*, 2020; Dantas *et al.*, 2020; Franchini *et al.*, 2020). Diferentes sistemas

que integraram o *M. amazonicum* com outras espécies observaram que o camarão apresenta características favoráveis ao seu uso em sistemas integrados (David *et al.*, 2017a; Rodrigues *et al.*, 2019; Dantas *et al.*, 2020). O camarão-da-amazônia, em ambos os tratamentos LCa e LCaC, apresentou sobrevivência e produtividade médias iguais a 80,5% e 521,15 kg/ha, respectivamente, valor similar ao observado em monocultivo segundo Moraes-Valenti & Valenti (2007) na densidade de 20 ind/m<sup>2</sup>. O tratamento LCaC corrobora a hipótese de que a adição do *Prochilodus lineatus* ao cultivo integrado do lambari com camarão-da-amazônia aumenta a produtividade sem prejudicar a produção da espécie alvo, refletindo características mais sustentáveis para os sistemas integrados. Segundo Boyd *et al.* (2020) a aquicultura integrada apresenta cultivos com uma ou mais espécies principais associadas a espécies secundárias, resultando em níveis de integração dentro de uma escala de 1 a 5. Dessa maneira, o sistema LCaC aumenta a integração da produção da espécie alvo com a adição do curimbatá, classificando esse sistema ao nível 4 que também engloba os cultivos integrados marinhos de salmão, mexilhões, pepinos-do-mar e macroalgas. A produção do curimbatá em sistema integrado é viável e não influenciou a produção das outras espécies, obtendo sobrevivência e produtividade de 70,3% e 533,9 kg/ha, respectivamente. No Brasil, a exportação de curimbatá chegou a 621,13 t em 2019, sendo, depois da tilápia, a segunda espécie mais exportada (Peixe BR, 2020).

Embora a ração seja um dos principais insumos para a produção dos organismos, a utilização inadequada pode afetar a qualidade da água e a viabilidade econômica. Os cultivos integrados além de apresentarem viabilidade técnica na produção do lambari, são mais eficientes do que o monocultivo para transformar a dieta em biomassa. Os resultados obtidos no presente trabalho confirmam as conclusões de Dantas *et al.* (2020)

e Franchini *et al.* (2020) para os cultivos integrados do tambaqui. Assim, a taxa de conversão alimentar e produtividade foi melhor nos sistemas LCa e LCaC considerando a biomassa total produzida. Esses sistemas integrados de produção do lambari podem aproveitar a sobra de ração, os resíduos produzidos pela espécie alvo e as fontes primárias de energia disponíveis para a cadeia trófica do viveiro.

A produção primária em ecossistemas aquáticos está relacionada com a capacidade fotossintetizante do fitoplâncton e pode ser avaliada por meio do método do oxigênio dissolvido (APHA, 2005). Nossos dados mostram que, por meio da produtividade primária, uma alta carga de energia pode ser incorporada aos viveiros (tabela 3). Neste sentido, a quantidade de energia solar assimilada na fotossíntese apresenta valores muito elevados, porém o saldo dessa radiação convertido em biomassa orgânica após a respiração é aproximadamente 5% (Barber, 2008; Taiz & Zeiger, 2013). Uma parte dessa energia pode acumular no sedimento devido á descida dos organismos mortos para o fundo pela força da gravidade. Uma outra parcela mais expressiva dessa energia fixada é gasta com processos metabólicos da comunidade. Nestes processos, ocorre a maior perda de energia como calor. Segundo Zhu *et al.* (2008) as principais vias metabólicas envolvem a síntese de carboidrato, fotorrespiração e respiração, equivalendo a uma perda de 33% da energia assimilada ainda dentro dos organismos produtores.

O valor negativo de PPL mostrado na tabela 3 pode ser explicado por meio do processo de respiração superar a PPB e as reservas de carbono estarem sendo utilizadas pela comunidade. Portanto, este fato indica que mais carbono é respirado do que fixado, refletindo na disponibilidade de energia para a cadeia trófica (Begon *et al.*, 2006). Os viveiros de produção podem ser equiparados a um ecossistema, pois possuem uma

cadeia alimentar, diferentes níveis tróficos e uma alça microbiana que auxiliará na ciclagem de nutrientes e no fluxo de energia (Valenti *et al.*, 2010). Este projeto está sendo desenvolvido juntamente com outros trabalhos que avaliaram o balanço de nutrientes. Assim, os dados de radiação solar, os balanços de nitrogênio e fósforo que atualmente encontram-se em fase de análise, poderão auxiliar futuramente uma melhor caracterização da produtividade primária.

Nos sistemas produtivos a energia, economia e meio ambiente são mutuamente dependentes (Pimentel *et al.*, 1994). A definição do balanço de energia em um sistema de produção na aquicultura possibilita entender a eficiência da utilização energética de recursos naturais, insumos e a dinâmica energética dentro do ecossistema, nesse caso, os viveiros. Existe uma relação entre a entrada e a saída de energia com o sistema produtivo variando com a forma de manejo escolhida, recursos autóctones e alóctones disponíveis, espécies cultivadas, colheita (despesca), nível de rendimento e biomassa produzida (Singh *et al.*, 1997; Ozpinar *et al.*, 2011). Este estudo pode apresentar um caráter descritivo e/ou comparativo a outros sistemas de produção de alimentos (agrícola e pecuária), sendo este o primeiro estudo a descrever o balanço de energia entre compartimentos ecológicos para sistemas de aquicultura mais sustentáveis.

Os compartimentos de entrada de energia mais expressivos em todos os tratamentos foram a água de entrada e a ração. O compartimento ecológico água de entrada nos três sistemas possui a maior carga energética e pode ser justificado pelo uso da água hipereutrofizada e o volume para abastecimento e reposição dos viveiros. A água de abastecimento neste estudo foi proveniente de viveiros que recebem efluentes de outros sistemas de aquicultura (piscicultura, ranicultura etc.), acelerando a eutrofização (Sipaúba-Tavares *et al.*, 2010). Nesse trabalho, a carga energética da água

foi associada à presença de componentes orgânicos dispersos em toda a coluna d'água. A sinergia das condições climáticas com as elevadas concentrações de nutrientes aumentam a matéria orgânica e diminui a eficiência de consumo e decomposição desses compostos (Esteves, 1997). Nesta perspectiva, o crescimento de produtores primários pode elevar a produtividade biológica e a biomassa fitoplanctônica dispersa na coluna d'água (Esteves, 1998; Macedo & Sipaúba-Tavares, 2010). Essa hipótese também pode ser corroborada pela elevada fixação energética obtida por meio da produtividade primária (tabela 3). Diferentemente, a energia térmica da água está relacionada a quantidade de calor presente no corpo de água, sendo influenciada por meio da troca de calor água-atmosfera, por exemplo, pela entrada e saída de radiação de ondas curtas e longas.

A energia incorporada por meio da ração e mão-de-obra não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas de cultivo, mas representam uma fonte de entrada energética representativa. A ração utilizada ao longo do cultivo pode influenciar as relações tróficas da teia alimentar. Podemos dividir em duas vias de influência: direta e indireta. A via de influência direta pode ser associada à entrada de energia alóctone em todos os sistemas, possibilitando uma forma alternativa adicional de ingestão energética para todas as espécies. Porém, a via de influência indireta ocorre por meio da liberação de nutrientes na água a partir da lixiviação da ração que podem ser assimilados nos diferentes níveis tróficos, resultando no aumento da população de produtores primários e de decompositores que atuam na disponibilidade da matéria orgânica acumulada no sedimento, devolvendo nutrientes ao ambiente (Begon *et al.*, 2016). O balanço de nutriente avaliado em diferentes cultivos, mostrou que a ração é o principal compartimento de entrada dos nutrientes nitrogênio e fósforo, que podem

variando entre 65% a 97% do total das entradas (David *et al.* 2017a; Zhang *et al.*, 2017, 2019; Flickinger, *et al.*, 2019).

A mão-de-obra aplicada por comunidades agrícolas nos sistemas de produção de alimentos, é considerada uma entrada de energia com alto valor agregado ao cultivo (Giampietro & Pimentel, 1990). Segundo Rahman & Barmon (2012), a mão-de-obra empregada ao cultivo integrado de arroz com camarões e peixes, representa 59% da entrada total de energia no sistema. Análogo a esse cultivo, os nossos sistemas apresentaram em média 25% da entrada total de energia sendo proveniente da mão-de-obra. O avanço da lambaricultura vem se desenvolvendo ao longo de duas décadas como uma alternativa de renda para pequenos produtores rurais e populações pobres no Brasil (Fonseca *et al.*, 2017). Embora a produção do lambari utilize técnicas rústicas devido a baixa quantidade de informações com base científica, a atividade é executada por pequenos e grandes produtores, necessitando da mão-de-obra do homem. Nesse sentido, tanto o monocultivo quanto os cultivos integrados do lambari, podem apresentar sustentabilidade social, pois esses sistemas demandam da energia gasta pelo trabalho humano para se desenvolver, podendo resultar em empregos para diferentes comunidades. Estudos que apliquem os indicadores de sustentabilidade social nesses sistemas de produção, poderão dimensionar a geração de empregos, a igualdade de gêneros e o aumento de renda para as populações.

A entrada total de energia não diferiu estatisticamente entre os três sistemas de cultivo, demonstrando que o aumento da biomassa cultivada não necessitou de mais fontes energéticas. Em outros sistemas de produção de alimentos como agricultura, pecuária etc, muitos trabalhos/pesquisadores demonstram que sistemas de lavouras integradas, cultivos de cereais integrados com cabras e aves, a eficiência energética é

melhorada, pois utilizam as mesmas fontes energéticas que em sistemas tradicionais (monoculturas), aumentando a produtividade e trazendo mais sustentabilidade aos sistemas de cultivos integrados (Bailey *et al.*, 2003; Moreno *et al.*, 2011; Zarini *et al.*, 2015). Os compartimentos ecológicos de saída de energia não diferiram estatisticamente entre os tratamentos, exceto o sedimento, que também afetou a energia total de saída na soma dos compartimentos. As cadeias tróficas presentes nos viveiros podem ter como base a produção primária do fitoplâncton ou os detritos formados pela matéria orgânica morta (MOM) que se deposita ao fundo do viveiro. A energia fixada pelo fitoplâncton nos viveiros poderá seguir diferentes rotas da cadeia trófica. Uma parte poderá ser consumida pelo zooplâncton herbívoro, que usará a energia para realizar trabalho (por exemplo: natação dos animais) e nas reações químicas metabólicas. Desta maneira, a parcela fixada na biomassa dos animais pode ser absorvida por outros consumidores da cadeia trófica, pois a energia não é ciclada como os nutrientes. Nesta cadeia, a produção de resíduos, a morte desses consumidores e as fezes serão incorporadas a MOM que está associada ao sedimento.

