DOI: 10.1590/1809-6891v27e-83587P

e-ISSN 1809-6891

Zootecnia | Artigo científico

Exigência de proteína digestível de alevinos de tilápia-do-Nilo alimentados com dietas *fishmeal-free* à base de farelo de soja e milho: Desempenho zootécnico, histologia hepática e características de carcaça

[Digestible protein requirement of Nile tilapia fingerlings fed fishmeal-free diets based on soybean meal and corn: growth performance, liver histology, and carcass characteristics]

Gilson Bueno Junior*[1], Rafael Ernesto Balen[2], Jailson Novodworski[2], Lilian Carolina Rosa da Silva[1], Fabio Meurer[1,2]

1 Universidade Federal do Paraná (UFPR), Palotina, Paraná, Brasil

2 Universidade Federal do Paraná (UFPR), Jandaia do Sul, Paraná, Brasil

*autor correspondente: jilsonbweno@gmail.com

Recebido: 06 de agosto de 2025. Aceito: 11 de junho de 2026. Publicado: 08 de julho de 2026.
Editor: Rondineli P. Barbero

Resumo: O experimento teve como objetivo determinar a exigência de proteína digestível de alevinos de tilápia-do-Nilo alimentados com dietas isentas de farinha de peixe à base de farelo de soja e milho, avaliando o desempenho de crescimento e as características de carcaça. Alevinos de tilápia-do-Nilo (0,84 ± 0,11 g; n = 450) foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado com seis tratamentos (dietas isocalóricas à base de farelo de soja e milho contendo níveis crescentes de proteína digestível (PD): 200, 240, 270, 320, 360 e 390 g kg-1; 3.000 kcal kg-1 de energia digestível) e cinco repetições. Os tratamentos tiveram efeito quadrático ($p < 0,05$) sobre o peso final médio, ganho de peso, conversão alimentar, taxa de crescimento específico, comprimento padrão e teores de proteína, umidade e cinzas de corpo inteiro. Não foi observado efeito significativo ($p > 0,05$) sobre o índice hepatossomático, o diâmetro dos hepatócitos e outros atributos de carcaça avaliados (rendimento de carcaça, rendimento de carcaça sem cabeça, rendimento de tronco limpo, rendimento de filé e teor de extrato etéreo de corpo inteiro). Este estudo demonstrou que dietas sem farinha de peixe à base de farelo de soja e milho podem ser usadas para alevinos de tilápia-do-Nilo e um nível de 320,24 g kg-1 de PD é recomendado para melhorar o peso final, ganho de peso, conversão alimentar e teor de proteína de corpo inteiro.

Palavras-chave: características de carcaça; desempenho zootécnico; *Oreochromis niloticus*; proteína digestível.

Abstract: This experiment aimed to determine the digestible protein (DP) requirement of Nile tilapia fingerlings fed fishmeal-free diets based on soybean meal and corn by evaluating growth performance and carcass characteristics. Nile tilapia fingerlings (0.84 ± 0.11 g; n = 450) were distributed in a completely randomized design with six treatments consisting of isocaloric diets based on soybean meal and corn containing increasing levels of DP (200, 240, 270, 320, 360, and 390 g kg-1) and 3,000 kcal kg-1 digestible energy, with five replicates per treatment. Dietary DP levels had a quadratic effect ($p < 0.05$) on final weight, weight gain, feed conversion ratio, specific growth rate, standard length, and whole-body protein, moisture, and ash contents. No significant effects ($p > 0.05$) were observed on hepatosomatic index, hepatocyte diameter, or the other carcass traits evaluated (carcass yield, headless carcass yield, clean trunk yield, fillet yield, and whole-body ether extract content). This study

Copyright ©. Este é um artigo em acesso aberto distribuído nos termos da Creative Commons Attribution License que permite o uso irrestrito, a distribuição e reprodução em qualquer meio desde que o artigo original seja devidamente citado.

demonstrated that fishmeal-free diets based on soybean meal and corn can be used for Nile tilapia fingerlings, and a dietary level of 320.24 g kg-1 DP is recommended to optimize final weight, weight gain, feed conversion ratio, and whole-body protein content.

Keywords: *Oreochromis niloticus*; carcass characteristics; digestible protein; zootechnical performance.

1. Introdução

A aquicultura assumiu um papel estratégico na produção de alimentos de origem animal, especialmente diante do aumento da demanda global por proteína e da necessidade de sistemas de produção mais sustentáveis. Nesse contexto, a tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) se destaca como uma das principais espécies de aquicultura cultivadas mundialmente [1]. O Brasil está entre os principais produtores mundiais de tilápia, com produção nacional atingindo 707.495 toneladas em 2025. O Paraná permaneceu como principal estado produtor, respondendo por aproximadamente 38 % da produção brasileira da espécie [2].

