

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 24/02/2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP

**Exigências de lisina e metionina digestíveis
em dietas para tambaqui (*Colossoma
macropomum*) em fase de crescimento e seus
efeitos no metabolismo lipídico**

Andressa Tellechea Rodrigues

Jaboticabal, São Paulo

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP

**Exigências de lisina e metionina digestíveis
em dietas para tambaqui (*Colossoma
macropomum*) em fase de crescimento e seus
efeitos no metabolismo lipídico**

Andressa Tellechea Rodrigues

Orientador: Prof. Dr. Dalton José Carneiro

Tese apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Aquicultura do
Centro de Aquicultura da UNESP -
CAUNESP, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Doutora.

Jaboticabal, São Paulo

2023

R696e Rodrigues, Andressa Tellechea
Exigências de lisina e metionina digestíveis em dietas para tambaqui
(*Colossoma macropomum*) em fase de crescimento e seus efeitos no
metabolismo lipídico / Andressa Tellechea Rodrigues. -- Jaboticabal, 2023
x, 189 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Centro de
Aquicultura, 2023

Orientador: Dalton José Carneiro

Banca examinadora: Cláudia Raquel Cêa de Aragão Teixeira, Cleber
Fernando Menegasso Mansano, Renata Guimarães Moreira Whitton,
Wilson Massamitu Furuya

Bibliografia

1. Tambaqui. 2. Metabolismo lipídico. 3. Produção. 4. *Colossoma
macropomum*. 5. Aminoácidos. I. Título. II. Jaboticabal-Centro de
Aquicultura.

CDU 639.3.043

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

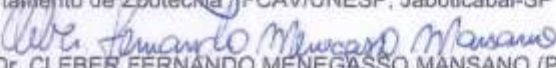
TÍTULO DA TESE: Exigências de lisina e metionina digestíveis em dietas para tambaqui (*Colossoma macropomum*) em fase de crescimento e seus efeitos no metabolismo lipídico

AUTORA: ANDRESSA TELLECHÊA RODRIGUES

ORIENTADOR: DALTON JOSÉ CARNEIRO

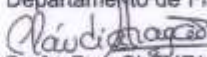
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Aquicultura, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DALTON JOSÉ CARNEIRO (Participação Presencial)
Departamento de Zootecnia / FCAV/UNESP, Jaboticabal-SP


Prof. Dr. CLEBER FERNANDO MENEGASSO MANSANO (Participação Presencial)
Programas de PPG em Ciências Ambientais e Produção Animal / Universidade Brasil, Campus Fernandópolis,
Fernandópolis-SP

Prof. Dr. WILSON MASSAMITU FURUYA (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa-PR

Profa. Dra. RENATA GUIMARÃES MOREIRA WHITTON (Participação Virtual)
Departamento de Fisiologia Geral / Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências (IB/USP), São Paulo-SP


Profa. Dra. CLÁUDIA RAQUEL CÊA DE ARAGÃO TEIXEIRA (Participação Virtual)
Centro de Ciências do Mar (CCMAR) / Universidade do Algarve, Faro-Portugal

Jaboticabal, 24 de fevereiro de 2023

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais. A eles, amor e gratidão eternos.

*“Eu vos digo: é preciso, às vezes, ter
um pouco de caos dentro de si, para
poder dar à luz uma estrela dançante.”*

Friedrich Nietzsche

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez.”

George Bernard Shaw (1856-1950)

AGRADECIMENTOS

O espaço limitado desta seção de agradecimentos, não me permite agradecer, como deveria, a todas as pessoas que, ao longo desse processo me ajudaram, direta ou indiretamente, a alcançar os meus objetivos e a realizar esta etapa da minha formação acadêmica. Assim, deixo apenas algumas palavras, poucas, mas com profundo sentimento de reconhecimento e gratidão.

À Deus, onipotente em minha vida, especialmente pelo cuidado com as pessoas que amo durante estes anos e pelas pessoas colocadas em meu caminho. Gratidão!

Aos meus pais e irmã pela compreensão, incentivo e apoio. Esta conquista também é de vocês. O meu eterno agradecimento.

Ao Prof. Dr. Dalton José Carneiro pela orientação, confiança, ensinamentos, humildade, paciência, acolhimento, conselhos, apoio e dedicação ao trabalho. Muito obrigada pelo exemplo de profissional que és para mim e por ter me adotado cientificamente. Sou grata por poder trabalhar com o senhor e ainda por poder incomodá-lo até mesmo à 1700km de distância neste último ano!

À Prof^a Dr^a Renata Guimarães Moreira Whitton e a toda a sua equipe do Laboratório de Metabolismo e Reprodução de Organismos Aquáticos (LAMEROA) do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (USP). Muito obrigada pelo acolhimento, ensinamentos, orientação, paciência e auxílio e apoio nas análises de metabolismo e ácidos graxos.

Ao senhor Vagner Alberto (técnico do LAMEROA), por todo o auxílio nas análises de metabolismo e ácidos graxos, orientação, ensinamentos, dedicação em suas atividades, paciência e risadas. Muito obrigada senhor Vagner!

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), ao Centro de Aquicultura da Unesp (CAUNESP) e ao Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (USP) por toda a estrutura disponibilizada e apoio técnico.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo nº 140781/2019-6) pela concessão da bolsa de doutorado.

À CJ do Brasil LTDA pela doação de aminoácidos.

À Guabi Nutrição e Saúde Animal S.A. pela doação de ingredientes.

À Alltech do Brasil pela doação de antioxidante e antifúngico.

À Evonik Industries pela doação de aminoácidos

Ao Grupo MCASSAB pela doação de vitamina C.

À Socil pela doação de suplemento vitamínico e mineral.

À todos do Laboratório de Alimentação e Nutrição de Organismos Aquáticos (LANOA) e a todos que passaram por ele durante este período, especialmente ao Magdiel, Denis, Caio, Jesaías, Jéssica, Marcelo, Juliano, Laura, Lígia, Thalys, Camila, Gabriel, Isabela, Nayara e Vinicius. Meus sinceros agradecimentos por toda a ajuda, companheirismo, histórias e amizades geradas. Acredito que ninguém faz nada sozinho e se eu consegui chegar até aqui, isto foi porque vocês também estiveram comigo. Gratidão!

Aos parceiros de vida acadêmica que o mestrado presenteou e que incomodei bastante. Thiago, Cleber, Kifayat e Monique, muito obrigada!

Aos parceiros e as suas equipes para coletas e análises que me socorreram durante esses anos, principalmente no período de pandemia. Alex, Amanda (Capô) e Suzana, muito obrigada!

As amigas que a pós-graduação presenteou. Especialmente, à Daiane e a Celma que ajudaram a cuidar do meu monstrinho “Zoe”. Muito obrigada!

Aos meninos de SP durante as análises de metabolismo e ácidos graxos. Kass e Neto, obrigada por toda a ajuda!

Aos funcionários do Centro de Aquicultura da Unesp (CAUNESP), principalmente ao senhor Valdecir, Márcio, Luís, David e Roberson pela paciência e ajuda em inúmeras atividades relacionadas a este trabalho.

Aos grandes mestres desta instituição, pelas valiosas disciplinas e trocas de conhecimentos.