Os cultivos integrados apresentam uma cadeia trófica com mais possibilidades de fluxos energéticos comparado aos monocultivos, ocasionando uma maior produção de resíduos que ficarão aderidos a matéria orgânica morta devido a quantidade de indivíduos presente no viveiro. Uma parte da energia disponível como matéria orgânica morta no sistema pode ser perdida como calor pela respiração e a outra parte pode ser metabolizada gerando um fluxo energético através da presença de decompositores e microrganismos, seguindo para os consumidores primários e microbívoros, respectivamente, passando aos demais consumidores da cadeia trófica. O excesso de material orgânico pode beneficiar a população dos detritívoros que exercem somente a

digestão. Assim, todos os níveis tróficos auxiliam no processo de aproveitamento destes resíduos, elevando a eficiência do caminho energético nos viveiros. Esse caminho energético é parcialmente bloqueado quando as condições abióticas ficam desfavoráveis aos processos de decomposição, resultando em uma matéria orgânica morta altamente energética e incompletamente metabolizada (Heal & McLean, 1975; Begon *et al.*, 2006). Isso poderia explicar a grande quantidade de energia que se acumulou no fundo dos viveiros. Com esse acúmulo de matéria orgânica no sedimento, diferentes processos podem acontecer, por exemplo, a liberação de gases. Nossos resultados revelam que em todos os tratamentos acontece a liberação de metano por meio do desprendimento de bolhas do fundo dos viveiros, indicando a ocorrência de decomposição anaeróbica. Este processo pode ser condicionado pelo grupo das arqueias hidrogenotróficas que são autótrofas, reduz o CO<sub>2</sub> a metano e utiliza H<sub>2</sub> como doador de elétrons, sintetizando H<sub>2</sub>O, já as arqueias acetoclásticas são heterótrofas e responsáveis pela maior produção do gás, elas utilizam do processo de fermentação para gerar o metano e CO<sub>2</sub> (Jetten *et al.*, 1992; Yu *et al.*, 2005; Gruca-Rokosz *et al.*, 2011).

Em todos os tratamentos foi observado a viabilidade energética, sendo justificada pelos valores de saída de energia superarem as entradas. Isso demonstra que, para a aquicultura, a produção de proteína aquática pode ser mais eficiente quando comparado às diferentes culturas agrícolas (Rahman & Barmon, 2012; Paramesh *et al.*, 2019). A carga energética no compartimento ecológico composto por cada espécie despescada (tabela 4), não apresentou diferenças significativas entre os cultivos, demonstrando que o nível de integração não influencia a canalização de energia para o desenvolvimento do organismo. Assim, a presença do lambari nos três cultivos, do camarão nos sistemas integrados e do curimatá indicou que as espécies podem se beneficiar de diferentes

compostos que advem energia e transformá-los em biomassa comercializável. Embora em todos os cultivos estudados as espécies assimilem energia, a maior saída de energia total foi no sistema integrado de lambari, camarão e curimatá (LCaC) que combinou espécies com nichos ecológicos complementares, elevando o potencial de utilização da energia nos compartimentos ecológicos. Resultados parecidos com o nosso sistema também foram observados em outras culturas que buscaram aumentar a eficiência energética a partir dos insumos aplicados, por exemplo, o cultivo de arroz realizado em “gher” na Índia. Segundo Rahman & Barmon (2012) o cultivo acontece com a integração de peixes e camarões, mostrando mais eficiência do que a produção convencional do arroz, pois a sobra da dieta fornecida aos animais servirá como fertilizantes no solo e a irrigação para a cultura é fornecida a partir da água que ficou retida nos canais, no qual é substancialmente economizada. A partir deste efeito fica claro que os cultivos que combinam espécies podem elevar a eficiência do uso de recursos naturais e a sustentabilidade na aquicultura.

A parte não contabilizada (PNC) nos três tratamentos está relacionada a entrada de energia. O experimento utilizou viveiros externos que podem apresentar algumas vias alternativas de entrada de energia. Essa diferença também pode ser devida à soma de pequenos erros metodológicos. Os balanços de nitrogênio, fósforo e carbono desenvolvidos em diferentes sistemas utilizando os mesmos viveiros, encontraram que a parte não contabilizada acontece na entrada total. Os autores justificam que essa característica pode ser ocasionada pela limitação metodológica para coletar algumas vias de incorporação como por exemplo, água de escoamento, folhas, flores, frutas, sementes e migração de animais que podem entrar no sistema, depositar ou consumir nutrientes e sair do sistema (David *et al.* 2017a, b; Flickinger *et al.* 2019;2020a, b).

Segundo Begon *et al.* (2006) em corpos d'água pequenos, por exemplo os viveiros, grande parte da matéria orgânica é proveniente do ambiente externo, justificando a PNC estar relacionada à entrada de energia.

## **5.0 Conclusão**

Este trabalho definiu os compartimentos ecológicos que podem compor os sistemas de cultivo na aquicultura, e a partir da aplicação do balanço de energia avaliou a dinâmica energética nos viveiros. A produção do lambari integrado ao camarão-da-amazônia e o curimatá utilizando água hipereutrofizada, demonstra a viabilidade técnica e se constitui em um sistema produtivo mais eficiente energeticamente, resultando no aumento da sustentabilidade. A energia que entra tanto no sistema de monocultivo como nos cultivos integrados são similares, mas nossos dados mostraram que o cultivo integrado com as três espécies incorpora mais energia na biomassa de interesse econômico. Embora o balanço de energia mostre a viabilidade produtiva por meio da saída total de energia superar a entrada total energética em todos os sistemas de cultivo, o sistema integrado realça a capacidade desses sistemas em otimizar as fontes energéticas disponíveis a partir da integração de espécies que compartilham nichos ecológicos complementares. Assim, o caminho da energia na cadeia trófica do tanque de cultivo integrado pode ser reutilizado e canalizado para aumentar a produção de biomassa, melhorar a eficiência de insumos e recursos naturais e diminuir o desperdício energético que acarretaria no impacto do ambiente e desvalorização da proteína aquática. O entendimento da utilização de energia pelos cultivos pode ajudar na proteção ambiental, na gestão da utilização de insumos e melhoria da sustentabilidade, auxiliando a criação de políticas governamentais que incentivem a adoção desses sistemas produtivos.

## 6.0 Referências

- Antoniutti, D.M., Narahara, M.Y., Romagosa, E. 1995. Reprodução induzida e custo operacional de criação de juvenis de curimatá, *Prochilodus scrofa* (STEINDACHNER, 1881). Boletim do Instituto de Pesca, 22(1):41-47.
- Anuário Peixe Br. 2020. Associação Brasileira de Piscicultura. Disponível em: <https://www.peixebr.com.br/anuario-2020/> Acesso em: 03 junho 2020.
- Apha. 2005. Standard methods for the examination of water and waste water. Washington, DC, USA.
- Badiola, M., Basurko, O.C., Piedrahita, R., Hundley, P., Mendiola, D. 2018. Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review. Aquacultural Engineering, 81:57-70.
- Bailey, A.P., Basford, W.D., Penlington, N., Park, J.R., Keatinge, J.D.H., Rehman, T., Tranter, R.B., Yates, C.M. 2003. Comparison of energy in conventional and integrated arable farming systems in the UK. Agriculture, Ecosystems & Environment, 97:241-253.
- Bayo, V., Yuan, E.C. 1996. Food assimilation of a neotropical riverine detritivorous fish, *Prochilodus lineatus*, studied by fatty acid composition (Pisces, Curimatidae). Hydrobiologia, 330:81-88.
- Barber, J. 2008. Photosynthetic energy conversion: natural and artificial. Chemical Society Reviews. Renewable Energy Issue, 2009.
- Begon, M., Harper, J.L., Townsend, C.R. 2006. Ecology: individuals, populations and communities (4rd edition): Oxford, Blackwell Science.
- Boyd, C.E. 2015. Water quality: an introduction. Second edition, Springer
- Boyd, C.E., D'Abramo, L.R., Glencross, B.D., Huyben, D.C., Juarez, L.M., Lockwood, G.S., McNevin, A.A., Tacon, A.G.J., Teletchea, F., Tomasso Jr, J.R., Tucker, C.S., Valenti, W.C. 2020. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. Journal of the World Aquaculture Society, 51:578-633.
- Brower, E. 1965. Report of sub-committee on constants and factors. Symposium of Energy Metabolism held at European Association for Animal Production. London: EAAP Academic, 441-443.
- Chopin, T., MacDonald, B., Robinson, S., Cross, S., Pearce, C., Knowler, D., Noce, A., Reid, G., Cooper, A., Speare, D., Burrige, L., Crawford, C., Sawhney, M., Ang, K.P., Backman, C., Hutchinson, M. 2013. The Canadian Integrated MultiTrophic Aquaculture Network (CIMTAN) - A Network for a New Era of Ecosystem Responsible Aquaculture. Fisheries, 38(7):297-308.
- Choundhary, M., Rana, K.S., Bana, R.S., Ghasal, P.C., Choudhary, G.I., Jakhar, P., Verma, R.K. 2017. Energy budgeting and carbon footprint of pearl miller – mustard cropping system under conventional and conservation agriculture in rainfed semi-arid agro-ecosystem. Energy, 141:1052-1058.
- Dantas, D.P., Flickinger, D.L., Costa, G.A., Batlouni, S.R., Moraes-Valenti, P., Valenti, E., 2020. Technical feasibility of integrating Amazon river prawn culture during the first phase of tambaqui grow-out in stagnant ponds, using nutrient-rich water. Aquaculture 516:73411.
- David, F.S., Proença, D.C., Valenti, W.C. 2017a. Phosphorus budget in integrated multitrophic aquaculture systems with Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, and Amazon River prawn, *Macrobrachium amazonicum*. Journal of the World Aquaculture Society, 48(3):402-414.