A intensificação da produção aquícola aumentou a necessidade de estratégias nutricionais capazes de conciliar desempenho zootécnico, redução de custos e menor impacto ambiental. Nesse cenário, a proteína ocupa uma posição central porque é o principal nutriente relacionado ao crescimento dos peixes e um dos componentes mais caros na formulação de rações [3–5]. Quando fornecida abaixo do necessário, a proteína pode limitar o crescimento, a deposição de proteína corporal e a eficiência da alimentação; por outro lado, quando fornecidos em excesso, os aminoácidos excedentes podem ser catabolizados, aumentando as perdas de nitrogênio no ambiente aquático [6, 7].

A determinação da exigência de proteína deve ser compreendida dentro de uma abordagem contemporânea de nutrição de precisão e sustentabilidade das rações para aquicultura, na qual o objetivo não é apenas aumentar o teor de proteína da dieta, mas ajustar o fornecimento da proteína digestível (PD), aminoácidos, e energia de acordo com o estágio de desenvolvimento, sistema de cultivo, composição dos ingredientes e capacidade fisiológica do peixe para utilizar nutrientes [4, 6, 8, 9]. Essa perspectiva está alinhada com o conceito de *Aquafeed* 3.0, baseado na formulação de dietas mais resilientes e eficientes integradas à bioeconomia circular, com maior eficiência na utilização dos recursos, menor dependência de ingredientes marinhos, minimização de resíduos nutricionais e menor impacto ambiental da produção aquicola [10–13]. Nas dietas da tilápia-do-Nilo, esse foco é particularmente relevante porque o equilíbrio adequado entre proteína, energia e aminoácidos contribui para maior eficiência de utilização de nutrientes e menor potencial de impacto ambiental [6, 7, 14].

A formulação de dietas baseadas em nutrientes digestíveis é particularmente relevante para espécies como a tilápia-do-Nilo, pois a necessidade nutricional não está relacionada à proteína bruta (PB) em si, mas sim à fração de aminoácidos efetivamente disponíveis para absorção, metabolismo e deposição tecidual. A digestibilidade dos ingredientes, a proporção de proteínas e o equilíbrio entre aminoácidos essenciais e não essenciais são fatores determinantes para a eficiência da utilização de proteínas dietéticas [4, 8, 15].

Outro aspecto importante da aquicultura moderna é a redução da dependência de ingredientes de origem animal, especialmente a farinha de peixe, devido à sua disponibilidade limitada, alto custo, competição com outros setores produtivos e pressão sobre os recursos pesqueiros marinhos [11, 17]. Embora esse ingrediente tenha alto valor nutricional, alta digestibilidade, boa palatabilidade e um perfil de aminoácidos favorável, essas limitações estimularam o desenvolvimento de dietas sem farinha de peixe, baseadas em ingredientes vegetais e outros ingredientes alternativos [16–19].

Estudos recentes mostram que a exigência proteica da tilápia-do-Nilo pode variar de acordo com o peso corporal, estágio de desenvolvimento, linhagem, sistema de cultivo, qualidade dos ingredientes, perfil de aminoácidos e a proporção de proteínas da dieta [4]. A fase de alevinagem, por sua vez, constitui uma etapa fundamental na cadeia de produção porque influencia diretamente a uniformidade dos lotes, o desempenho nas fases subsequentes e a eficiência dos sistemas de produção [20]. Durante essa fase, a alta taxa de crescimento e a intensa deposição de tecidos tornam necessário fornecer níveis adequados de proteína para alcançar desempenho e produtividade ideais.

Assim, o objetivo deste estudo foi determinar a necessidade de PD dos alevinos de tilápia-do-Nilo alimentados com dietas isentas de farinha de peixe, baseadas em farelo de soja e milho, por meio da avaliação do desempenho zootécnico e das características da carcaça.

2. Material e métodos

Este estudo com animais seguiu os Princípios Éticos da Experimentação Animal adotados pela Faculdade Brasileira de Experimentação Animal (COBEA) e foi aprovado pelo Comitê de Ética do Uso de Animais (CEUA) da Universidade Federal do Paraná (Protocolo nº E11/2010 – CEUA/Palotina-UFPR).