Aos membros da banca examinadora de qualificação e defesa desta tese, muito obrigada pela atenção, disponibilidade e as valiosas contribuições!

Aos professores do período de graduação que pude reencontrar no ambiente de trabalho durante o ano de 2022, especialmente aos que incomodei com os “benditos scripts e gráficos”. Grata!

Aos meus amigos e amigas que mesmo longe (alguns), me apoiaram sempre... Juliana, Mônica, Lúcia, Nicole, Jane, João Adelino, Cláudia, Aline, Josi, Amanda, Monique, Alexandra, Rafael, Allana, Deise, Victor, Taynara e Andrea. Muito obrigada!

À Jaboticabal que me acolheu e deixará saudades!

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho. Muito obrigada!

Se eu consegui chegar até aqui, foi porque vocês também estiveram comigo e fizeram parte deste processo. Gratidão!

APOIO FINANCEIRO

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Bolsa de Doutorado, Processo nº 140781/2019-6.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Objetivou-se determinar as exigências de lisina e metionina digestíveis em dietas para tambaqui em fase de crescimento de 100 a 500 g considerando o desempenho, a eficiência nutricional e a influência destes aminoácidos no metabolismo lipídico e em outras reservas de energia. Em dois períodos experimentais, os peixes foram alimentados até a saciedade aparente com dietas isoproteicas e isocalóricas, contendo seis níveis crescentes de lisina digestível: 8,14; 11,37; 14,56; 17,74; 20,86 e 24,07 g kg⁻¹ (Experimento I) ou seis níveis crescentes de metionina digestível: 2,96; 4,29; 5,54; 6,73; 8,02 e 9,33 g kg⁻¹ (Experimento II), por 80 e 85 dias, respectivamente. Em cada um deles, foram distribuídos 252 tambaquis (14 peixes / unidade experimental) com peso médio inicial de $\pm$ 125 g, seguindo um delineamento inteiramente ao acaso com seis tratamentos e três repetições. No Capítulo 2, os níveis de Lisina de 8,14 a 24,07 g kg⁻¹ influenciaram nas variáveis de desempenho e eficiência nutricional ($P < 0,05$). A exigência de Lis digestível foi determinada em 14,49 g kg⁻¹ MS (5,83 % da PD) pelo modelo *Linear Response Plateau* (LRP), com base no ganho em peso dos peixes. O perfil aminoacídico estimado por meio do conceito de proteína ideal foi de 12,39 de arginina; 2,75 de histidina; 6,99 de isoleucina, 13,15 de leucina; 14,49 de lisina; 5,47 de metionina; 4,78 de fenilalanina; 7,03 de treonina; 8,33 de valina, 1,45 de cistina e 2,83 g kg⁻¹ MS de tirosina. No Capítulo 4, os níveis de Metionina influenciaram nas variáveis analisadas de desempenho e a eficiência nutricional ($P < 0,05$), exceto no consumo alimentar. O nível ótimo de metionina digestível foi estimado em 5,51 g kg⁻¹ MS (2,19 % da PD) (na presença de 2,61 g kg⁻¹ de cistina), pelo ajuste ao modelo broken-line quadrático (BLq) associado ao platô do LRP, com base no ganho em peso. A influência destes aminoácidos nos processos de mobilização e deposição de lipídios e outras reservas de energia foi avaliada em ambos os ensaios experimentais (Capítulos 3 e 5). Foram avaliadas as variáveis de eficiência de utilização de energia das dietas, índices somáticos, os metabólitos sanguíneos, os metabólitos teciduais e a composição corporal da espécie nos dois experimentos. No Capítulo 3, a mobilização de lipídios foi influenciada pelos níveis de Lisina no tecido hepático e muscular. Os níveis deste AA também afetaram a composição corporal da espécie ($P < 0,05$), exceto a matéria mineral. A deficiência de Lisina induz ao aumento da concentração de lipídios no sangue, músculo e composição corporal da espécie. No Capítulo 5, os níveis de Metionina não afetaram a composição do corpo inteiro da espécie ($P > 0,05$). A incorporação de reservas de energia foi observada no tecido hepático (glicogênio) e muscular (lipídio e glicogênio) e o fornecimento de Metionina próximo a exigência nutricional melhorou os níveis de colesterol total e o peso corporal final dos peixes. As funções destes aminoácidos atreladas a regulação do metabolismo lipídico e energético também devem ser consideradas nas formulações de dietas para melhorar a eficiência do uso de nutrientes e energia durante o desenvolvimento de tambaquis. Estas informações contribuirão para a formulação de dietas que atendam às exigências em Lisina e Metionina para melhor desempenho e eficiência nutricional da espécie, permitindo o desenvolvimento de dietas ainda mais eficientes do ponto de vista biológico, ambiental e econômico.

PALAVRAS-CHAVE

L-lisina, perfil aminoacídico, L-metionina, desempenho, metabolismo, tambaquis.

ABSTRACT

This study aimed to determine digestible lysine and methionine requirements in diets for tambaqui in the growth phase from 100 to 500 g, considering performance, nutritional efficiency and the influence of these amino acids on lipid metabolism and other energy reserves. In two experimental periods, the fish were fed to the apparent satiety with isoprotein and isocaloric diets, containing six increasing levels of digestible lysine: 8.14, 11.37, 14.56, 17.74, 20.86 and 24.07 g kg⁻¹ (Experiment I) or six increasing levels of digestible methionine: 2.96, 4.29, 5.54, 6.73, 8.02 and 9.33 g kg⁻¹ (Experiment II), for 80 and 85 days, respectively. In each of them, 252 tambaquis (14 fish / experimental unit) with average initial weight of $\pm$ 125 g were distributed, following a completely randomized design with six treatments and three replications. In Chapter 2, lysine levels from 8.14 to 24.07 g kg⁻¹ influenced the variables of performance and nutritional efficiency ($P < 0.05$). Digestible lysine requirement was determined in 14.49 g kg⁻¹ DM (5.67% of DP) by *Linear Response Plateau* (LRP) model, based on protein retention efficiency (PRE). The amino acid profile estimated using the ideal protein concept was 12.39 arginine, 2.75 histidine, 6.99 isoleucine, 13.15 leucine, 14.49 lysine, 5.47 methionine, 4.78 phenylalanine, 7.03 threonine, 8.33 valine, 1.45 cystine, and 2.83 g kg⁻¹ DM tyrosine. In Chapter 4, methionine levels significantly influenced performance and nutritional efficiency ($P < 0.05$), except for feed diets, lipid composition, and gross energy content. The optimal level of digestible methionine was estimated at 5.51 g kg⁻¹ DM (2.19 % of the DP) (in the presence of 2.61 g kg⁻¹ of cystine), by fitting the broken-line quadratic model (BLq) associated with the plateau of the LRP, based on the PRE. The effects of these amino acids on the mobilization and deposition of lipids were evaluated in both experimental trials (Chapters 3 and 5). Somatic indices, blood metabolites, tissue metabolites, and body mass composition of the species were evaluated in the two experiments. In Chapter 3, lipid mobilization was influenced by lysine levels in hepatic and muscle tissue. Except for mineral matter, the level of this amino acid also affected the body mass composition of the species ($P < 0.05$). Lysine deficiency induces lipid accumulation in the blood, muscle, and body mass composition of the species. In Chapter 5, methionine levels did not affect the body mass composition of the species ($P > 0.05$). The incorporation of energy reserves in the hepatic (glycogen) and muscle (lipid and glycogen) tissues was observed and supplying methionine close to the nutritional requirement improved the fish's cholesterol levels and final body weight (Chapter 5). To increase the efficiency of nutrient and energy utilization during the development of tambaqui, diet formulations should also consider the effects of methionine and lysine on the regulation of lipid and energy metabolism. As a result of this information, diets can be formulated to meet the nutritional requirements of the species for maximum performance and nutritional efficiency, allowing to develop if diets that are even more effective from a biological, environmental and economic perspective.