- David, F.S., Proença, D.C., Valenti, W.C. 2017b. Nitrogen budget in integrated aquaculture systems with Nile tilapia and Amazon River prawn. *Aquaculture International*, 25(5):1733-1746.
- Esteves, F.A. 1998. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência. 575p.
- Flickinger, D.L., Costa, G.A., Dantas, D.P., Moraes-Valenti, P., Valenti, W. 2019. The budget nitrogen in the grow-out of the Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum* Heller) and tambaqui (*Colossoma macropomum* Cuvier) farmed in monoculture and integrated multitrophic aquaculture systems. *Aquaculture Research*. 503:444–461.
- Flickinger, D.L., Costa, G.A., Dantas, D.P., Proença, D.C., David, F.S., Durborow, R.M., Moraes-Valenti, P., Valenti, W.C. 2020. The budget of carbono in the farming of the Amazon river prawn and tambaqui fish in earthen pond monoculture and integrated multitrophic systems. *Aquaculture Reports*.
- Flickinger, D.L., Dantas, D.P., Proença, D.C., David, F.S., Moraes-Valenti, P., Valenti, W.C. 2020. Phosphorus in the culture of the Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum*) and tambaqui (*Colossoma macropomum*) farmed in monoculture and in integrated multitrophic systems. *Journal of the World Aquaculture Society*. In Press.
- Fonseca, T., Costa-Pierce, B. A., Valenti, W. C. 2017. Lambari Aquaculture as a Means for the Sustainable Development of Rural Communities in Brazil. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 25(4):316-330.
- Franchini, A.C., Costa, G.A., Valenti, W.C., Pereira, S.A., Moraes-Valenti, P. 2020. Improving production and diet assimilation in fish-prawn integrated aquaculture, using iliophagus species. *Aquaculture*, 521:735048.
- Fugi, R., Agostinho, A.A., Hahn, N.S. 2001. Trophic morphology of five benthic-feeding fish species of a tropical floodplain. *Revista Brasileira de Biologia*, 61:27-33.
- Gaarder, T., Gran, H.H. 1927. Investigation of the production of plankton in the Oslo fjord. Rapp. P.-v. Réun., Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer, 42:1-8.
- Garutti, V. 2003. *Piscicultura Ecológica*. São Paulo: Ed. UNESP.
- Giampietro, M., Pimentel, D. 1990. Assessment of the energetics of human labor. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 32:257-272.
- Gruca-Rokosz, R., Tomaszek, J.A., Koszelnik, P., Czerwieniec, E. 2011. Methane and carbono dioxide fluxes at the sediment-water interface in reservoir. *Polish Journal of Environmental Studies*, 20:81-86.
- Heitschmidt, R.K., Short, R.E., Grings, E.E. 1996. Ecosystems, sustainability, and animal agriculture. *Journal of Animal Science*, 74:1395-1405.
- Heal, O.W., MacLean, S.F. 1975. Comparative productivity in ecosystems-secondary productivity, in van Dobben, W.H. and Lowe-McConnell, R.H., eds., *Unifying concepts in ecology: The Hague, Dr. W. Junk*, p. 89-108.
- Holden, M.J., Raitt, D.F.S. 1974. *Manual of Fisheries Science Part 2 - Methods of Resource Investigation and their Application*, FAO.
- Hsieh, F., Mulvaney, S.J., Huff, H.E., Lue, S., Brent, J. 1989. Effect of dietary fiber and screw speed on some extrusion processing and product variables. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 24:204-207.
- IBGE. 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção da Pecuária Municipal*. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.
- Jetten, M.S.M., Stams, A.J.M., Zehnder, A.J.B. 1992. Methanogenesis from acetate: a comparison of the acetate metabolism in *Methanotheroxiphilum* and *Methanosarcina* spp. *FEMS Microbiology Reviews*, 88:181-198.

- Kimpara, J.M., Tito Rosa, F.R., de Lima Preto, B., Valenti, W.C. 2011. Limnology of *Macrobrachium amazonicum* grow-out ponds subject to high inflow of nutrient-rich water and different stocking and harvest management. *Aquaculture Research*, 42:1289-1297.
- Lal, R. 2019. "Carbon Cycling in Global Drylands." *Current Climate Change Reports*, 5:221–232.
- Long, S.P., Humphries, S., Falkowski, P.G. 1994. Photoinhibition of photosynthesis in nature. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 45:633-662.
- Macedo, C.F., Sipaúba-Tavares, L.H. 2010. Eutrofização e qualidade da água na piscicultura: consequências e recomendações. *Boletim do Instituto de Pesca*, 36(2):149-163.
- Machado, F.S., Rodriguez, N.M., Gonçalves, L.C., Rodrigues, J.A.S., Ribas M.N., Pôssas, F.P., Jayme, D.G., Pereira, L.G.R., Chaves, A.V., Tomich, T.R. 2015. Energy partitioning and methane emission by sheep fed sorghum silages at different maturation stages. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 67(3):790-800.
- Magalhães, C. 2000. Diversity and abundance of decapod crustaceans in the Rio Negro basin, Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brazil. In: Willink, P.; Chernoff, B.; Alonso, L.E.; Montambault, J.; Lourival, R. (Eds.). *A Biological Assessment of the Aquatic Ecosystems of the Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brazil*. Conservation International. Rapid assessment program. RAP Bulletin of Biological Assessment, Washington D.C, 18:56-62.
- Magalhães, C. 2001. Diversity, distribution, and habitats of the macro-invertebrate fauna of the Río Paraguay and Río Apa, Paraguay, with emphasis on Decapod Crustaceans. In *A Biological Assessment of the Aquatic Ecosystems of the Río Paraguay Basin, Alto Paraguay, Paraguay*. Conservation International. RAP Bulletin of Biological Assessment, Washington, 19:68–72.
- Maciel, C.R., Valenti, W.C. 2009. Biology, Fisheries, and Aquaculture of the Amazon River Prawn *Macrobrachium amazonicum*: a review. *Nauplius*, 17(2):61-79.
- Marques, H.L.A., New, M.B., Boock, M.V., Barros, H.P., Mallasen, M., Valenti, W.C. 2016. Integrated freshwater prawn farming: state-of-the-art and future potential. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 24(3):264–293.
- Matvienko, B.E., Sikar, L.P., Rosa, M.A., Dos Santos, R., de Filippo, A.C.P. 2000. Gas release from a reservoir in the filling stage. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, 27:1915–1919.
- Medeiros, L.F.S., Marta, J.M.C. 2011. Avaliação da energia contida nos principais sistemas agrícolas da região médio norte do Estado de Mato Grosso – 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso. Programa de Pós-Graduação em Agronegócios e Desenvolvimento Regional, 149.
- Meriwether, J.W., Jr, P., Shih, T.L., Killeen, V.B., Wickwar, Roble, R.G. 1984. Nighttime thermospheric winds over Sondre Stromfjord, Greenland. *Geophysical Research Letters*, 11:931-934.
- Moraes-Riodades, P.M.C., Valenti, W.C. 2002. Crescimento relativo do camarão canela *Macrobrachium amazonicum* (Heller) (Crustacea, Decapoda, Palaemonidae) em viveiros. *Revista Brasileira de Zoologia*, 19:1181–1214.
- Moraes-Valenti, P.M.C., Valenti, W.C. 2007. Effect of intensification on grow-out of the Amazon river prawn *Macrobrachium amazonicum*. *Journal World Aquaculture Society*, 38(4):516–526.

- Moreno, M.M., Lacasta, C., Meco, R., Moreno, C. 2011. Rain-fed crop energy balance of different farming systems and crop rotations in a semi-arid environment: Results of a long-term trial. *Soil & Tillage Research*, 114:18–27.
- Naylor, R.L., Williams, S.L., Strong, D.R. 2001. Aquaculture a gateway for exotic species. *Science*, 294:1655–1656.
- New, M.B. 2005. Freshwater prawn farming: global status, recent research and a glance at the future. *Aquaculture Research*, 36:210-230.
- ONU. 2015. Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Acesso em 01/11/2020.
- Ozkan B., Kurklu, A., Akcaoz, H. 2004. An input-output energy analysis in greenhouse vegetable production: a case study for Antalya region of Turkey. *Biomass Bioenergy*. 26:89-95.
- Ozpinar, S., Ozpinar, A. 2011. Influence of tillage and crop rotation systems on economy and weed density in a semi-arid region. *Journal Agricultural Science Technology*, 13:769-840.
- Paramesh, V., Arunachalam, V., Nath, A.J. 2019. Enhancing ecosystem services and energy use efficiency under organic and conventional nutrient management system to a sustainable arecanut based cropping system. *Energy*, 187:115-902.
- Paramesh, V., Parajuli, R., Chakurkar, E.B., Sreekanth, G.B., Chetan Kumar, H.B., Gokuldas, P.P., Mahajan, G.P., Manohara, K.K., Viswanatha, R.K., Ravisankar, N. 2019. Sustainability, energy budgeting, and life cycle assessment of crop-dairy-fish-poultry mixed farming system for coastal lowlands under humid tropic condition of India. *Energy*, 188:101-116.
- Pimentel, D., Herdendorf, M., Eisenfeld, S., Olander, L., Carroquino, M., Corson, C. 1994. Achieving a secure energy future: environmental and economic issues. *Ecology Economy*, 9(3):201e19.
- Rahman, S., Barmon, B.K. 2012. Energy productivity and efficiency of the “gher” (prawn-fish-rice) farming system in Bangladesh. *Energy*, 43:293-300.
- Rhodes, R.J., Hanson, T.R., Dasgupta, S. 2010. Economics and Business Management. In: New, M.B., Valenti, W.C., Tidwell, J.H., D’Abramo, L.R. e Kutty, M.N. (eds) *Freshwater Prawns: Biology and Farming*. Wiley-Blackwell Science, 448-474.
- Rodrigues, C. G. 2017. Viabilidade técnica e econômica de diferentes sistemas de produção de lambari-do-rabo-amarelo, *Astyanax lacustris*, e camarão-da-amazônia, *Macrobrachium amazonicum*. Tese – Doutorado. Centro de Aquicultura da Unesp – Caunesp. Universidade Estadual Paulista - UNESP.
- Rodrigues, C.G., Garcia, B.F., Verdegem, M., Santos, M.R., Amorim, R.V., Valenti, W.C., 2019. Integrated culture of Nile tilapia and Amazon river prawn in stagnant ponds, using nutrient-rich water and substrates. *Aquaculture*, 503:111-117.
- Ross, L.G., Palacios, C.A.M., Morales, E.J. 2008. Developing native fish species for aquaculture: the interacting demands of biodiversity, sustainable aquaculture and livelihoods. *Aquaculture Research*, 39(7):675–683.
- Santos, J.I. 2011. Milho Mais Caro Devido ao Etanol. Disponível em: <[http://www.agroanalysis.com.br/materia\\_detalhe.php?idMateria=219](http://www.agroanalysis.com.br/materia_detalhe.php?idMateria=219)>. Acesso em: 30 abril 2018.
- Santos, M.J.M., Valenti, W.C. 2002. Production of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, and freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii*, stocked at different densities in polyculture systems in Brazil. *J. World Aquac. Soc.* 33 (3), 369–376.