O experimento foi conduzido durante 30 dias. Foram utilizados 450 alevinos de tilápia-do-Nilo (*O. niloticus*), linhagem GIFT, sexualmente revertidos (0,84 ± 0,11 g; 3,73 ± 0,17 cm). Os peixes foram distribuídos em um delineamento inteiramente casualisado com seis tratamentos com cinco repetições. Cada unidade experimental consistia em uma caixa plástica (60 L) contendo 15 alevinos (66 peixes m^{-2} e 55 g m^{-2}), com o fluxo individual ajustado diariamente (5 L min^{-1}). A saída de água era direcionada para tanques de biofiltração (dois tanques de 500 L em série). Um terceiro tanque de 500 L recebia a água filtrada, que era aquecida por um aquecedor de resistência elétrica (3000 W) controlado por um termostato e bombeada de volta para as unidades experimentais por meio de duas bombas (0,5 HP cada).

A aeração foi feita usando um aerador elétrico BOYU (modelo ACQ-009; 105 W e 160 L min^{-1}), com oxigênio distribuído para todas as unidades experimentais por meio de mangueiras de silicone e pedras porosas. O manejo diário consistiu em três alimentações *ad libitum* (07:00, 13:00 e 18:00) e duas sifonagens (10:00 e 18:30) correspondendo a 10 % do volume de água, para remover possíveis resíduos do fundo das caixas experimentais. Para manter a dureza e alcalinidade, foram adicionados 2 g de CaCO3 e 12 g de NaHCO3 para cada 100 L de água reabastecida, quando necessário. Oxigênio e temperatura eram medidos duas vezes ao dia (09:30 e 17:30), antes de serem sifonados, usando um medidor LT LUTRON (modelo DO 5519).

Uma vez por semana, uma amostra de água (500 mL) foi coletada de cada unidade experimental, antes de alimentar e sifonar, para medir variáveis de qualidade da água, incluindo concentração de amônia [21], por meio de espectrofotometria fotônica UV-VIS BEL (modelo SP 2000 UV), nitrito [22] e alcalinidade e dureza [23]. O pH foi medido usando um medidor MS TECNOPON (modelo mPA210).

Os valores médios de temperatura foram 26,9°C ± 0,4°C pela manhã e 28,1°C ± 0,3°C à tarde, enquanto a concentração de oxigênio dissolvido foi de 6,46 ± 0,05 mg L^{-1}. O pH foi de 8,1 ± 0,01, a dureza foi de 50,1 ± 0,5 mg L^{-1} como CaCO3, a alcalinidade de 100,7 ± 0,5 mg de L^{-1}, o nitrito de 0,0018 ± 0,0 mg e a amônia foi de 0.21 ± 0.0 mg L^{-1}. Todos esses valores estavam dentro dos intervalos aceitáveis para o cultivo de tilápia-do-Nilo e foram consistentes com os relatados para sistemas de recirculação [24, 25].

Seis dietas isocalóricas com níveis crescentes de PD (200, 240, 270, 320, 360 e 390 g kg^{-1} ração) foram formuladas usando farelo de soja e milho como ingredientes principais (Tabela 1). Para a fabricação de rações, o milho e a farinha de soja eram moídos e peneirados (0.5 mm). Os ingredientes foram pesados de acordo com cada formulação, misturados até ficarem homogêneos e umedecidos com água a 75°C até formar uma massa. A massa foi processada em um moinho experimental de pellets, e os pellets secaram em uma estufa de ventilação forçada por 18 horas a temperatura de 40°C. As dietas foram produzidas em forma de pellets, com diâmetros de 1 mm durante a primeira e segunda semanas e 2 mm na terceira e quinta semana, para melhor acomodar o tamanho da boca dos alevinos. Uma amostra de cada dieta foi coletada e enviada à Evonik Degussa Brasil Ltda. para quantificação de aminoácidos. As dietas foram armazenadas em sacos plásticos e mantidas refrigeradas até o uso.

Tabela 1. Dietas experimentais *Fishmeal-free* com níveis crescentes de proteína digestível para alevinos de tilápia-do-Nilo.