KEYWORDS

L-lysine, amino acid profile, L-methionine, performance, metabolism, tambaqui.

1. INTRODUÇÃO

A aquicultura intensiva exige o fornecimento de dietas cada vez mais eficientes do ponto de vista biológico e econômico. A fração proteica apresenta-se como a mais dispendiosa na alimentação de peixes (Riegel, 2012) e o valor biológico deste nutriente depende do balanceamento de aminoácidos essenciais e não essenciais, pois os peixes apresentam exigências específicas de AAs. Os aminoácidos que não são sintetizados suficientemente pelo organismo animal e que são pouco disponíveis na maioria dos alimentos (aminoácidos essenciais) devem ser incluídos em níveis adequados na dieta para garantir as suas funções fisiológicas e de crescimento adequadas (Li et al., 2009; Wu, 2013; Wu, 2014).

A lisina apresenta-se como um dos AAs mais limitantes em ingredientes de origem vegetal, comumente utilizados na produção de dietas comerciais para peixes (Nunes et al., 2014). Na composição corporal dos peixes, este aminoácido encontra-se em maior concentração entre os AAAs, pois possui o seu metabolismo direcionado para a síntese proteica (Valente et al., 2013). Desta forma, na nutrição de peixes, a lisina é alvo de vários ensaios de dose-resposta e também como aminoácido referência para estimativa do perfil aminoacídico com base no conceito de proteína ideal (Abimorad et al., 2010; Furuya et al., 2004; Furuya et al., 2005; Furuya et al., 2012; Leite et al., 2019; Michelato et al., 2013; do Nascimento, 2015).

A possibilidade de reduzir o teor de proteína na dieta foi demonstrada utilizando o conceito de proteína ideal (Boisen, Hvelplund e Weisbjerg, 2000; Wilson, 2002; Wilson e Poe, 1985), considerando que o adequado balanceamento de aminoácidos aumenta a capacidade de aproveitamento da fração proteica pelos peixes, colaborando para uma menor excreção de nitrogênio ao ambiente (Abimorad et al., 2009; Botaro et al., 2007; Ebeneazar et al., 2022; Quadros, 2009). Além disso, o ajuste dos aminoácidos essenciais conforme as necessidades nutricionais dos peixes e a sua fase de desenvolvimento permitem a formulação de dietas ainda mais eficientes, o que é necessário para a otimização desses nutrientes para melhor crescimento e eficiência nutricional (Green e Hardy, 2002; Peres e Oliva-Teles, 2009; Rollin et al., 2003; Wilson, 2002).

Vários estudos foram realizados sobre a alimentação e nutrição de espécies nativas, especialmente sobre a exigência de alguns aminoácidos essenciais e perfil de aminoácidos para *Colossoma macropomum*. Mas estes estudos foram

desenvolvidos apenas para a fase de crescimento inicial (Buzollo, 2014; Buzollo et al., 2019; Guimarães et al., 2014; Liebl et al., 2022; Marchão et al., 2020; Nascimento, 2015; Pereira Junior et al., 2013; Rodrigues et al., 2014; Sandre et al., 2017; de Souza et al., 2019).

O tambaqui (*Colossoma macropomum*, Cuvier, 1818) é a espécie nativa mais produzida no Brasil, representando 31,2% da produção nacional (IBGE, 2018; Peixe BR, 2022). Apresenta características favoráveis à piscicultura, como rusticidade, rápido crescimento e hábito alimentar onívoro (Araújo-Lima e Gomes, 2005; Buzollo et al., 2019; Honda, 1974; Nascimento, 2015; Pereira Junior et al., 2013; Rodrigues et al., 2014; Sandre et al., 2017). O conhecimento disponível sobre a alimentação e nutrição de tambaquis em diferentes fases do ciclo de produção, especialmente em fase de crescimento (100 a 500 g), ainda é incipiente. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi determinar a exigência de lisina digestível e o perfil de aminoácidos para a elaboração de dietas nutricionalmente mais eficientes para a produção da espécie (100 a 500 g).

5. CONCLUSÃO

Os diferentes níveis do aminoácido não influenciaram na deposição de macronutrientes na composição do corpo inteiro da espécie. A incorporação de reservas de energia foi observada no tecido hepático (glicogênio) e muscular (lipídio e glicogênio) e o fornecimento de metionina próximo a exigência nutricional da espécie (5,54 g kg⁻¹ de metionina) melhorou os níveis de colesterol. Além de seu papel na síntese de proteínas, as funções de metionina atreladas a regulação do metabolismo lipídico e energético também devem ser consideradas nas formulações de dietas para melhorar a eficiência do uso de nutrientes e energia durante o desenvolvimento de tambaquis. Também é necessário fornecer “insights” mais aprofundados sobre o papel regulador de metionina e a assimilação/incorporação de energia e nutrientes em tecidos durante a fase de crescimento de 100 a 500 g da espécie, em função da composição nutricional da dieta.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo de Bolsa nº 140781/2019-6), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) (Código de Financiamento nº 001). À CJ do Brasil LTDA, Guabi Nutrição e Saúde Animal S.A., Evonik Industries, Alltech do Brasil e Grupo MCASSAB.

REFERÊNCIAS

Abimorad, E. G., Carneiro, D. J., Urbinati, E. C., 2007. Growth and metabolism of