- Sayin C., Nisa Mencet M., Ozkan B. 2005. Assessing of energy policies based on Turkish agriculture: current status and some implications. *Energy Policy*, 33:2361-2373.
- Singh, M.K., Pal, S.K., Thakur, R., Verma, U.N. 1997. Energy input-output relationship of cropping systems. *Indian Journal Agriculture Science*, 67:262.
- Samuel-Fitwi, B., Wuertz, S., Schroeder, J.P., Schulz, C. 2012. Sustainability assessment tools to support aquaculture development. *Journal of Cleaner Production*, 32:183-192.
- Sipaúba-Tavares, L.H., Lourenço, E.M., Braga, F.M.S. 2010. Water quality in six sequentially disposed fishponds with continuous water flow. *Acta Scientiarum Biological Sciences*, 32(1):9-15.
- Siqueira, R., Gamero, C.A., Boller, W. 1999. Balanço de energia na implantação e manejo de plantas de cobertura do solo. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 19(1):80-89.
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J. 1995. *Biometry: the principles and practice of statistics in biological sciences*. New York, Freeman, 3a. ed., 887.
- Taiz, L., Zeiger, E. *Fisiologia vegetal*. 5ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918 p.
- Taylor, E.B., O'Callaghan, P.W., Probert, S.D. 1993. Energy audit of an English farm. *Applied Energy*, 44:315-335.
- Valenti, W.C., Kimpara, J.M., Preto, B.L., Moraes-Valenti, P. 2018. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecological Indicators*, 88:402-413.
- Valenti W.C., New M.B., Salin K.R., Ye, J. 2010. Grow-out systems - monoculture. In: *Freshwater Prawns: Biology and Farming* (ed by M.B. New, W.C. Valenti, J.H. Tidwell, L.R. D'Abramo & M.N. Kutty), pp. 154-179. Wiley-Blackwell, Oxford, UK.
- Zarini, R.L., Loghmanpaur, M.H., Ramezani, M.A., Afrouzi, H.N., Tabatabaekoloor, R. 2015. Relationship between energy consumption and egg production in poultry in Iran. *Biological Forum-An International Journal* 7(2):296-299.
- Zhang, X., Mei, X., Gulati, R. 2017. Effects of omnivorous tilapia on water turbidity and primary production dynamics in shallow lakes: implications for ecosystem management. *Review Fish Biology Fisheries*, 27:245-254
- Zhang, K., Yu, D., Li, Z., Xie, J., Wang, G., Gong, W., Yu, E., Tian, J. 2019. Influence of eco-substrate addition on organic carbon, nitrogen and phosphorus budgets of intensive aquaculture ponds of the Pearl River, China. *Aquaculture*, 734-868.
- Zhu, X.G., Long, S.P., Ort, D.R. 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?. *Current Opinion in Biotechnology*, 19:153-159.
- Wang, Q., Yuan, X., Zhang, J., Gao, Y., Hong, J., Zuo, J., Liu, W. 2015. Assessment of the Sustainable Development Capacity with the Entropy Weight Coefficient Method. *Journal Sustainability*, 7:13542-13563.
- Yadav, G.S., Lal, R., Meena, R.S., Datta, M., Babu, S., Das, A., Layek, J., Saha, P. 2017. Energy budgeting for designing sustainable and environmentally clean/safer cropping systems for rainfed rice fallow lands in India. *Journal of Cleaner Production*, 158:29-37.
- Yu, Y., Lee, C., Hwang, S. 2005. Analysis of community structures in anaerobic processes using a quantitative real-time PCR method. *Water Science and Technology*, 52:85-91

## CAPÍTULO 3

### Determinação do saldo de calor a partir do balanço de energia em viveiros de aquicultura

#### Resumo

O estudo determinou o saldo de calor a partir do balanço de energia em viveiros de aquicultura por meio da diferença entre a quantidade de calor que entra e sai no sistema pelas radiações eletromagnéticas ao longo do cultivo de 60 dias. Foram utilizados 12 viveiros de fundo natural como unidades experimentais. Dados referentes à incidência de energia solar a cada hora obtidos na estação meteorológica da UNESP/FCAV foram utilizados. Para a estimativa da temperatura da água ( $T_w$ ) a partir da temperatura do ar ( $T_a$ ) utilizou-se a Máquina de Suporte de Vetores (SVM). Os parâmetros estatísticos que avaliaram a eficácia do modelo estimado foram: Erro Absoluto Médio (BEM), Raiz Quadrada do erro quadrático (RMSE) e o Índice de concordância (d) de Willmott. O saldo de calor foi analisado pelo balanço de energia por meio das entradas de radiação solar líquida (SW) e onda longa atmosférica (LW<sub>a</sub>) e saídas da radiação de onda longa pela água (LW<sub>w</sub>), calor latente na evaporação da água ( $\lambda E$ ) e fluxo de calor sensível da água para atmosfera (C). O BEM (-2,44%) indica uma tendência de subestimativa, a RMSE mostra a confiabilidade da precisão de estimativa 5,23%. O d de Willmott apresentou um valor de 0,87. O saldo de calor armazenado nos viveiros foi de 756,75 MJ/ha, ou seja, 74,3% da energia total de entrada menos a saída total de energia fica retido no viveiro como forma de calor. Portanto, o saldo de calor positivo pode ajudar na manutenção da temperatura da água, influenciando o metabolismo do ecossistema por meio das características bióticas e abióticas do viveiro.

**Palavras-chave:** balanço de energia, saldo de calor, SVM, viveiros, aquicultura, fluxo de calor.

## **Introdução**

A energia solar é considerada a principal fonte de energia para o planeta terra, essencial para a existência de vida. Tal energia corresponde às ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol nas faixas espectrais ultravioleta (100-380 nm), visível (380-780 nm) e infravermelho (780-4000 nm), sendo chamada de radiação de ondas curtas (SW) (Iqbal, 1983). Antes de incidir sobre a superfície terrestre, a energia solar interage com a atmosfera sofrendo atenuação pelos processos físicos absorção, espalhamento e reflexão. Parte da energia solar absorvida pela atmosfera é emitida por ela e incide sobre a superfície terrestre, na forma de ondas eletromagnéticas com comprimento de ondas maior que a do espectro solar e por isso chamada de radiação de ondas longas (LW<sub>a</sub>) ou térmica (Varejão-Silva, 2006; Pereira *et al.*, 2007). O aporte energético a partir dessas fontes depende de parâmetros físicos que caracterizam a atmosfera e a influenciam, resultando em uma fonte de energia primária para o funcionamento dos processos biológicos e meteorológicos dos ecossistemas terrestres e aquáticos (Souza *et al.*, 2005).

Levando em conta todos os processos físicos e biológicos que ocorrem em corpos de água, verifica-se que estes têm como principal fonte de energia a radiação de ondas curtas. Tomando como exemplo a fotossíntese realizada por organismos clorofilados, a evaporação da água, a variação da temperatura da água, a decomposição ativa de compostos orgânicos, todos estes processos dependem da energia solar. Variações na temperatura da água afetam o metabolismo de organismos aquáticos interferindo no crescimento, sobrevivência e sanidade (Avault, 1996; Lang *et al.*, 2003; Jain, 2007), além de alterar concentração de oxigênio dissolvido no ambiente (Lawson, 1995). Assim, pode-se afirmar que a energia solar desempenha um papel importante na aquicultura em viveiros escavados. Por isso, alguns autores ressaltam a necessidade de

avaliar a energia solar como uma das entradas em balanços de energia da aquicultura, especialmente no caso da produção em ambientes tropicais, contribuindo para a manutenção da temperatura da água (saldo de calor) (Balasubramanian *et al.*, 1995; Melo & Brasil Jr, 2002).

O saldo de calor em um corpo de água, no caso de lagos e viveiros escavados, depende das diferentes formas de entrada e saída de calor com consequente mudança da energia armazenada no sistema. Neste caso, variações na temperatura da água expressam as mudanças no armazenamento de energia térmica (Gianniou & Antonopoulos, 2007). As alterações significativas que acontecem nas condições termais de lagos (Sima *et al.*, 2013) podem afetar os processos ecológicos dos ecossistemas aquáticos (Gan & Liu, 2020).

Alguns dos fluxos de entrada ou saída de calor em corpos de água são de difícil medição e avaliação, como os de calor turbulentos, advectivos associados com precipitação, fluxo e trocas de água subterrânea e troca de calor sensível com o solo (Kettle *et al.*, 2012). Como a maioria destes possui baixa contribuição no saldo geral de calor, eles são ignorados. Desta forma, as principais formas de entrada de calor são o SW e a LWa. Entre as saídas de calor podem ser consideradas o calor latente de evaporação ( $\lambda E$ ), calor sensível da água para a atmosfera (C) e a radiação de ondas longas emitidas pela água (LWw) (Lamoureux *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2011; Duan; Bastiaanssen, 2015).

A SW é de fácil medição e alta precisão, a partir do uso de piranômetros. Os componentes radioativos de onda longa podem ser determinados com precisão dependente da qualidade dos dados de elementos meteorológicos utilizados pelos modelos de estimativa. A perda de calor devido à evaporação é uma das formas de saída de energia mais difíceis de ser determinada, pois depende da disponibilidade de energia

térmica, do déficit de pressão de vapor entre a superfície de evaporação e o ar sobrejacente, que por sua vez dependem de fatores meteorológicos, como temperatura, umidade relativa e velocidade do vento (Momii & Ito, 2008). Portanto, este trabalho determinou o saldo de calor a partir do balanço de energia associado aos mecanismos de transferência de radiação solar e atmosférica, em viveiros de cultivos na aquicultura.

## **2.0 Objetivo**

O objetivo geral do presente estudo foi determinar o saldo de calor em viveiros escavados pelo balanço de energia a partir das radiações eletromagnéticas de entradas e saídas de calor.

### **2.1 Objetivo específico**

- Estimar a temperatura da água utilizando a técnica de aprendizado de Máquina de Vetores de Suporte (SVM) para cálculos do balanço de energia;
- Determinar o valor energético dos componentes de entrada e saída que compõe o balanço de energia;

## **3.0 Material e Métodos**

### **3.1 Local de estudo, estrutura dos tanques e obtenção dos dados**

O experimento foi conduzido no Centro de Aquicultura da Unesp (CAUNESP), em Jaboticabal - SP, no Setor de Carcinicultura. O local possui latitude 21°15'22''S, longitude 48°18'48''O e altitude de 575 metros. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação climática de Köppen, sendo subtropical úmido com estiagem no inverno, temperatura e precipitação médias anuais de 22,3 °C e 1424,6 mm, respectivamente (Rolim & Aparecido, 2016). Utilizou-se doze viveiros experimentais retangulares de fundo natural, com área aproximada de 0,015 ha e profundidade média de 1 m.

Inicialmente, os viveiros foram drenados, secos ao ar e abastecidos com água hipereutrófica submetida a filtração mecânica proveniente de duas represas. Durante o período experimental de Fevereiro/2019 a Abril/2019 os viveiros permaneceram sem renovação de água, sendo utilizada a água de abastecimento apenas para repor as perdas por infiltração e evaporação. Em cada viveiro estava presente um aerador Bernauer, modelo B-500 Aquahobby monofásico – água doce para manter os níveis de oxigênio dissolvido na faixa adequada ao cultivo em situações de emergências.

As bases de dados utilizadas de temperatura do ar, umidade relativa, evaporação do tanque classe A e radiação solar global foram medidas durante o período do cultivo (fevereiro/2019 a abril/2019) na estação meteorológica do Departamento de Ciências Exatas da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP/FCAV. O albedo dos viveiros escavados foi medido no período de 17/07/2017 a 29/09/2017 utilizando um piranômetro modelo CM11 da Kipp & Zonen instalado 50 cm acima e voltado para superfície de água do viveiro escavado.

### **3.2 Estimativas da temperatura da água utilizando a Máquina de Vetores de Suporte (SVM)**

Nos últimos 20 anos, as técnicas de aprendizado de máquinas (TAM) foram foco de estudos em diferentes áreas para resolver problemas de regressão e classificação, devido à popularização dos microcomputadores, à disponibilidade de compilações gratuitas e de fácil utilização e à boa capacidade de generalização mesmo na presença de dados espúrios (Mohammadi *et al.*, 2015). Atualmente, as redes neurais artificiais (RNA) e a Máquina de Vetores de Suporte (SVM) são as TAM mais conhecidas e utilizadas (Kumar *et al.*, 2015; Meenal; Selvakumar, 2018). A SVM é considerada um

método mais refinado, sendo capaz de gerar estimativas com maior precisão utilizando um número menor de variáveis de entrada (Teramoto *et al.*, 2019).