Ingredientes	Nível de proteína digestível na dieta (g kg^{-1})*					
	200	**240**	**270**	**320**	**360**	**390**
Farelo de soja	350,96	470,00	585,30	699,42	815,14	930,72
Farelo de milho	554,94	453,76	344,47	235,51	123,85	14,24
Óleo de soja	32,99	32,48	28,45	24,36	23,35	19,33
Fosfato de bicálcico	35,99	33,49	31,50	29,43	25,38	25,43
Suplem.Vit. e min.[1]	5,08	5,07	5,08	5,07	5,08	5,09
Sal	5,05	5,07	5,08	5,07	5,08	5,09
BHT	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Calcário calcítico	0,00	0,00	1,01	1,01	2,03	2,03
Nutrientes (g kg^{-1})						
Ácido linoleico	31	28	26	22	19	17
Amido	393	341	289	237	185	132
Cálcio	10	10	10	10	10	10
Cinzas	68	70	72	74	76	78
ED (kcal kg^{-1})*	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
EB (kcal kg^{-1})	3.963	4.001	4.039	4.077	4.114	4.152
Fibra bruta	36	33	30	27	24	21
Fósforo	10	10	10	10	10	10
Gordura	53	48	44	40	36	32
Matéria seca	897	899	899	900	901	902
Proteína bruta	217	261	305	349	393	437
Aminoácidos (g kg^{-1})						
Arginina	14,4	17,9	21,3	24,8	28,2	31,7
Cisteína	3,5	4,1	4,7	5,2	5,8	6,4
Fenilalanina	11	13,2	15,4	17,7	19,9	22,2
Histidina	5,8	6,9	8,0	9,2	10,3	11,4
Isoleucina	9,3	11,4	13,5	15,6	17,7	19,8
Leucina	19	21,8	24,6	27,5	30,3	33,1
Lisina	11,3	14,2	17,1	20,1	23,0	25,9
Met + Cis	7,0	7,9	9,0	10,1	11,2	12,3
Metionina	3,2	3,7	4,2	4,7	5,2	5,7
Treonina	8,3	9,9	11,7	13,4	15,1	16,8
Triptofano	2,5	3,1	3,8	4,4	5,1	5,7
Valina	10,2	12,2	14,3	16,4	18,4	20,5

[1]Suplemento vitamínico e mineral por kg de dieta: ácido pantotênico (4,000 mg), biotina (40 mg), cobre (2,000 mg), ferro (12,500 mg), Iodo (200 mg), manganês (7,500 mg), niacina (5,000 mg), selênio (70 mg); vitamina A (1,000,000 IU), vitamina B1 (1,900 mg), vitamina B12 (3,500 mg), vitamina B2 (2,000 mg), vitamina B6 (2,400 mg), vitamina C (50,000 mg), vitamina D3 (500,000 IU), vitamina E (20,000 IU), vitamina K3 (500 mg), zinco (25,000 mg).BHT,butil-hidroxitolueno; ED, Energia digestível; EB, Energia bruta; Met + Cis, metionina + cistina.*Valor calculado usando o coeficiente de digeribilidade determinado por Boscolo et al. (26).

Ao final do período experimental, todos os alevinos foram anestesiados com uma solução de óleo de cravo a 50 mg L^{-1} [27], pesados e medidos quanto ao comprimento total e padrão. Subsequentemente, ganho de peso (GP), conversão alimentar aparente (CAA), taxa de crescimento específica (TCE) e taxa de eficiência proteica (TEP) foram calculados da seguinte forma:

GP = Peso final (g) − Peso inicial (g)

CAA = ração consumida (g, peso seco) / GP (g)

TCE = [(ln Peso final − ln Peso inicial) / dias] × 100

TEP = GP (g) / Ingestão de proteína (g)

Além disso, três alevinos de cada unidade experimental foram selecionados aleatoriamente para avaliação do rendimento corporal (pesos de peixes eviscerados, peixes eviscerados sem cabeça, troncos sem pele e filés). Os fígados desses peixes foram retirados e pesados em uma balança semi-analítica (0,001 g) para calcular o índice hepatosomático. As amostras de fígado foram então fixadas em uma solução de formol a 10 % por 8 horas e armazenadas em etanol de 70 % para avaliação histológica subsequente. Rendimento de carcaça (RC), rendimento de carcaça sem cabeça (RCSC), rendimento de tronco limpo (RTL), rendimento de filé (RF) e índice hepatosomático (IHS) foram determinados da seguinte forma:

RC = (Peso da carcaça eviscerada, g / Peso corporal, g) × 100

RCSC = (Peso da carcaça eviscerada sem cabeça, g / Peso corporal, g) × 100

RTL = (Peso do tronco sem pele nem nadadeiras, g / Peso corporal, g) × 100

RF = (Peso do filé sem pele, g / Peso corporal, g) × 100

IHS = (Peso do fígado, g / Peso corporal, g) × 100

As amostras de fígado passaram por desidratação progressiva em soluções alcoólicas (80 %, 90 % e 100 %), clareamento em xilol e incorporação em parafina. A microtomia foi então realizada usando uma lâmina descartável em um microtomo automático (modelo LEICA RM-2155), produzindo cortes histológicos de 5 µm que foram corados com hematoxilina e eosina. A documentação fotográfica foi realizada usando um microscópio óptico Zeiss Primo Star com objetiva de 40× e um sistema de imagem computadorizado (Image Pro Plus, version 5.2; Media Cybernetics).