- pacu (*Piaractus mesopotamicus* Holmberg 1887) juveniles fed diets containing different protein, lipid and carbohydrate levels. *Aquac. Res.* 38, 36-44. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01621.x>
- Abimorad, E. G., Ducatti, C., Castellani, D., Jomori, R. K., Portella, M. C., Sartori, M. M. P., Carneiro, D. J., 2017. Dietary lysine deficiency increases the incorporation rate of nitrogen-free compounds in muscle of pacu *Piaractus mesopotamicus*. *Aquaculture* 479, 522-527. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.06.033>
- Ahmed, I., 2014. Dietary amino acid L-methionine requirement of fingerling Indian catfish, *Heteropneustes fossilis* (Bloch-1974) estimated by growth and haemato-biochemical parameters. *Aquac. Res.* 45, 243-258. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2012.03221.x>
- Aissa, A. F., Tryndyak, V., de Conti, A., Melnyk, S., Gomes, T. D., Bianchi, M. L., James, S. J., Beland, F. A., Antunes, L. M., Pogribny, I. P., 2014. Effect of methionine-deficient and methionine-supplemented diets on the hepatic one-carbon and lipid metabolism in mice. *Mol. Nutr. Food Res.* 58, 1502-1512. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201300726>
- Aissa, A. F., Tryndyak, V. P., de Conti, A., Machado, A. R. T., Tuttis, K., Machado, C. S., Hernandez, L. C., Santos, P. W. S., Serpeloni, J. M., Pogribny, I. P., Antunes, L. M. G., 2022. Epigenetic changes induced in mice liver by methionine-supplemented and methionine-deficient diets. *Food Chem. Toxicol.* 163, 112938. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.112938>
- Aledo, J. C., 2019. Methionine in proteins: the Cinderella of the proteinogenic amino acids. *Protein Sci.* 28, 1785-1796. <https://doi.org/10.1002/pro.3698>
- Amanajás, R. D., Val, A. L., 2022. Thermal biology of tambaqui (*Colossoma macropomum*): General insights for aquaculture in a changing world. *Rev. Aquac.* 1-11. <https://doi.org/10.1111/raq.12732>
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists), 2016. Official Methods of Analysis (20thed.). Rockville, USA: AOAC International.
- Araújo-Lima, C. A. R., Gomes, L. C., 2005. Tambaqui. *In*: Baldisseroto, B., & Gomes, L. C. *Espécies nativas para piscicultura no Brasil*. pp.175-202. Santa Maria: UFSM.
- Bidinotto, P. M., Moraes, G., Souza, R. H. S., 1997. Hepatic glycogen and glucose in eight tropical fresh water teleost fish: a procedure for field determinations of micro samples. *Bol. Tec. CEPTA* 10, 53-60. ISSN 0103-1112
- Buzollo, H., Nascimento, T. M. T., Sandre, L. C. G., Neira, L. M., Jomori, R., Carneiro, D. J., 2018. Apparent digestibility coefficients of feedstuff used in tambaqui diets. *Bol. Inst. Pesca* 44, p. 1-7. ISSN 1678-2305 online version
- Brown, M. S., Goldstein, J. L., 1997. The SREBP pathway: regulation of cholesterol

- metabolism by proteolysis of a membrane-bound transcription factor. *Cell* 89, 331-340. [https://doi.org/10.1016/s0092-8674\(00\)80213-5](https://doi.org/10.1016/s0092-8674(00)80213-5)
- Conceição, L. E. C., Grasdalen, H., Rønnestad, I., 2003. Amino acid requirements of fish larvae and post-larvae: new tools and recent findings. *Aquaculture* 227, 221-232. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00505-2](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00505-2)
- Coutinho, F., Simões, R., Monge-Ortiz, R., Furuya, W. M., Pousão-Ferreira, P., Kaushik, S., Oliva-Teles, A., Peres, H., 2017. Effects of dietary methionine and taurine supplementation to low-fish meal diets on growth performance and oxidative status of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. *Aquaculture* 479, 447-454. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.06.017>
- Chen, H., Fan, W., Zhang, H., Yue, P., Wang, R., Zhang, W., Mai, K., 2023. Effects of dietary methionine on growth and body composition, indicators of digestion, protein metabolism and immunity, and resistance to heat stress of abalone *Haliotis discus hannai*. *Aquaculture* 563, 738978. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738978>
- Chi, S. Y., He, Y. F., Zhu, Y., Tan, B. P., Dong, X. H., Yang, Q. H., et al., 2019. Dietary methionine affects growth and the expression of key genes involved in hepatic lipogenesis and glucose metabolism in cobia (*Rachycentron canadum*). *Aquac. Nutr.* 26,123-133. <https://doi.org/10.1111/anu.13006>.
- Craig, P. M., Moon, T. W., 2013. Methionine restriction affects the phenotypic and transcriptional response of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to carbohydrate enriched diets. *Br. J. Nutr.* 109, 402-412. <https://doi.org/10.1017/S0007114512001663>
- Dias, J., Arzel, J., Corraze, G., Kaushik, J., 2001. Effects of dietary L-carnitine supplementation on growth and lipid metabolism in European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquac. Res.* 32, 206-215. <https://doi.org/10.1046/j.1355-557x.2001.00016.x>.
- Dogan, G., Bircan, R., 2015. The effects of diets containing hazelnut meal supplemented with synthetic lysine and methionine on development of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Turkish J. Fish Aquat. Sci.* 15, 119-126. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v15_1_13
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., Smith, F., 1956. Colorimetric methods for determination of sugars and substances relates. *Anal. Chem.* 28, 350-358. <https://doi.org/10.1021/AC60111A017>
- Elmada, C. Z., Huang, W., Jin, M., Liang, X., Mai, K., Zhou, Q., 2016. The effect of dietary methionine on growth, antioxidant capacity, innate immune response and disease resistance of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). *Aquac. Nutr.* 22, 1163-1173. <https://doi.org/10.1111/anu.12363>
- Espe, M., Rathore, R. M., Du, Z.-Y., Liaset, B., El-Mowafi, A., 2010. Methionine limitation results in increased hepatic FAS activity, higher liver 18:1 to 18:0 fatty

- acid ratio and hepatic TAG accumulation in Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Amino Acids* 39, 449-460. <https://doi.org/10.1007/s00726-009-0461-2>
- Espe, M., Liaset, B., Hevrøy, E. M., El-Mowafi, A., 2011. DL-methionine enrichment in diets fed to Atlantic salmon increases apparent digestibility. *Aquac. Res.* 42, 1123-1130. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02700.x>
- Espe, M., Andersen, S. M., Holen, E., Rønnestad, I., Veiseth-Kent, E., Zerrahn, J.-E., Aksnes, A., 2014. Methionine deficiency does not increase polyamine turnover through depletion of hepatic S-adenosylmethionine in juvenile Atlantic salmon. *Br. J. Nutr.* 112, 1274-1285. <https://doi.org/10.1017/S0007114514002062>
- Espe, M., Veiseth-Kent, E., Zerrahn, J.-E., Rønnestad, I., Aksnes, A., 2016. Juvenile Atlantic salmon decrease white trunk muscle IGF-1 expression and reduce muscle and plasma free Sulphur amino acids when methionine availability is low while liver Sulphur metabolites mostly is unaffected by treatment. *Aquac. Nutr.* 22, 801-812. <https://doi.org/10.1111/anu.12294>
- Espe, M., Andersen, S. M., Veiseth-Kent, E., Rønnestad, I., Holen, E., Zerrahn, J. E., Aksnes, A., 2017. Choline supplementation increased total body lipid gain, while surplus methionine improved growth and amino acid retention in adult Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquac. Nutr.* 23, 1086-1094. <https://doi.org/10.1111/anu.12476>
- Fang, C. C., Feng, L., Jiang, W. D., Wu, P., Li, Y., Kuang, S. Y., Tang, L., Liu, X. A., Zhou, X. Q., 2020. Effects of dietary methionine on growth performance, muscle nutritive deposition, muscle fibre growth and type I collagen synthesis of on-growing grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Br. J. Nutr.* 126, 321-336. <https://doi.org/10.1017/s0007114520002998>
- Farias, C. V. T., Oshiro, A. M., Sousa, L. C., Almeida, V. N. S., Takahashi, L. S., 2021. Amylose and amylopectin levels affect the growth performance and metabolism in pacu *Piaractus mesopotamicus*. *Anim. Feed Sci. Technol.* 279, 115020, <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115020>
- Feng, H., Yi, K., Qian, X., Niu, X., Sun, Y., Ye, J., 2020. Growth and metabolic responses of juvenile grouper (*Epinephelus coioides*) to dietary methionine/cystine ratio at constant sulfur amino acid levels. *Aquaculture* 518, 734869. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734869>
- Folch, J., Less, M., Stanley, G. H., 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *J. Biol. Chem.* 226, 497-509. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)64849-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)64849-5)
- Frings, C. S., Fendly, T. W., Dunn, R. T., Quenn, C. A., 1972. Improved determination of total lipids by the sulpho-phospho-vanilin reaction. *Clin. Chem.* 18, 673-674.
- Fritz, I. B., McEwen, B., 1959. Effects of carnitine on fatty-acid oxidation by muscle.