A SVM foi originalmente desenvolvida por Vapnik (1998) com base na Teoria do Aprendizado Estatístico, sendo hoje amplamente utilizada para resolver problemas de classificação e regressão. Durante o processo de treinamento da SVM para a solução de problemas de regressão, é estimada uma função a partir do conjunto de exemplos  $[(x_i, y_i)]_{i=1}^n$ , onde  $x_i \in \mathbb{R}^n$  é o vetor exemplo formado pelas variáveis de entrada,  $y_i \in \{-1, +1\}$  é a variável de saída e  $n$  é o número total de exemplos presentes no conjunto de treinamento (Vapnik, 1998). Assim, a função  $f$  obtida no treinamento será capaz de receber um vetor  $x_i$  e fornecer uma predição  $y_i$ . O desempenho e capacidade de aprendizado da SVM na regressão são atribuídos ao uso do conjunto de funções de Kernel, as quais diagramam a informação para um espaço dimensional elevado (Vapnik, 1998). A SVM fornece quatro funções de Kernel básicas: sigmoideal, linear, polinomial e função de base radial (RBF). A função de Kernel mais utilizada é a função de base radial (RBF) (Mohammadi *et al.*, 2015). Para permitir maior flexibilidade na aplicação da RBF, é necessário o ajuste adequado dos parâmetros  $C$  (custo),  $\gamma$  (gamma) e  $\varepsilon$  (epsilon) (Vapnik, 1998). A utilização da SVM envolve duas etapas: (i) treinamento, que ocorre através da apresentação de exemplos, análogo ao processo de calibração; (ii) estimativa, após o treinamento e aquisição da capacidade de generalização dos exemplos apresentados. Após o treinamento da SVM não é possível identificar uma equação de estimativa como no caso da geração de modelos por regressão. Dessa forma, esse processo de modelagem é chamado de “caixa preta”, apresentando como vantagem a possibilidade de utilizar um número grande de variáveis de entrada sem sintetizar uma equação complexa algebricamente.

Nesse trabalho, a SVM utilizada foi o algoritmo Sequential Minimal Optimization (SMO) implementado no software WEKA (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*), e com a função Radial Basis Function (RBF) de Kernel foi empregada para regressão. Dados de temperatura da água foram medidos em um viveiro escavado de 100 m<sup>2</sup> instalado no CAUNESP, durante o período de 17/07/2017 a 29/09/2017 e utilizando um termopar do tipo T conectado à um datalogger modelo CR23X da Campbell Scientific. Esses dados foram agrupados juntos aos dados de temperatura do ar, fornecidos pelo Departamento de Ciências Exatas da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP/FCAV. Posteriormente, os dados agrupados foram divididos em dois agrupamentos: (i) base de dados para treinamento, correspondente a 70% do total; (ii) base de dados para validação, correspondente a 30% do total.

Na avaliação do desempenho da SVM foram utilizados os índices estatísticos Erro Absoluto Médio (MBE), Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) e o índice de concordância de Willmott (d) (Willmott *et al.*, 1985; Zacharias *et al.*, 1996). Na validação dos métodos de estimativa foram utilizados os parâmetros estatísticos MBE (Erro Médio Absoluto) e RMSE (Raiz Quadrada do Erro Médio). O MBE permite avaliar quanto o modelo subestima ( $MBE < 0$ ) ou superestima ( $MBE > 0$ ) os valores de  $T_w$ , sendo expresso em percentual. A extensão do erro na estimativa foi avaliada a partir da RMSE, expresso em percentual. Assim, os menores valores de RMSE e o MBE mais próximo de zero indicam melhor precisão do método de estimativa. O (d) de Willmott serve de indicativo da exatidão do modelo, mostrando quanto os dados estimados estão próximos dos medidos, sendo zero para nenhuma concordância e um para concordância perfeita. Os parâmetros estatísticos BEM, RMSE e o (d) de Willmott foram obtidos utilizando as seguintes equações:

$$\text{MBE} = 100 * \frac{n^{-1} \sum_{i=1}^n (X_{E_i} - X_{M_i})}{\bar{X}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{RMSE} = 100 * \frac{\sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (X_{E_i} - X_{M_i})^2}}{\bar{X}} \quad (\text{Equação 2})$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (\text{Equação 3})$$

onde:  $X_{E_i}$  = valor estimado;  $X_{M_i}$  = valor medido;  $\bar{X} = (\sum_{i=1}^n X_{M_i})/n$  é a média dos valores medidos; n = número de observações.

A SVM treinada nesta etapa será utilizada na estimativa da temperatura da água referente ao período de fevereiro/2019 a abril/2019, que foi utilizada na estimativa do saldo de calor.

### 3.3 Radiação Solar e Atmosférica – Estimativa do saldo de calor

A variação de energia na água do viveiro por radiação (solar e atmosférica)  $\Delta S$  é geralmente calculada a partir da mudança da temperatura na água para o intervalo de tempo durante o qual o método de balanço de energia é conduzido (Duan & Bastiaanssen, 2015). A energia de entrada corresponde à radiação solar líquida (onda curta, SW) mais a radiação de onda longa atmosférica (LWa). O SW é a radiação solar incidente menos a porção refletida pela superfície da água, isto é, a porção de radiação solar que é efetivamente absorvida pela água. Assumindo que outras saídas de energia sejam pequenas e insignificantes, a perda de calor pela água ocorrerá de três maneiras principais: fluxo de calor sensível da água para a atmosfera (C), radiação de ondas longas emitidas pela água (LWw) e calor latente na evaporação da água ( $\lambda E$ ). Portanto,  $\Delta S$  no armazenamento ao longo do tempo pode ser escrito como (Lamoureux *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2011; Duan & Bastiaanssen, 2015):

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = SW + LW_a - LW_w - \lambda_E - C \quad (4)$$

A  $SW$  foi estimada a partir da equação 5 abaixo e utilizando dados medidos de radiação solar global horária ( $H_G$ , em  $MJ\ m^{-2}$ ) e de albedo horário da superfície do viveiro ( $A$ , adimensional):

$$SW = H_G(1 - A) \quad (5)$$

A  $LW_a$  foi estimada a partir da equação 6 e utilizando dados medidos de umidade relativa do ar horária ( $RH$ , em %) e de temperatura do ar horária ( $T_a$ , em  $^{\circ}C$ ) (Brunt, 1932).

$$LW_a = \sigma(T_a + 273)^4 \times [0.52 + 0.065\sqrt{e_a}] \quad (6)$$

onde  $e_a$  é a pressão de vapor d'água (em Mbar), estimada a partir da equação 7; e  $\sigma$  é a constante de Stefan–Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$ ) (Allen *et al.*, 1998).

$$e_a = \frac{RH \times 6.108 \times 10^{\left(\frac{7.5T_a}{237.3 + T_a}\right)}}{100} \quad (7)$$

A  $LW_w$  foi estimada a partir da equação 8 e utilizando dados medidos de temperatura da água, sendo  $\varepsilon$  a emissividade da superfície do viveiro escavado ( $\varepsilon = 0.98$  para a água) (Henderson-Sellers, 1986):

$$LW_w = \varepsilon \sigma (T_w + 273)^4 \quad (8)$$

Para a estimativa da  $\lambda_E$ , a partir da equação 9, foram utilizados dados medidos de pressão atmosférica ( $P$ , em Mbar),  $T_a$ ,  $T_w$  e evaporação de água ( $E$ , em mm).

$$\lambda_E = \mu_w \rho_w E \quad (9)$$

onde  $\rho_w$  é a densidade da água ( $\rho_w = 1000\ kg\ m^{-3}$ ); e  $\mu_w$  é o calor latente da água (em  $KJ\ g^{-1}$ , estimada a partir da equação 7) (Orlob, 1981):

$$\mu_w = 2.5 - 0.0024T_w \quad (10)$$

O C está relacionado ao  $\lambda_E$  através da razão de Bowen  $\beta$  ( $^{\circ}\text{C Mbar}^{-1}$ ) (Henderson-Sellers, 1984; Allen *et al.*, 1998), sendo estimado a partir de dados horários medidos de pressão atmosférica (P, em Mbar),  $T_a$  e  $T_w$ . C e  $\beta$  foram estimados a partir das equações 11 e 12, respectivamente:

$$C = \lambda E \beta \quad (11)$$

$$\beta = \left( \frac{1,625.4P}{2.5 - 0.0024T_w} \right) \left( \frac{T_w - T_a}{e_{sw} - e_a} \right) \quad (12)$$

onde  $e_{sw}$  é a pressão de saturação de vapor na temperatura da água (mbar), estimada a partir da equação 13:

$$e_{sw} = 6.108 \times 10^{\left( \frac{7.5T_w}{237.3 + T_w} \right)} \quad (13)$$

O  $\Delta S$  é positivo quando o corpo de água está armazenando energia enquanto que negativo quando a energia armazenada é liberada como uma densidade de fluxo de calor do corpo de água para a atmosfera.

#### 4.0 Resultados

A tabela 1 apresenta os valores do Erro Absoluto Médio (MBE), Raiz Quadrada do Erro Quadrático (RMSE) e índice de concordância de Willmott (d) observados na validação da Máquina de Vetores Suporte (SVM) treinada para estimativa da temperatura da água ( $T_w$ ) em viveiros escavados instalados em Jaboticabal-SP a partir da temperatura do ar ( $T_a$ ). Na figura 1 são apresentados os valores médios horários do albedo do viveiro escavado, variando de 0,2 a 0,4, obtidos a partir dos dados medidos no período de 17/07/2017 a 29/09/2017.

O MBE de -2,44% indica uma tendência de subestimativa ( $MBE < 0$ ), associado a RMSE que indica a confiabilidade da precisão de estimativa do método com 5,23%. O d de Willmott apresentou um valor de 0,87, caracterizando elevada concordância dos modelos com os dados mensurados.

**Tabela 1.** Validação da SVM treinada para estimativa da  $T_w$  horária em Jaboticabal-SP. Erro Absoluto Médio (MBE), Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) e o índice de concordância de Willmott (d).

MBE (%)	RMSE (%)	d de Willmott (adimensional)
-2,44	5,23	0,87

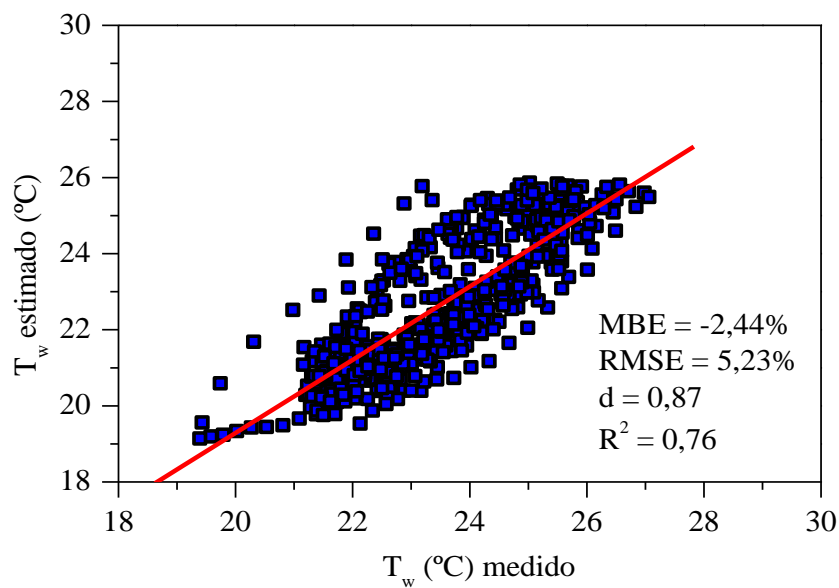


Figura 1. Gráfico de dispersão entre os valores medidos e estimados de Temperatura da água ( $T_w$ ).