Os peixes inteiros restantes foram colocadas em sacos plásticos para processamento e análise subsequente de proteína bruta corporal, gordura, matéria seca e cinzas. O teor de umidade foi determinado pelo método direto, no qual peixes de cada tratamento foram moídos, o material homogeneizado e amostras colocadas em um forno a 105°C por 24 horas. O teor de cinzas foi determinado incinerando as amostras em um forno de abafamento a 600°C por 4 horas. A fração de nitrogênio de cada amostra foi determinada por digestão de ácido sulfúrico seguida de destilação de amônia em um aparelho Kjeldahl, com quantificação por titulação em solução de ácido clorídrico. O extrato etéreo foi determinado por extração de éter por 16 horas. Todos os procedimentos bromatológicos foram realizados de acordo com métodos AOAC [28].

Os dados zootécnicos e bromatológicos obtidos foram submetidos a análise de variância (ANOVA). Antes da ANOVA, as suposições de normalidade residual e homogeneidade das variâncias eram avaliadas usando os testes de Shapiro–Wilk e Bartlett, respectivamente. Quando foram detectadas diferenças significativas ($p < 0,05$), as médias foram comparadas usando o teste de Tukey. Além disso, como os níveis de PD representavam um fator quantitativo, foi realizada uma análise de regressão quadrática para estimar a exigência de PD. Análises estatísticas foram realizadas usando RStudio [29], com o pacote ExpDes [30] para hipóteses e testes post hoc, e os pacotes dplyr [31], ggplot2 [32] e minpack.lm [33] para análise de regressão não linear, nos quais os pontos máximos ou mínimos da equação quadrática foram usados para definir a exigência de PD.

3. Resultados

Os valores médios das variáveis de desempenho de crescimento de alevinos de tilápia-do-Nilo alimentados com dietas sem farinha de peixe e níveis crescentes de PD são apresentados na Tabela 2. Os níveis de PD afetaram significativamente todas as variáveis avaliadas ($p < 0,05$).

Tabela 2. Desempenho de crescimento de alevinos de tilápia-do-Nilo alimentados com dietas *fishmeal-free* contendo níveis crescentes de proteína digestível.

Variáveis	Nível de proteína digestível na dieta (g kg^{-1})						
	200	240	270	320	360	390	*p*-value
PF (g)	5,09 ± 0,54^{a}	7,64 ± 0,62^{b}	7,97 ± 1,28^{b}	8,16 ± 0,38^{b}	7,41 ± 0,52^{b}	7,32 ± 1,61^{b}	3,66 × 10^{-4}
GP (g)	4,15 ± 0,52^{a}	6,72 ± 0,62^{b}	7,06 ± 1,29^{b}	7,21 ± 0,39^{b}	6,23 ± 0,53^{b}	6,38 ± 1,59^{b}	3,54 × 10^{-4}
CAA	2,47 ± 0,27^{a}	1,25 ± 0,11^{b}	1,50 ± 0,2^{b}	1,45 ± 0,2^{b}	1,71 ± 0,6^{b}	1,53 ± 0,3^{b}	8,20 × 10^{-4}
TCE (% dia^{-1})	5,63 ± 0,31^{a}	6,99 ± 0,30^{b}	7,13 ± 0,51^{b}	7,18 ± 0,18^{b}	6,81 ± 0,27^{b}	6,78 ± 0,64^{b}	2,7 × 10^{-5}
TEP	1,82 ± 0,13^{bc}	3,07 ± 0,33^{a}	2,21 ± 0,33^{b}	1,97 ± 0,28^{bc}	1,6 ± 0,45^{bc}	1,49 ± 0,39^{c}	1,2 × 10^{-5}
CT (cm)	6,6 ± 0,17^{a}	7,66 ± 0,23^{ab}	7,51 ± 0,27^{ab}	7,68 ± 0,05^{a}	7,51 ± 0,31b	7,35 ± 0,42^{b}	7,37 × 10^{-7}
CP (cm)	5,30 ± 0,13^{c}	6,20 ± 0,25^{ab}	6,21 ± 0,24^{ab}	6,33 ± 0,011^{a}	6,21 ± 0,26^{ab}	6,02 ± 0,24^{b}	0,001

Os dados são expressos como média ± desvio padrão. Valores na mesma linha com diferentes sobrescritos são significativamente diferentes ($p < 0,05$). PF, Peso final (y = -0,000231x² + 0,1441x - 14,154; R² = 0,84). GP, ganho de peso (y = -0,000231x² + 0,1439x - 15,067; R² = 0,84).CAA, Conversão de alimentar aparente (y= 0,000072x² - 0,0452x + 8,388; R² = 0,58). TCE, Taxa de crescimento específico (y = -0,000118x² + 0,0739x - 4,229; R² = 0,85). TEP, Taxa de eficiência proteica, (y = -0.0046x + 3.398; R²=0.34). CT, Comprimento total (y = −0,000081x² + 0,0507x – 0,143; R² = 0,81).CP, Comprimento padrão (y = −0,000077x² + 0,0488x − 1,262; R² = 0,91).