Science 129, 334-335. <https://doi.org/10.1126/science.129.3345.334>.

- Gatlin, D. M., Barrows, F. T., Brown, P., Dabrowski, K., Gaylord, T. G., Hardy, R. W., Herman, E., Hu, G. S., Krogh, A., Nelson, R., Overturf, K., Rust, M., Sealey, W., Skonberg, D., Souza, E. J., Stone, D., Wilson, R., Wurtele, E., 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. *Aquac. Res.* 38, 551-579. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01704.x>
- Golterman, H. L., Clymo, R. S., Ohnstad, M. A. M., 1978. *Methods for physical and Chemical Analysis of Freshwaters*. London, England: Blackwell Science Publishers.
- Gómez-Requeni, P., Vareilles, M., Kousoulaki, K., Jordal, A. E. O., Conceição, L. E. C., Rønnestad, I., 2011. Whole body proteome response to a dietary lysine imbalance in zebrafish *Danio rerio*. *Comp. Biochem. Physiol.* 6D, 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.cbcd.2011.02.002>
- Harmon, K. J., Bolinger, M. T., Rodnick, K. J., 2011. Carbohydrate energy reserves and effects of food deprivation in male and female rainbow trout. *Comparative Comp. Biochem. Physiol., Part A Mol. Integr. Physiol.* 158, 423-431. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2010.11.017>
- Harpaz, S., 2005. L-carnitine and its attributed functions in fish culture and nutrition—a review. *Aquaculture* 249, 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.04.007>.
- Hasek, B. E., Boudreau, A., Shin, J., Feng, D., Hulver, M., Van, N. T., Laque, A., Stewart, L. K., Stone, K. P., Wanders, D., Ghosh, S., Pessin, J. E., Gettys, T. W., 2013. Remodeling the integration of lipid metabolism between liver and adipose tissue by dietary methionine restriction in rats. *Diabetes* 62, 3362-3372. <https://doi.org/10.2337/db13-0501>
- He, J. Y., Long, W. Q., Han, B., Tian, L. X., Yang, H. J., Zeng, S. L., Liu, Y. J., 2017. Effect of dietary L-methionine concentrations on growth performance, serum immune and antioxidative responses of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquac. Res.* 48, 665-674. <https://doi.org/10.1111/are.12913>
- He, Y., Chi, S., Tan, B., Dong, X., Yang, Q., Liu, H., Liu, D., 2019. DL-methionine supplementation in a low-fishmeal diet affects the TOR/S6K pathway by stimulating ASCT2 amino acid transporter and insulin-like growth factor-I in the dorsal muscle of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). *Brit. J. Nutr.* 122, 734-744. <https://doi.org/10.1017/S0007114519001648>
- Herzig, S., Hedrick, S., Morante, I., Koo, S.-H., Galimi, F., Montminy, M., 2003. CREB controls hepatic lipid metabolism through nuclear hormone receptor PPAR-γ. *Nature* 426, 190-193. <https://doi.org/10.1038/nature02110>
- Hilsdorf, A. W. S., Hallerman, E. M., Valladao, G. M., Zaminhan-Hassemer, M., Hashimoto, D. T., Dairiki, J. K., Takahashi, L. S., Albergaria, F. C., Gomes, M.

- E. S., Venturieri, R. L. L., Moreira, R. G., Cyrino, J. E. P., 2022. The farming and husbandry of *Colossoma macropomum*: From Amazonian waters to sustainable production. *Rev. Aquac.* 14, 993-1027. <https://doi.org/10.1111/raq.12638>
- Holz, M. K., Ballif, B. A., Gygi, S. P., Blenis, J., 2005. mTOR and S6K1 mediate assembly of the translation preinitiation complex through dynamic protein interchange and ordered phosphorylation events. *Cell* 123, 569-580. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2005.10.024>
- Houlihan, D. F., Carter, C. G., McCarthy, I. D., 1995. Protein synthesis in fish. *In* Hochachka, P. W., Mommsen, I.D. (Eds.), *Biochemistry and Molecular Biology in Fishes*. Elsevier Science: Amsterdam (The Netherlands), pp. 191-219.
- Jariyahatthakij, P., Chomtee, B., Poeikhampha, T., Loongyai, W., Bunchasak, C., 2018. Effects of adding methionine in low-protein diet and subsequently fed low-energy diet on productive performance, blood chemical profile, and lipid metabolism-related gene expression of broiler chickens. *Poult. Sci.* 97, 2021-2033. <https://doi.org/10.3382/ps/pey034>
- Jewell, J. L., Russell, R. C., Guan, K. L., 2013. Amino acid signalling upstream of mTOR. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 14, 133-139. <https://doi.org/10.1038/nrm3522>
- Ji, K., Liang, H. L., Ren, M. C., Ge, X. P., Pan, L. K., Yu, H., 2021. Nutrient metabolism in the liver and muscle of juvenile blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) in response to dietary methionine levels. *Sci. Rep.* 11, 23843. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03084-3>.
- Ji, K., Liang, H., Ge, X., Ren, M., Pan, L., Huang, D., 2022. Optimal methionine supplementation improved the growth hepatic protein synthesis and lipolysis of grass carp fry (*Ctenopharyngodon idella*). *Aquaculture* 554, 738125. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738125>
- Jiang, H., Bian, F., Zhou, H., Wang, X., Wang, K., Mai, K., He, G., 2017. Nutrient sensing and metabolic changes after methionine deprivation in primary muscle cells of turbot (*Scophthalmus maximus* L.). *J. Nutr. Biochem.* 50, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2017.08.015>
- Khan, M. A., Abidi, S. F., 2013. Dietary methionine requirement of Indian major carp fry, *Cirrhinus mrigala*, (Hamilton) based on growth, feed conversion and nitrogen retention efficiency. *Aquac. Res.* 44, 268-281. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.03030.x>
- Kikusato, M., Sudo, S., Toyomizu, M., 2015. Methionine deficiency leads to hepatic fat accretion via impairment of fatty acid import by carnitine palmitoyltransferase I. *Br. Poult. Sci.* 56, 225-231. <https://doi.org/10.1080/00071668.2014.996529>
- Koroleff, F., 1976. Determination of nutrientes. *In* Grasshoff, K. (Ed.). *Methods of seawater analysis*. pp. 117-181. Weinheim, Deutschland: Verlag Chemie.