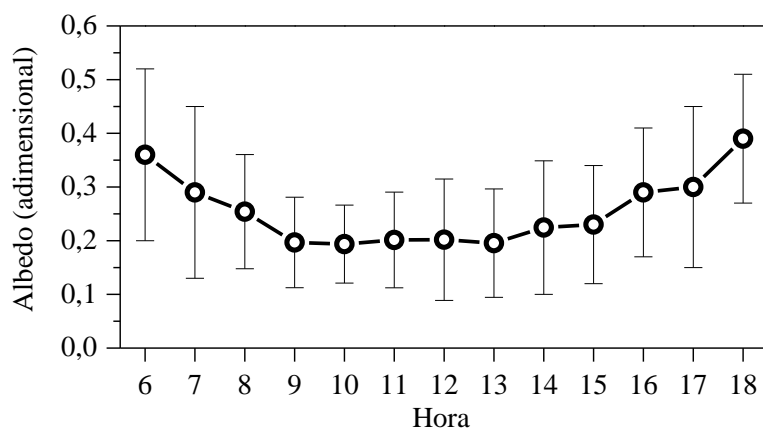


Figura 2. Albedo do viveiro escavado, valores médios horários obtidos a partir dos dados medidos no período de 17/07/2017 a 29/09/2017.

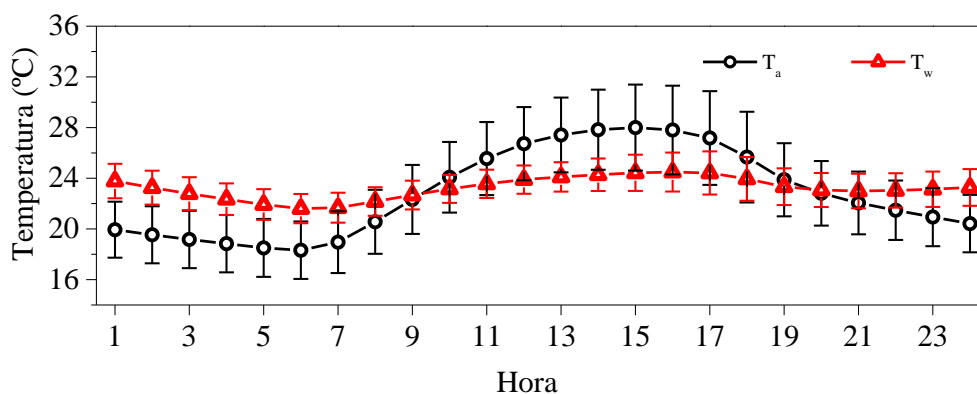


Figura 3. Evolução da temperatura da água do viveiro escavado ( $T_w$  – em vermelho) e da temperatura do ar em Jaboticabal-SP ( $T_a$  – em preto), médias calculadas a partir dos dados medidos ao longo do período de 17/07/2017 a 29/09/2017.

Os resultados na tabela 2 caracterizam o balanço de energia avaliado a partir das entradas e saídas de radiações e o saldo de calor disponível no corpo d'água dos viveiros de cultivo. A entrada de energia por meio da radiação solar líquida (SW) e de onda longa atmosférica (LWa) apresentaram carga energética de 13,24 e 1005,15 MJ/ha, respectivamente. A via com maior entrada energética foi a LWa, sendo 98,7%. A saída de energia foi maior por meio do calor latente na evaporação da água ( $\lambda E$ ), com 231,96 MJ/ha e representando 22,77% da saída total de energia. O saldo de calor final

dos viveiros representam um valor positivo 756,75 MJ/ha disponível no corpo de água. Esses dados demonstram que a partir das entradas e saídas de energia, 74,30% ficou disponível na forma de calor para a manutenção dos processos dependentes dessa fonte.

**Tabela 2.** Carga energética das entradas e saídas de radiações e o saldo de calor em viveiros de aquicultura ao longo do ciclo de produção realizado (60 dias de cultivo).

<b>Componentes do Balanço de Energia</b>	<b>Energia (MJ/ha)</b>	<b>Energia (%)</b>
<b>Input</b>		
Radiação Solar líquida (SW)	13,24 ± 1,65	1,30
Radiação onda longa atmosférica (LWa)	1005,15 ± 124,93	98,7
Total	1018,39 ± 126,58	100
<b>Output</b>		
Radiação de onda longa pela água (LWw)	29,71 ± 3,69	2,91
Calor latente na evaporação da água ( $\lambda E$ )	231,96 ± 39,68	22,77
Fluxo de calor sensível da água para atmosfera (C)	1,68E-04 ± 0	0,1
Total	261,57 ± 42,11	25,68
Balanço/Saldo de Calor ( $\Delta S / \Delta t$ )	756,75 ± 102,53	74,30

\* Dados apresentados como Média ± Desvio Padrão e porcentagem (%) de todos os viveiros. Não houve diferenças estatísticas entre as réplicas.

## 5.0 Discussão

Os corpos de água interiores, como reservatórios, lagos, viveiros etc, compreendem uma parte considerável da superfície terrestre, apresentando um menor albedo e uma maior capacidade de armazenar calor quando comparado a outras superfícies. Em geral, o albedo foi maior durante os horários próximos ao nascer e pôr do Sol e menor nos horários próximos ao meio dia, acompanhando a variação do ângulo horário (figura 2). Verifica-se nos horários próximos ao meio dia uma tendência dos viveiros escavados instalados no CAUNESP refletirem em média 20% da radiação global incidente, enquanto nos horários próximos ao nascer e pôr do Sol a reflexão

atingiu valores próximos a 40%. Essas características combinadas com a troca efetiva de calor na coluna de água favorecem o armazenamento de calor (Li *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2014; Bartůňková *et al.*, 2014; Nordobo *et al.*, 2011; Verburg & Antenucci, 2010; Venäläinen *et al.*, 1999). Dessa maneira, o armazenamento e a liberação do calor dependem do gradiente de temperatura entre o ar (atmosfera) e a água, indicando a dinâmica dos fluxos de calor nessa interface (Eugster *et al.*, 2003; Rouse *et al.*, 2005).

A opção pela temperatura do ar ( $T_a$ ) como variável de entrada, junto da hora do dia, na estimativa da temperatura da água ( $T_w$ ), utilizando a SVM ocorreu devido à similaridade que elas apresentam entre si em relação à variação ao longo das horas do dia (figura 3), indicando a existência de correlação entre elas. A avaliação dos dados por meio da inteligência artificial é mais precisa quando comparado a uma regressão linear para esses modelos de estimativa (Teramoto *et al.*, 2019). Além disso, a temperatura do ar é uma variável meteorológica considerada de fácil medição e disponível na maioria das estações meteorológicas. O tempo de aquecimento e resfriamento do ar é diferente da água, devido às características de cada meio. O aquecimento é mais demorado e conseqüentemente a perda de calor é mais lenta, ao longo das horas do dia na água. Mesmo assim, existe uma boa relação entre a temperatura do ar e a temperatura de pequenos corpos hídricos (Crisp & Howson, 1982). Superfícies aquáticas possuem os menores valores de albedo (figura 2), refletindo uma menor porcentagem da radiação de ondas curtas, que, em conjunto com uma menor perda por radiação de ondas longas, favorece a disponibilidade da energia na forma de saldo de calor (Uda *et al.*, 2013).

O desempenho da SVM na estimativa da  $T_w$  a partir da  $T_a$ , utilizando os dados horários, apresentou uma tendência de subestimar em -2,44%, com um RMSE de 5,23% e  $d$  de Willmott de 0,87, ou seja, o nível de concordância do modelo estimado é de 87%

com os dados coletados. Segundo Weiss *et al.* (2001) a aplicação desses coeficientes pode calibrar e gerar características para os modelos disponíveis, possibilitando uma maior aplicabilidade de locais com características próximas do que o estudo realizou. Assim, os dados estimados nesse trabalho poderão aumentar a eficácia dos modelos aplicados aos sistemas de produção na aquicultura, ou seja, avaliar além das características produtivas padrões, também as qualidades físicas e meteorológicas que podem influenciar o desempenho do cultivo. O coeficiente  $d$  de Willmott, analisado para os dados desse trabalho, sustenta a aplicabilidade do modelo de estimativa para os cultivos, pois diferentes modelos de estimativas aplicados em culturas agrícolas apresentaram coeficientes similares ao nosso, variando de 0,75 a 0,85 (Cunha *et al.*, 2013). Embora seja os primeiros passos para a aplicação de modelos de estimativa para viveiros de aquicultura, o nível de concordância se assemelha a modelos tradicionais desenvolvidos para outras culturas e superfícies (Cuenca, 1989; Snyder, 1992; Allen *et al.*, 1998). A utilização de modelos matemáticos se torna cada vez mais frequente e permite compreender o funcionamento e comportamento dos sistemas diante de modificações nos seus componentes, possibilitando a escolha do modelo adequado para cada ambiente a partir dos dados disponíveis (Elias *et al.*, 2014).

Existe uma relação da radiação solar com a temperatura do ar e a variação da temperatura da água de pequenos lagos e viveiros (Boyd, 2020). O valor de MBE revela, por exemplo, que o valor estimado de temperatura da água de 25°C pode conter um erro de 0,6°C, sendo esse nível de imprecisão influenciada pela distância entre os pontos de monitoramento da temperatura do ar e da água. Semelhante aos nossos dados, trabalhos que avaliaram a estimativa da radiação *UV*, concluíram que a melhoria da acurácia dos modelos empíricos aconteceu a partir de inserção de mais variáveis de entrada ao modelo, ocasionando a diminuição do erro padrão médio e

consequentemente a extensão desse erro (Huang *et al.*, 2011; Teramoto *et al.*, 2019). A estimativa da temperatura da água pode caracterizar os processos da estrutura térmica do viveiro, influenciando diretamente na ciclagem dos nutrientes, na distribuição da biota e no comportamento dos gases dissolvidos (Wetzel, 2001). Embora alguns passos sejam necessários para o aperfeiçoamento do modelo de estimativa da temperatura da água em viveiros de aquicultura, nosso trabalho pode servir como base para o aprimoramento de técnicas que avaliem essa variável em um corpo hídrico de menor tamanho. O conhecimento sobre a variação de temperatura ao longo dos dias de cultivo possibilita a melhoria das técnicas de manejo para a produção. Essa variação pode acarretar em efeitos sobre organismos aquáticos e a qualidade de água, influenciando processos fisiológicos e reações químicas e físicas (Baldisserotto, 2013; Boyd, 2020).