O peso final médio foi maior em alevinos alimentados com dietas contendo 320 g kg^{-1} PD, seguido por aqueles alimentados com dietas com 270 e 240 g kg^{-1} PD. O menor peso médio final foi observado em peixes alimentados com a dieta contendo 200 g kg^{-1} PD. Foi observado um efeito quadrático (y = −0,000231x² + 0,1441x − 14,154; R² = 0,84), com o peso final máximo ocorrendo em 311,7 g kg^{-1} PD (339,95 g kg^{-1} PB) na dieta (Figura 1).

A média do GP também foi afetada quadraticamente pela PD na dieta (y = −0,000231x² + 0,1439x − 15,067; R² = 0,84), com o ponto máximo ocorrendo em 311,7 g kg^{-1} PP (339,94 g kg^{-1} PB) na dieta. A CAA mostrou uma resposta quadrática à concentração de PD na dieta (y = 0,000072x² − 0,0452x + 8,388; R² = 0,58), com o menor valor estimado em 313,05 g kg^{-1} PD (341,41 g kg^{-1} PB) na dieta.

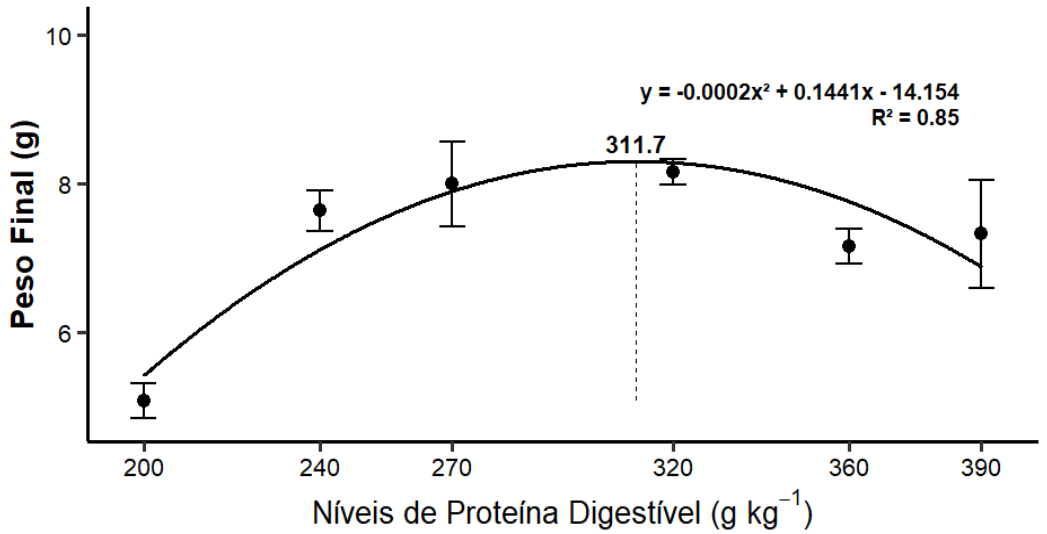

Figura 1. Respostas quadráticas observadas para o peso final médio dos alevinos de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) alimentados com dietas *fishmeal-free* contendo níveis crescentes de proteína digestível.

O TCE foi influenciado quadráticamente pelo nível de PD na dieta (y = −0,000118x² + 0,0739x − 4,229; R² = 0,85), com o ponto máximo ocorrendo em 313,10 g kg^{-1} PB (340,65 g kg^{-1} PB). A maior TEP foi observado em peixes alimentados com dieta contendo 240 g kg-^{1} PD, seguido por aqueles alimentados com dietas com 270, 320 e 200 g kg^{-1} PD, enquanto dietas alimentadas com peixes com 360 e 390 g kg^{-1} PD apresentaram os menores valores.

Os níveis de PD influenciaram significativamente (p < 0,05) o comprimento total dos alevinos de tilápia-do-Nilo, com os maiores comprimentos observados peixes alimentados com dietas contendo 240 a 390 g kg^{-1} PD e o menor valor observado em peixes alimentados com dieta contendo 200 g kg^{-1} PD. Para o comprimento padrão, o valor mais alto foi encontrado em peixes alimentados com dieta contendo 320 g kg^{-1} PD, seguidos por aqueles alimentados com dietas com 240, 270 e 360 g kg^{-1} PD, que não diferiam entre si. O segundo maior valor foi observado em peixes alimentados com dieta contendo 390 g kg^{-1} PD, enquanto o menor valor foi registrado em peixes alimentados com dieta contendo 200 g kg^{-1} PD. Além disso, foi observada uma resposta quadrática (y = −0,000077x² + 0,0488x − 1,262; R² = 0,91) para essa variável, com o ponto máximo ocorrendo em 314,6 g kg^{-1} DP (343,17 g kg^{-1} CP) na dieta.