- Lansard, M., Panserat, S., Plagnes-Juan, E., Seiliez, I., Skiba-Cassy, S., 2010. Integration of insulin and amino acid signals that regulate hepatic metabolism-related gene expression in rainbow trout: role of TOR. *Amino Acids* 39, 801-810. <https://doi.org/10.1007/s00726-010-0533-3>
- Laplanche, M., Sabatini, D., 2012. mTOR signaling in growth control and disease. *Cell* 149, 274-293. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2012.03.017>
- Latimer, M. N., Cleveland, B. M., Biga, P. R., 2018. Dietary methionine restriction: Effects on glucose tolerance, lipid content and micro-RNA composition in the muscle of rainbow trout. *Comp. Biochem. Physiol.*, 208C, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2017.10.012>
- Lee, S., Han, K. H., Nakamura, Y., Kawakami, S., Shimada, K. I., Hayakawa, T., 2013. Dietary L-cysteine improves the antioxidative potential and lipid metabolism in rats fed a normal diet. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 77, 1430-1434. <https://doi.org/10.1271/bbb.130083>.
- Li, P., Mai, K., Trushenski, J., Wu, G., 2009. New developments in fish amino acid nutrition: towards functional and environmentally oriented aquafeeds. *Amino acids* 37, 43-53. <https://doi.org/10.1007/s00726-008-0171-1>
- Li, J. M., Li, L. Y., Qin, X., Degrace, P., Demizieux, L., Limbu, S. M., Du, Z. Y., 2018. Inhibited carnitine synthesis causes systemic alteration of nutrient metabolism in zebrafish. *Front. Physiol.* 9, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00509>.
- Li, L. Y., Limbu, S. M., Ma, Q., Chen, L. Q., Zhang, M. L., Du, Z. Y., 2019. The metabolic regulation of dietary L-carnitine in aquaculture nutrition: present status and future research strategies. *Rev. Aquacult.* 11, 1228–1257. <https://doi.org/10.1111/raq.12289>
- Li, L.-Y., Lu, D.-L., Jiang, Z.-Y., Limbu, S. M., Qiao, F., Chen, L.-Q., Zhang, M.-L., Du, Z.-Y., 2020. Dietary L-carnitine improves glycogen and protein accumulation in Nile tilapia via increasing lipid-sourced energy supply: An isotope-based metabolic tracking. *Aquac. Rep.* 17, 100302. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100302>
- Li, J. M., Xu, W. X., Lai, W. C., Kong, A., Zhang, Z., Pang, Y. N., Wang, Z., Shentu, J., Wu, X., Mai, K., Ai, Q., 2021. Effect of dietary methionine on growth performance, lipid metabolism and antioxidant capacity of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fed with high lipid diets. *Aquaculture* 536, 736388. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736388>
- Liang, H. -L., Ren, M. -C., Habte-Tsion, H. -M., Mi, H. -F., Ge, X. -P., Xie, J., Xi, B -W., Zhou, Q. -L., Miao, L. -H., 2016. Dietary methionine requirement of pre-adult blunt snout bream, (*Megalobrama amblycephala* Yih, 1955). *J. Appl. Ichthyol.* 32, 1171-1178. <https://doi.org/10.1111/jai.13117>
- Liaset, B., Madsen, L., Qin, H., Criaes, G., Mellgren, G., Marschall, H. U., Hallenborg, P., Espe, M., Frøyland, L., Kristiansen, K., 2009. Fish protein

- hydrolysate elevates plasma bile acids and reduces visceral adipose tissue mass in rats. *Biochim. Biophys. Acta - Molecular and Cell Biology of Lipid* 1791, 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2009.01.016>
- Longo, N., Frigeni, M., Pasquali, M., 2016. Carnitine transport and fatty acid oxidation. *Biochim. Biophys. Acta* 1863, 2422–2435. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2016.01.023>
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., Randall, R. J., 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.* 193, 265-275. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)52451-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)52451-6)
- Luo, Z., Liu, Y., Mai, K., Tian, L., Yang, H., Tan, X., Liu, D., 2005a. Dietary L-methionine requirement of juvenile grouper *Epinephelus coioides* at a constant dietary cystine level. *Aquaculture* 249, 409-418. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.04.030>
- Macfarlane, D. P., Zou, X., Andrew, R., Morton, N. M., Livingstone, D. E. W., Aucott, R. L., Nyirenda, M. J., Iredale, J. P., Walker, B. R., 2011. Metabolic pathways promoting intrahepatic fatty acid accumulation in methionine and choline deficiency: implications for the pathogenesis of steato hepatitis. *AJP. Endocrinol. Metab.* 300, 402-409. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00331.2010>
- Mackereth, F. J. H., Heron, J., Talling, J. F., 1978. *Water Analysis: Some revised methods for limnologists* (Scientific Publication/ Freshwater Biological Association). London, England: Freshwater Biological Assn.
- Mambrini, M., Kaushik, S. J., 1994. Partial replacement of dietary protein nitrogen with dispensable amino acids in diets of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Comp. Biochem. Physiol. Part A: Physiology.* 109, 469-477. [https://doi.org/10.1016/03009629\(94\)90152-X](https://doi.org/10.1016/03009629(94)90152-X)
- Martinez, Y., Li, X., Liu, G., Bin, P., Yan, W., Mas, D., Valdivie, M., Hu, C.A., Ren, W., Yin, Y., 2017. The role of methionine on metabolism, oxidative stress, and diseases. *Amino Acids* 49, 2091-2098. <https://doi.org/10.1007/s00726-0172494-2>
- Michelato, M., Furuya, W. M., Graciano, T. S., Vítor, L., Vidal, O., Xavier, T. O., de Moura, L. B., Rossetto, V., Furuya, B., 2013. Digestible methionine + cystine requirement for Nile tilapia from 550 to 700 g. *Rev. Bras. Zootecn.* 42, 7-12. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982013000100002>
- Michelato, M., Furuya, W. M., Gatlin III, D. M., 2018. Metabolic responses of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* to methionine and taurine supplementation. *Aquaculture* 485, 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.11.003>
- Milligan, C. L., Girard, S. S., 1993. Lactate metabolism in rainbow trout. *J. Exp. Biol.* 180, 175-193. <https://doi.org/10.1242/jeb.180.1.175>
- Nascimento, T. M. T., 2015. Níveis de aminoácidos digestíveis para juvenis de