A importância de quantificar e entender o regime de térmico da água é um indicativo de como o corpo hídrico responde aos parâmetros meteorológicos e a capacidade em estocar calor. O saldo de calor é o maior componente do balanço de energia, refletindo a quantidade de energia disponível para a fluxo de calor na interface água-atmosfera (Bussieres *et al.*, 2002). A troca de calor do mesmo com o ambiente em entorno é essencial para compreender outros processos do ecossistema aquático, por exemplo, o metabolismo ecossistêmico e a ciclagem de nutrientes (Livingstone, 1999). Além do mais, o fluxo de calor no ecossistema aquático interfere na duração e tempo de estratificação, na profundidade da termoclina e na temperatura ao longo do dia (Shimoda *et al.*, 2010). Estudos de fluxo energético mostram que os regimes térmicos atmosféricos e lacustres interagem intimamente (Rouse *et al.*, 2003). Apesar da base conceitual sobre fluxo de calor não ser recente, as pesquisas e aplicações no Brasil ainda são escassas. A maior parte desses estudos ainda está concentrada na área agrícola,

visando o conhecimento da energia disponível para os sistemas e das taxas de evapotranspiração para o uso racional da água em culturas (Cunha *et al.*, 2002).

O fluxo energético de um corpo d'água é determinado pelo balanço das entradas e saídas de radiação do sistema, determinando o saldo de calor pela entrada de radiação de onda curta absorvida na superfície do corpo d'água menos a radiação líquida de onda longa emitida para a atmosfera (Hendricks, 2010). As entradas de radiação nesse estudo foram por meio da radiação solar líquida (SW) e onda longa atmosférica (LWa). A radiação solar líquida é a radiação resultante ao meio após todas as trocas radiativas se realizarem, sendo esta energia utilizada nos processos de evaporação, fotossíntese e no aquecimento do ar, do solo e da água (Villanueva *et al.*, 1987). Nossos dados mostram que a contribuição da SW foi de 1,30% da entrada total de energia, pois parte da radiação solar total retorna ao espaço e cerca de 50% da radiação total segue o caminho pela atmosfera e posteriormente chegando a superfície terrestre (Sen, 2008). Apesar de 50% da radiação solar permanecer na camada atmosférica, essa radiação se encontra com uma mistura de nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, ozônio, vapor d'água, material particulado em suspensão (de origem natural e antrópica) e outros gases em menores concentrações (Mendonça & Dannioliveira, 2007), diminuindo a quantidade de radiação de ondas curtas incidentes na superfície terrestre (Kondratyev, 1969).

A LWa neste trabalho contribuiu com 98,7% da entrada total de energia no viveiro. Essa radiação é chamada de onda longa atmosférica e são oriundas da radiação de ondas curtas na atmosfera, bem como da onda longa superficial emitida pelos gases que compõem a atmosfera terrestre, tendo como principal absorvedor o vapor d'água (Idso & Jackson, 1969; Galvão & Fisch, 2000; Dai & Fang, 2014). Dessa forma, a energia térmica proveniente da LWa supera a entrada da SW por não apresentar grandes desvios ao longo do caminho até a superfície e em dias nublados, a quantidade de

radiação não diminui, apresentando o maior aporte energético para o corpo hídrico diante dessa condição climática, sendo um fluxo fundamental na troca radiativa ao nível da superfície (Henderson-Sellers, 1986; Black, 1991; Aguilar *et al.*, 2015). Assim, além das características que compõe as duas formas de radiação de entrada, essa absorção de energia por átomos e moléculas pode ocorrer quando os elétrons destas moléculas ressoam em frequência que correspondem ao estado energético do fóton emitido (Wetzel, 2001; Tundisi, 2008; Esteves, 2011).

O saldo total de energia incorporado aos viveiros foi de 1018,39 MJ/ha a partir da SW e LW<sub>atm</sub>. Esse valor identifica quanto de energia o viveiro absorveu a partir dos componentes de entrada de radiação que sofreram transformações até atingir a superfície do viveiro, ocasionando a distribuição do calor que pode ocorrer por condução, pelo transporte de massas de água e pela turbulência provocado por forças externas (Esteves, 2011). Desse modo, a alta capacidade calorífica da água associada ao transporte vertical de todo material na coluna de água, permite grande potencial de calor em corpos hídricos (Nordbo *et al.*, 2011).

A saída de energia foi caracteriza por meio da perda de calor a partir da radiação de onda longa pela água (LW<sub>w</sub>), calor latente na evaporação da água ( $\lambda E$ ) e fluxo de calor sensível da água para atmosfera (C). A menor perda de energia foi pelo fluxo de calor sensível da água para atmosfera (C), resultando em apenas 0,1% da saída total de energia, sendo justificada pelo equilíbrio entre a temperatura do ar e da água (figura 3). O C está associado a energia que é fornecida ou retirada das moléculas de um fluido durante o seu aquecimento ou resfriamento sem que haja mudança de estado físico (Fernandes *et al.*, 2006). Esse fluxo de calor sensível ocorre por convecção em resposta ao gradiente de temperatura entre o sistema aquático e a atmosfera, contribuindo para o

aquecimento do ar que está em contato (Rodríguez-Rodríguez & Moreno-Ostos, 2006; Collischonn & Tassi, 2009).

A LWw apresenta as mesmas características que a radiação de entrada LWa, mas a saída dessa radiação de onda longa está associada à água do viveiro. Todos os materiais na Terra, por exemplo os corpos hídricos, possuem uma temperatura mais baixa que o Sol, emitindo radiação com comprimento de ondas maiores que a radiação solar. Nossos dados mostram que 2,91% foi perdido dessa forma, ou seja, a intensa entrada de LWatm possivelmente está sendo armazenada como calor para os processos dentro do viveiro. Segundo Souza *et al.* (2019), a elevada incidência de LWa fornece maior quantidade de energia para a superfície, e conseqüentemente se não aproveitada, pode aumentar a emissividade de radiações de ondas longas pela própria superfície.

A parcela mais significativa da perda de energia do viveiro foi por meio do calor latente na evaporação da água ( $\lambda E$ ), representando 22,77% da saída total de energia. Esse fluxo está associado a energia produzida pela passagem da água na interface água-atmosfera via evaporação, aumentando a partir da temperatura do ar elevada, baixa umidade relativa do ar, condições de céu claro e aumento da temperatura da água superficial (Collischonn & Tassi, 2009). Estudos que avaliaram o fluxo de calor latente na evaporação da água em um lago com condições climáticas similares ao nosso trabalho, mostraram um valor de 38,5% da saída total de energia (Elias *et al.*, 2014). Para o balanço de energia, a perda de calor acaba sendo mais expressiva pelo  $\lambda E$  quando comparado às outras saídas, pois o valor da pressão de saturação do ar está diferente da pressão de saturação da água. O ar apresenta uma pressão de saturação máxima, ou seja, o ar consegue receber no máximo 4% do seu volume correspondente a vapor de água, podendo ser ampliada a pressão de saturação a partir do aumento da temperatura do ar (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007). Com isso, após as trocas a saída total de energia

foi de 261,57 MJ/ha, demonstrando que, diante das características incorporadas aos modelos, o saldo de calor disponível nos viveiros foi de 756,75 MJ/ha.

O saldo de calor de um lago depende das entradas e saídas de energia pelas radiações, definindo a quantidade de calor armazenado no lago (Dutton & Bryson, 1962). Nesse trabalho, a determinação do saldo de calor a partir da avaliação do balanço de energia utilizando modelos matemáticos demonstra que 74,30% do saldo final de calor ficou retido no viveiro, apresentando similaridade com outros trabalhos que obtiveram o saldo de calor variando entre 50 ~76,5% (Wang *et al.*, 2014). A partir das entradas e saídas de energia no ponto de vista do calor em relação ao viveiro, o delta S positivo que indica o acúmulo de energia na forma de calor pelo viveiro que pode refletir na temperatura constante ao longo do cultivo. Assim, o gradiente de temperatura na interface água-ar pode indicar as variações de estoque de calor, por exemplo, a diminuição na temperatura do ar pode aumentar a quantidade de calor liberado da água para o ar, indicando que em dias quentes o corpo hídrico tende a estocar mais calor (Verburg & Antenucci, 2013; Zhang & Liu, 2013). O saldo positivo disponível nos viveiros resulta em uma quantidade de energia que pode influenciar a alimentação dos organismos, a dinâmica da cadeia trófica e também a fauna associada ao sedimento, gerando disponibilidade de nutrientes à coluna d'água que poderá influenciar na população de produtores primários.

## **6.0 Conclusão**

O saldo de calor positivo observado nesse estudo mostrou que as quantidades de energia armazenada no viveiro podem manter a temperatura da água, influenciando o metabolismo do ecossistema por meio das reações químicas e físicas no interior dos

viveiros e dos organismos. Os resultados mostram que as estimativas realizadas por meio dos modelos e técnicas de aprendizagem apresentam precisão razoável e podem ser usadas em estudos de balanço energético. Entende-se que, para melhor verificação da acurácia dos dados produzidos e a validação da metodologia utilizada para avaliação do balanço de energia e saldo de radiação de viveiros, são necessários estudos futuros com a obtenção de dados por meio de equipamentos instalados na superfície desses viveiros, comparando com outros modelos existentes.

#### **4.0 Referências**

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO.
- Aguilar, J.L.C., Gentle, A.R., Smith, G.B., Chen, D. 2015. A method to measure total atmospheric long-wave down-welling radiation using a low cost infrared thermometer tilted to the vertical. *Energy*, 81:233-244.
- Avault Jr, J.W. 1996. Fundamentals of aquaculture. AVA Publishing Company Inc., Baton Rouge, Louisiana, pp. 223–280.
- Baldisserotto, B. Fisiologia de peixes aplicada à piscicultura. Santa Maria: Editora da UFSM, 2013. 349p
- Black, P.E. 1991. Watershed Hydrology. New Jersey: Prentice-Hall. Série: Physical and life Sciences, 408 p.
- Boyd, C.E. 2020. Water quality: an introduction. Third edition, Springer
- Brunt, D. 1932. Notes on radiation in the atmosphere. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 58:389-418.
- Bussieres, N., Versegny, D., MacPherson, J.I. 2002. The evolution of AVHRR derived water temperatures over boreal lakes. *Remote Sensing Environmental*, 80:373–384.
- Campbell, G.S., Norman, J.M. 1997. An Introduction to Environmental Biophysics. 2. Ed. Springer-Verlag New York.
- Collischonn, W., Tassi, R. 2009. Introduzindo Hidrologia. Apostila do curso de Hidrologia da Faculdade Federal do Rio Grande do Sul.
- Cuenca, R.H. 1989. Irrigation system design: an engineering approach. New Jersey: Prentice-Hall.
- Cunha, A.R. et al. 2002. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 7:(6)735-743.