A Tabela 3 apresenta o rendimento corporal e os dados histológicos de alevinos de tilápia do Nilo alimentados com dietas sem farinha de peixe contendo níveis crescentes de PD. Não houve influência (p > 0,05) dos tratamentos em nenhuma das variáveis avaliadas.

Tabela 3. Desempenho corporal e histologia hepática de alevinos de tilápia-do-Nilo alimentados com dietas *fishmeal-free* contendo níveis crescentes de proteína digestível

Variável	Nível de proteína digestível na dieta (g kg^{-1})						
	200	240	270	320	360	390	*p*-value
RC (%)	83,88 ± 2,49	83,65 ± 1,31	85,02 ± 1,42	84,17 ± 0,89	84,00 ± 1,11	79,92 ± 9,45	0,958
RCSC (%)	55,65 ± 3,12	55,10 ± 1,46	57,37 ± 1,10	58,62 ± 4,44	56,32 ± 2,18	54,01 ± 13,70	0,886
RTL (%)	45,15 ± 2,64	44,13 ± 2,10	46,25 ± 1,18	45,85 ± 0,66	46,04 ± 1,69	46,51 ± 1,00	0,279
RF (%)	23,00 ± 2,55	22,83 ± 1,38	24,69 ± 2,31	24,60 ± 1,91	24,37 ± 1,66	21,66 ± 5,95	0,544
IHS (%)	1,04 ± 0,34	1,45 ± 0,19	1,13 ± 0,23	0,93 ± 0,21	1,11 ± 0,15	1,35 ± 0,30	0,552
HD (µm)	170,41 ± 25,28	173,08 ± 2,76	171,10 ± 4,01	163,30 ± 14,42	171,60 ± 1,54	181,78 ± 4,24	0,788

Os dados são expressos como média ± desvio padrão. RC, Rendimento de carcaça; RCSC, Rendimento de carcaça sem cabeça; RTL, Rendimento de tronco limpo; RF, Rendimento do filé; IHS, Índice hepatosomático; DH, Diâmetro do hepatócito (µm).

A Tabela 4 apresenta a composição química corporal dos alevinos de tilápia-do-Nilo alimentados com dietas *fishmeal-free* contendo níveis crescentes de PD. O conteúdo de PB corporal do peixe inteiro (Figura 2) foi influenciado quadráticamente (y = −0,0002x² + 0,1243x − 5,027; R² = 0,84), com o valor máximo estimado em 320,24 g kg^{-1} PD (348,80 g kg^{-1} CP) na dieta. Em contraste, o extrato de etéreo corporal do peixe inteiro não foi influenciado pelos tratamentos (p > 0,05).

Tabela 4. Composição química do corpo inteiro dos alevinos de tilápia-do-Nilo alimentados com dietas *fishmeal-free* contendo níveis crescentes de proteína digestível.

	Nível de proteína digestível na dieta (g kg^{-1})					
Variável	**200**	**240**	**270**	**320**	**360**	**390**
PB (%)	12.42 ± 0.49^{c}	12.97 ± 0.49^{bc}	14.29 ± 0.58^{ab}	15.51 ± 0.39^{a}	14.44 ± 0.08^{ab}	13.80 ± 0.11^{bc}
EE (%)	1,41 ± 0,27	2,03 ± 0,09	0,72 ± 0,05	0,79 ± 0,04	1,95 ± 0,17	1,88 ± 0,57
UMID.	78,55 ± 0,15^{b}	77,40 ± 0,09^{b}	77,18 ± 0,21^{c}	77,07 ± 0,02^{c}	78,84 ± 0,15^{b}	79,92 ± 0,03^{a}
CNZ (%)	1,84 ± 0,03c	1,78 ± 0,09c	2,84 ± 0,04b	3,09 ± 0,12a	2,68 ± 0,01b	1,72 ± 0,06c

Os dados são expressos como média ± desvio padrão (n = 3). Valores na mesma linha com subscritos diferentes são significativamente diferentes (p < 0,05). PB, proteína bruta (y = −0,0002x² + 0,1243x − 5,027, R² = 0,84) EE, extracto etéreo UMID, umidade: (y = −0,000248x² − 0,1391x + 96,470, R² = 0,95) CNZ, cinzas: (y = −0,000127x² + 0,0773x − 8,826, R² = 0,68).