- tambaqui, *Colossoma macropomum* e turnover isotópico do carbono-13 e do nitrogênio-15 no tecido muscular. (2015). 90 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (UNESP) “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.
- Nascimento, T. M. T., Neira, L. M., Sandre, L. C. G., Buzollo, H., Abimorad, E. G., Carneiro, D. J., 2020. Apparent digestibility coefficients for amino acids of feed ingredients in tambaqui *Colossoma macropomum*. Rev. Bras. Zootecn. 49, 1-14. <https://doi.org/10.37496/rbz4920190032>
- Navarro, I., Gutierrez, J., 1995. Chapter 17 fasting and starvation. Biochem. Mol. Biol. of Fishes 4, 393-434. [https://doi.org/10.1016/S1873-0140\(06\)80020-2](https://doi.org/10.1016/S1873-0140(06)80020-2)
- Niu, J., Du, Q., Lin, H.-Z., Cheng, Y.-Q., Huang, Z., Wang, Y., Chen, Y.-F., 2013. Quantitative dietary methionine requirement of juvenile golden pompano *Trachinotus ovatus*, at a constant dietary cystine level. Aquac. Nutr. 19, 677-686. <https://doi.org/10.1111/anu.12015>
- NRC (Nutrient Requirements of Fish and Shrimp), 2011. Washington, DC: The National Academies Press.
- Ozório, R. O. A., Booms, G. H. R., Huisman, E. A., Verreth, J. A. J., 2002. Changes in amino acid composition in the tissues of African catfish (*Clarias gariepinus*) as a consequence of dietary L-carnitine supplements. J. Appl. Ichthyol. 18, 140-147. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0426.2002.00317.x>
- Ozório, R. O. A., Verreth, J. A. J., Aragão, C. R., Vermeulen, C. J., Schrama, J. W., Verstegen, M. W. A., Huisman, E. A., 2003. Dietary carnitine supplements increased lipid metabolism and decreased protein oxidation in African catfish (*Clarias gariepinus*) juveniles fed high fat levels. J. Aquacult. Trop. 18, 225-238. <https://doi.org/10.1017/S0007114509993035>
- Pacana, T., Cazanave, S., Verdianelli, A., Patel, V., Min, H.-K., Mirshahi, F., Quinlivan, E., Sanyal, A. J., 2015. Dysregulated hepatic methionine metabolism drives homocysteine elevation in diet-induced nonalcoholic fatty liver disease. PLoS One 10, e0136822. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136822>
- Pan, H., Li, L.Y., Li, J.M., Wang, W.L., Limbu, S.M., Degrace, P., Du, Z.Y., 2017. Inhibited fatty acid β -oxidation impairs stress resistance ability in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Fish Shellfish Immunol. 68, 500-508. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.07.058>
- Paulino, G. S. A., 2018. Exigência de energia digestível para o crescimento inicial do tambaqui (*Colossoma macropomum*). (201). 81 f. Dissertação (Mestrado em Aquicultura) – Centro de Aquicultura da UNESP (CAUNESP), Jaboticabal.
- PeixeBR (Anuário Peixe BR da piscicultura 2022), 2022. Associação Brasileira da Piscicultura (PeixeBR).
- Peng, J. L., Bai, S. P., Wang, J. P., Ding, X. M., Zeng, Q. F., Zhang, K. Y., 2018.

- Methionine deficiency decreases hepatic lipid exportation and induces liver lipid accumulation in broilers. *Poult. Sci.* 97, 4315-4323. <https://doi.org/10.3382/os/pey317>
- Peres, H., Freitas, J. M. A., Carvalho, P. L. P., Furuya, W. M., Satori, M. M. P., Oliva-Teles, A., Pezzato, L. E., Barros, M. M., 2022. Growth performance and metabolic responses of Nile tilapia fed diets with different protein to energy ratios. *Aquaculture* 547, 737493. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737493>
- Porter, C., Constantin-Teodosiu, D., Constantin, D., Leighton, B., Poucher, S. M., Greenhaff, P. L., 2017. Muscle carnitine availability plays a central role in regulating fuel metabolism in the rodent. *J. Physiol. (Paris)* 595, 5765-5780. <https://doi.org/10.1113/JP274415>.
- Rathore, R.M., Liaset, B., Hevrøy, E.M., El-Mowafi, A., Espe, M., 2010. Lysine limitation alters the storage pattern of protein, lipid and glycogen in on-growing Atlantic salmon. *Aquac. Res.* 41, 751-759. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02576.x>
- Rebouche, C. J., 1992. Carnitine function and requirements during the life cycle. *FASEB J.* 6, 3379-3386. <https://doi.org/10.1096/fasebj.6.15.1464372>
- Rinella, M. E., Elias, M. S., Smolak, R. R., Fu, T., Borensztajn, J., Green, R. M., 2008. Mechanisms of hepatic steatosis in mice fed a lipogenic methionine choline deficient diet. *The J. Lipid Res.* 49, 1068-1076. <https://doi.org/10.1194/jlr.m800042-jlr200>
- Rolland, M., Dalsgaard, J., Holm, J., Gómez-Requeni, P., Skov, P.V., 2015. Dietary methionine level affects growth performance and hepatic gene expression of GH-IGF system and protein turnover regulators in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed plant protein-based diets. *Comp. Biochem. Physiol. B: Biochem. Mol. Biol.* 181, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2014.11.009>
- Rolland, M., Skov, P. V., Larsen, B. K., Holma, J., Gómez-Requeni, P., Dalsgaard, J., 2016. Increasing levels of dietary crystalline methionine affect plasma methionine profiles, ammonia excretion, and the expression of genes related to the hepatic intermediary metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comp. Biochem. Physiol. B Biochem. Mol. Biol.* 198, p. 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2016.04.006>
- Rostagno, H. S., Albino, L. F. T., Hannas, M. I., Donzele, J. L., Sakomura, N. K., Perazzo, F. G., Brito, C. O., 2017. Tabelas brasileiras para aves e suínos (composição de alimentos e exigências nutricionais). (4th ed., 488 p.). Viçosa, Brasil: Departamento de Zootecnia, UFV.
- Ruchimat, T., Masumoto, T., Hosokawa, H., Shimeno, S., 1997. Quantitative methionine requirement of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*). *Aquaculture* 150, 113-122, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01465-2](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01465-2)

- Sandre, L. C. G., Buzollo, H., Nascimento, T. M. T., Neira, L. M., Jomori, R. K., Carneiro, D. J., 2017. Productive performance and digestibility in the initial growth phase of tambaqui (*Colossoma macropomum*) fed diets with different carbohydrate and lipid levels. *Aquac. Rep.* 6, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.02.003>
- Sharifzadeh, E., Yeganeh, S., Firouzbakhsh, F., Oraji, H., Sharifzadeh, E., Yeganeh, S., Oraji, H., 2017. Effects of L-carnitine and Vitamin C on the growth indices, body composition and serum biochemical parameters of Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) juveniles. *J. Vet. Res.* 72, 173-182. <https://doi.org/10.22059/JVR.2017.62630>
- Seilliez, I., Vélez, E. J., Lutfi, E., Dias, K., Plagnes-Juan, E., Marandel, L., Panserat, S., Geurden, I., Skiba-Cassy, S., 2017. Eating for two: consequences of parental methionine nutrition on offspring metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 471, 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.010>
- Selhub, J., Troen, A. M., 2016. Sulfur amino acids and atherosclerosis: a role for excess dietary methionine. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1363, 18-25. <https://doi.org/10.1111/nyas.12962>
- Sipaúba-Tavares, L. H., Santeiro, R. M., 2013. Fish farm and water quality management. *Acta sci., Biol. sci.* 35, 21-27. <https://doi.org/10.4025/actasciobiolsci.v35i1.10086>
- Skiba-Cassy, S. I., Geurden, S., Panserat, S., Seilliez, I., 2016. Dietary methionine imbalance alters the transcriptional regulation of genes involved in glucose, lipid and amino acid metabolism in the liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 454, 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.12.015>
- Slow, S., Garrow, T. A., 2006. Liver choline dehydrogenase and kidney betaine-homocysteine methyltransferase expression are not affected by methionine or choline intake in growing rats. *J. Nutr.* 136, 2279-2283. <https://doi.org/10.1093/jn/136.9.2279>
- Souza, F. O., Bomfim, M. A. D., Ribeiro, F. B., Lanna, E. A. T., De Sousa, T. J. R., Da Costa, D. C., 2019. Methionine plus cystine to lysine ratio in diets for tambaqui juveniles. *Rev. Caatinga* 32, 243-250, 2019. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n124rc>
- Souza-Bastos, L. R., Adalberto Luis Val, A. L., Wood, C. M., 2017. Are Amazonian fish more sensitive to ammonia? Toxicity of ammonia to eleven native species. *Hydrobiologia* 789, 143-155. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2623-4>
- Walton, M., Cowey, C., Adron, J., 1984. The effect of dietary lysine levels on growth and metabolism of rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Br. J. Nutr.* 52, 115-122. <https://doi.org/10.1079/BJN19840077>
- Wang, Y. Y., Che, J. F., Tang, B. B., Yu, S. L., Wang, Y. Y., Yang, Y. H., 2016a.