- Crisp, D.T., Howson, G. 1982. Effect of air temperature upon mean water temperature in streams in the north Pennines and English Lake District. *Freshwater Biology*, 12:359–367.
- Dai, Q., Fang, X. 2014. A simple model to predict solar radiation under clear sky conditions. *Advances in Space Research*, 53(8):1239-1245.
- De Melo, E.C., Brasil JR, A.C.P. 2002. Um Modelo multi-camadas para Atenuação de Radiação Solar em Florestas e Plantações. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- De Souza, J., Mendonça, R., Lima, M. 2005. Global solar radiation measurements in Maceió Brazil. *RenewableEnergy*, 30:1203–1220.
- Duan, Z., Bastiaanssen, W.G.M. 2015. A new empirical procedure for estimating intra-annual heat storage changes in lakes and reservoirs: review and analysis of 22 lakes. *Remote Sensing of Environment*, 56:156-143.
- Dutton, J.A., Bryson, R.A. 1962. Heat Flux in Lake Mendota. *Limnology and Oceanography*, 7:80-96.
- Ehnberg, J.S.G., Bollen, M.H.J. 2005. Simulation of global solar radiation based on cloud observations. *Solar Energy*, 78(2):157-162.
- Elias, E.C., Brighenti, L.S., Neto, J.F.B. 2014. Estimativa do fluxo de calor em dois lagos tropicais: lago Dom Helvécio e lago Carioca, MG. Dissertação do Program de Pós-graduação em Ecologia, Manejo e Conservação da Vida Silvestre. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Esteves, F.A. 2011. Fundamentos de Limnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 826 p.
- Fernandes, F.A.N. 2006. Termodinâmica Química. 1.ed. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 186 p.
- Furlan, C., Oliveira, A.P., Soares, J., Codado, G., Escobedo, J.F. 2012. The role of clouds in improving the regression model for hourly values of diffuse solar radiation. *Applied Energy*, 92:240-254.
- Galvão, J.A.C., Fisch, G. 2000. Balanço de radiação em área de pastagem na Amazônia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, 8(1):1-10.
- Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorology: a simulation study. [s.l.]: Wageningen Centre for Agricultural Publishing and Documentation.
- Henderson-Sellers, B. 1986. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: a review. *Reviews of Geophysics*, 24(3):625–649.
- Henderson-Sellers, B. 1984. *Engineering Limnology*. Pitman Publishing, Great Britain. Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 300.
- Hendricks, M.R. 2010. *Introduction to physical hydrology*. New York: Oxford University, 331 p.
- Huang, M., Jiang, H., Ju, W., Xiao, Z. 2011. Ultraviolet radiation over two lakes in the Middle and lower reaches of the Yangtze River, China: an innovative model for UV estimation. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22(5):491-506.
- Idso, S.B., Jackson, R.D. 1969. Thermal radiation from the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 74(23):5397-5403.
- Iqbal, M. 1983. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press. The University of British Columbia, Vancouver.
- Jain, D. 2007. Modeling the thermal performance of na aquaculture pond heating with greenhouse. *Building and Environment*, 42:557-565.

- Kettle, A.J., Hughes, C., Unazi, G.A., Birch, L., Mohie-El-Din, H., Jone, M.R. 2012. Role of groundwater exchange on the energy budget and seasonal stratification of a shallow temperate lake. *Journal of Hydrology*, 470–471.
- Klein, S. A. 1977. Calculation of Monthly Average Insolation on titled surfaces. *Solar Energy*, 9:325-329.
- Kondratyev, K.Y. 1969. *Radiation in the atmosphere*. Londres: Academic Press, 12:912p.
- Kumar, R., Aggarwal, R.K., Sharma, J.D. 2015. Comparison of regression and artificial neural network models for estimation of global solar radiations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52:1294–1299.
- Lamoureux, J., Tiersch, T. R., Hall, S. G. 2006. Pond heat and temperature regulation (PHATR): Modeling temperature and energy balances in earthen outdoor aquaculture ponds. *Aquacultural Engineering*, 34:103–116.
- Lang, R.P., Romaine, R.P., Tiersch, T.R. 2003. Induction of early spawning of channel catfish in heated earthen ponds. *North Am. J. Aquacult.* 65(2):73–81.
- Lawson, T.B. 1995. *Fundamentals of aquacultural engineering*. Chapman and Hall, NY, pp. 355.
- Li, Z., Lyu, S.A.O.Y., Wen, L., Zhao, L., Wang, S. 2015. Long-term energy flux and radiation balance observations over Lake Ngoring, Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*. v.155, p. 13-25.
- Livingston, D.W. 1999. Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, 44:1486-1497.
- Mendonça, F., Danni-Oliveira, I.M. 2007. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Texto, 206 p.
- Mohammadi, K., Shamshirband, S., Anisi, M.H., Alam, K.A., Petkovic, D. 2015. Support vector regression based prediction of global solar radiation on a horizontal surface. *Energy Conversion and Management*, 91:433–438.
- Meenal, R., Selvakumar, I. 2018. Assessment of SVM, empirical and ANN based solar radiation prediction models with most influencing input parameters. *Renewable Energy*, 121:324-343.
- Nordbo, A. 2011. Long-term energy flux measurements and energy balance over a small boreal lake using eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research*, 116.
- Orlob, G. 1981. Models for stratified impoundments. In: Biswas, A. (Ed.), *Models for Water Quality Management*. New York: McGraw Hill, 273–313.
- Pereira, A.R., Angelocci, L.R., Sentelhas, P.C. 2007. *Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas*. Edição Revista e Ampliada. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Departamento de Ciências Exatas. Universidade de São Paulo.
- Rolim, G.S., Aparecido, L.E.O. 2015. Camargo, Köppen and Thornthwaite climate classification systems in defining climatical regions of the state of São Paulo, Brazil. *International Journal of Climatology*.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Moreno-Ostos, E. 2006. Heat budget, energy storage and hydrological regime in a coastal lagoon. *Limnologica*, 37:217-227.
- Rouse, W.R. 2003. Interannual and seasonal variability of the surface energy balance and temperature of Central Great Slave Lake. *Journal of Hydrometeorology*, 4:720-730.

- Sen, Z. 2008. *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy*. Londres: Springer, 276 p.
- Shimoda, Y. 2010. Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: What have we really learned from the north temperate deep lakes? *Journal of Great Lakes Research*, 37(1):173-19.
- Snyder, R.L. 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering of ASCE*, New York, 118, (6):977-980.
- Souza, A. P.; Zamadei, T.; Monteiro, E. B.; Casavecchia, B. H. Transmissividade atmosférica da radiação global na Região Amazônica de Mato Grosso. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 4, p. 639-648, 2016.
- Souza, A.P., Casavecchia, B., Almeida, F.T., Zolin, C.A., Lulu, J., Magalhães, C.A.S. 2019. Estimativas das componentes de balanço de radiação com base no coeficiente de transmissividade atmosférica. *Agrometeoros*, 27:101-122.
- Teramoto, E.D., Santos, C.M., Escobedo, J.F., Dal Pai, A., Silva, S.H.M.G. 2019. Comparação de Métodos de Estimativa da Radiação Solar Ultravioleta Horária: Modelos Empíricos, Redes Neurais Artificiais e Máquinas de Vetores de Suporte. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35:35-43.
- Tubelis, A., Nascimento, F.J.L., Folion, L.L. 1976. Estimativa da radiação solar global diária em Botucatu - SP, a partir da insolação diária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira - Botucatu Científica*, 26:53-60.
- Tundisi, J.G., Tundisi, T.M. 2008. *Limnologia*. Oficina de Textos, 631 p.
- Uda, P.K., Corseuil, C.W., Kobiyama, M. 2013. Mapeamento do saldo de radiação da bacia do Alto Rio Negro, região sul brasileira. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18:249-258.
- Vapnik, V.N. 1998. *Statistical learning theory*. Wiley.
- Varejão-Silva, M.A. 2006. *Meteorologia e Climatologia*. Versão Digital 2. Recife.
- Vergburg, P., Antenucci, J.P. 2010. Persistent unstable atmospheric boundary layer enhances sensible and latent heat loss in a tropical great lake: Lake Tanganyika. *Journal of Geophysical Research*, 115:11-109.
- Villanueva, J.G. 1987. Estudo do coeficiente de transparência do vapor d'água sobre a cultura do feijão. Piracicaba, 58 p. Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- Weligepolage, K. 2005. Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remotesensing – A case study in Hupselse Beek, The Netherlands, p.114.
- Weiss, A., Hays, C.J., Hu, Q., Easterling, W.E. 2001. Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop yield simulations. *Agronomy Journal*, 93:1321-1326.
- Wang, W. 2014. Temporal and spatial variations in radiation and energy balance across a large freshwater lake in China. *Journal of Hydrology*, 511:811-824.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3. ed. San Diego: Academic Press, 1006p.
- Yu, S., Liu, J., Xu, J., Wang, H. 2011. Evaporation and energy balance estimates over a large inland lake in the Tibet-Himalaya. *Environmental Earth Sciences*, 64:1169-1176.

Zhang, Q., Liu, H. 2013. Interannual variability in the surface energy budget and evaporation over a large Southern inland water in the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118:4290-4302.

## Considerações Gerais

1. Este trabalho apresenta dois capítulos que utilizaram a metodologia do balanço de energia para avaliar a energia nas suas diferentes formas dentro dos cultivos na aquicultura. Essa metodologia ganha expressividade dentro do meio científico e apresenta um potencial para ser classificada como uma ferramenta para avaliação da sustentabilidade desses sistemas, pois mesmo com algumas deficiências para medir cargas minuciosas, o balanço pode prever os principais efeitos dos impactos positivos e negativos diante do cultivo escolhido, por exemplo, a produção integrada do lambari à outras espécies.
2. A energia é um recurso importante para todos os processos que ocorrem atualmente no desenvolvimento da humanidade, caracterizada em diferentes tipos de energia e com funcionalidades diversas. Nossos trabalhos demonstram que a energia ganha extrema atenção em muitos processos que consomem e sintetizam energia em áreas de grande interesse para produção de alimentos, geração de tecnologia entre outras. Existe um atraso/carência de pesquisa voltada a análise de energia nas diferentes formas para os processos produtivos na aquicultura. Portanto, os dados gerados nesse trabalho são importantes para subsidiar futuras pesquisas na área por meio das diferentes aplicabilidades que essas análises apresentam, potencializando o desenvolvimento da aquicultura.
3. Os compartimentos ecológicos estabelecidos e as análises energéticas aplicadas, caracterizam de forma geral o aproveitamento da energia nas diferentes formas inseridas que são assimiladas dentro do viveiro. Podemos aproximar o comportamento desses viveiros como um ecossistema, apresentando suas características próprias e refletindo nas cadeias tróficas que transformam a

energia. Essas transformações nos sistemas integrados, apresentam caminhos tróficos maiores quando comparado ao monocultivo, mas embora o caminho seja maior, o aproveitamento da quantidade de energia disponível é melhorado, direcionando a produção para o caminho sustentável.

4. As análises energéticas se mostraram fundamentais para o entendimento dos caminhos e acúmulo energéticos dentro da produção do lambari em diferentes sistemas, pois a energia atua no funcionamento dos processos físicos, químicos e biológicos. Nesses processos, o ciclo hidrológico, do carbono e do nitrogênio são característicos desses ambientes e influenciados pela energia disponível. Ao contrário do que acontece com átomos e moléculas nesses ciclos, que podem ser usados repetidas vezes por infinitas gerações de organismos por meio de um processo de ciclagem, a energia não é reciclada, e se perde a cada transformação, mostrando a importância da gestão dos recursos e fontes energéticas aplicadas aos cultivos.