- Dietary methionine requirement of juvenile *Pseudobagrus ussuriensis*. *Aquac. Nutr.* 22, 1293-1300. <https://doi.org/10.1111/anu.12335>
- Wang, Z., Mai, K., Xu, W., Zhang, Y., Liu, Y., Ai, Q., 2016b. Dietary methionine level influences growth and lipid metabolism via GCN2 pathway in cobia (*Rachycentron canadum*). *Aquaculture* 454, 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.12.019>
- Wang, X., Xue, M., Figueiredo-Silva, C., Wang, J., Zheng, Y., Wu, X., Han, F., Mai, K., 2016c. Dietary methionine requirement of the pre-adult gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) at a constant dietary cystine level. *Aquacult. Nutr.* 22, 509-516. <https://doi.org/10.1111/anu.12271>
- Wang, W., Yang, P., He, C., Chi, S., Li, S., Mai, K., Song, F., 2021. Effects of dietary methionine on growth performance and metabolism through modulating nutrient-related pathways in largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Aquac. Rep.* 20, 100642. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100642>
- Wu, G., 2013. Functional amino acids in nutrition and health. *Amino Acids* 45, 407-411. <https://doi.org/10.1007/s00726-013-1500-6>
- Wu, P., Tang, L., Jiang, W. D., Hu, K., Liu, Y., Jiang, J., Kuang, S., Tang, L., Tang, W., Zhang, Y., Zhou, X., Feng, L., 2017. The relationship between dietary methionine and growth, digestion, absorption, and antioxidant status in intestinal and hepatopancreatic tissues of sub-adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *J. Anim. Sci. Biotechn.* 8, 63. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0194-0>
- Wu, L., Zhang, H., Na, L., Zhou, X., Li, X., Zhao, Y., Wen, Z., He, Q., 2019. Methionine restriction at the post-weanling period promotes muscle fiber transition in piglets and improves intramuscular fat content in growing-finishing pigs. *Amino Acids* 51, 1657-1666. <https://doi.org/10.1007/s00726-019-02802-6>
- Xiao, H., Zha, C., Shao, F., Wang, L., Tan, B., 2020. Amino acids regulate energy utilization through mammalian target of rapamycin complex 1 and adenosine monophosphate activated protein kinase pathway in porcine enterocytes. *Anim Nutr.* 6, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2019.12.001>
- Xie, D.Z., Chen, C.Y., Dong, Y.W., You, C.H., Wang, S.Q., Monroig, O., Tocher, D. R., Li, Y., 2021. Regulation of long-chain polyunsaturated fatty acid biosynthesis in teleost fish. *Prog. Lipid Res.* 82, 101095. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2021.101095>
- Xu, H., Zhang, Q., Wei, Y., Liao, Z., Liang, M., 2019. Dietary methionine increased the lipid accumulation in juvenile tiger puffer *Takifugu rubripes*. *Comp. Biochem. Physiol. Part B* 230, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2019.01.005>
- Xu, H., Ren, M., Liang, H., Ge, X., Ji, K., Huang, D., Yu, H., Wu, L., 2022. Interactive effects of water salinity and dietary methionine levels on growth performance,

- whole-body composition, plasma parameters, and expression of major nutrient metabolism genes in juvenile genetically improved farmed Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 546, 737381. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737381>
- Yang, A.-N., Zhang, H.-P., Sun, Y., Yang, X.-L., Wang, N., Zhu, G., Zhang, H., Xu, H., Ma, S.-C., Zhang, Y., Li, G.-Z., Jia, Y.-X., Cao, J., Jiang, Y.-D., 2015. High-methionine diets accelerate atherosclerosis by HHcy-mediated FABP4 gene demethylation pathway via DNMT1 in ApoE^{-/-} mice. *FEBS Lett.* 589, 3998-4009. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2015.11.010>
- Yokogoshi, H., Oda, H., 2002. Dietary taurine enhances cholesterol degradation and reduces serum and liver cholesterol concentrations in rats fed a high-cholesterol diet. *Amino Acids* 23, 433-439. <https://doi.org/10.1007/s00726-002-0211-1>
- Zhang, S. Y., Wang, J. L., Yu, L., Zhang, J., Quan, L. P., Xu, J. C., Jiang, D. X., 2009. Effects of L-carnitine on growth performance and muscle quality in Allogynogenetic crucian carp. *Hubei Agric. Sci.* 3, 33-36. <https://doi.org/10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.2009.03.010>
- Zhou, Q. C., Wu, Z. H., Tan, B. P., Chi, S. Y., Yang, Q. H., 2006. Optimal dietary methionine requirement for juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). *Aquaculture* 258, 551-557. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.035>
- Zhou, F., Xiao, J. X., Hua, Y., Ngandzali, B. O., Shao, Q. J., 2011. Dietary L-methionine requirement of juvenile black sea bream (*Sparus macrocephalus*) at a constant dietary cystine level. *Aquac. Nutr.* 17, 469-481. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00823.x>
- Zhou, X., He, L., Wan, D., Yang, H., Yao, K., Wu, G., Wu, X., Yin, Y., 2016. Methionine restriction on lipid metabolism and its possible mechanisms. *Amino Acids* 48, 1533-1540. <https://doi.org/10.1007/s00726-016-2247-7>
- Zubiete-Franco, I., García-Rodríguez, J. L., Martínez-Uña, M., Martínez-Lopez, N., Woodhoo, A., Juan, V. G., Beraza, N., Lage-Medina, S., Andrade, F., Fernandez, M. L., Aldámiz-Echevarría, L., Fernández-Ramos, D., Falcon-Perez, J.M., Lopitz-Otsoa, F., Fernandez-Tussy, P., Barbier-Torres, L., Luka, Z., Wagner, C., García-Monzón, C., Lu, S. C., Aspichueta, P., Mato, J. M., Martínez-Chantar, M. L., Varela-Rey, M., 2016. Methionine and S-Adenosylmethionine levels are critical regulators of PP2A activity modulating lipophagy during steatosis. *J. Hepatol.* 64, 409-418. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2015.08.037>