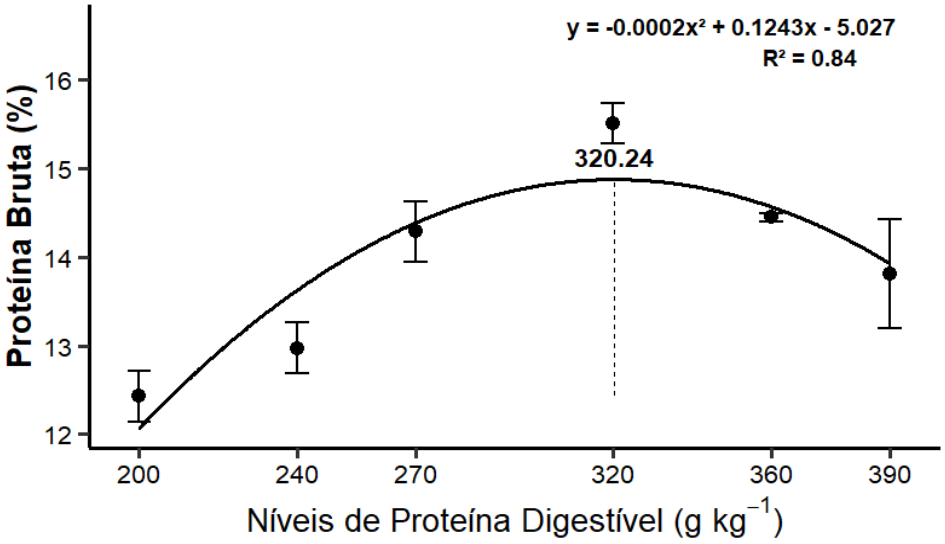

Figura 2. Respostas quadráticas observadas para proteína bruta de corpo inteiro de alevinos de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) alimentados com dietas Fishmeal-free contendo níveis crescentes de proteína digestível.

O teor de umidade mostrou uma resposta quadrática ao aumento dos níveis de PD na dieta (y = 0,000248x² − 0,1391x + 96,470; R² = 0,95), com o ponto máximo estimado em 279,8 g kg^{-1} PD (304,99 g kg^{-1} PB) na dieta. Um efeito quadrático também foi observado para o teor de cinzas (y = −0,000127x² + 0,0773x − 8,826; R² = 0,68), com o ponto máximo estimado em 303,27 g kg^{-1} PD (330,75 g kg^{-1} PB) na dieta.

4. Discussão

A resposta quadrática observada nos diferentes parâmetros zootécnicos indica que o desempenho dos alevinos provavelmente não foi determinado apenas pelo aumento linear da PD na dieta, mas sim pelo equilíbrio entre proteína, energia e perfil de aminoácidos [4, 6, 8]. Embora as dietas tenham sido formuladas com o mesmo nível de energia digestível, o aumento da PD alterou simultaneamente a proporção de proteínas, a proporção de farelo de soja em relação ao milho e a concentração de aminoácidos essenciais. Em níveis abaixo do requisito, a disponibilidade limitada de aminoácidos pode restringir a síntese e o crescimento de proteínas porque os peixes têm uma necessidade fisiológica de aminoácidos essenciais, e não apenas de proteína total da dieta [6, 34]. Por outro lado, em níveis acima do ponto ideal, aminoácidos excedentes podem ter sido catabolizados para fins energéticos, reduzindo a eficiência da utilização de proteínas e

contribuindo para o declínio no desempenho zootécnico [8, 35]. Além disso, devido ao seu hábito onívoro, a tilápia-do-Nilo tem a capacidade de utilizar carboidratos como fonte de energia não proteica, o que pode contribuir para o efeito de poupar proteínas quando a proporção de proteínas está adequadamente equilibrada [8, 36]. Assim, a interpretação dos resultados não deve se restringir à determinação clássica de uma exigência de proteína, mas também deve considerar o conceito de eficiência de utilização de nutrientes, especialmente no contexto da nutrição de precisão e da sustentabilidade produtiva.

A exigência estimada de 320 g kg^{-1} PD para maximizar o peso final, o peso de peso e o teor de proteína corporal é consistente com a alta demanda nutricional esperada durante a fase de alevinos. Nesse estágio, os peixes apresentam uma taxa de crescimento intensa e alta deposição de tecido muscular, o que justifica uma maior demanda por aminoácidos em comparação com fases posteriores. Meurer et al. [4] ao avaliar estudos sobre as exigências de proteína da tilápia-do-Nilo em diferentes fases de produção, destacou que a exigência é influenciada pelo peso corporal, estágio de desenvolvimento, sistema de cultivo, qualidade dos ingredientes e a proporção de proteínas da dieta.

A exigência de PD estimada no presente estudo com base no peso final e no ganho de peso foi maior do que os valores relatados por Durigon et al. [36] e Sgnaulin et al. [37] para os alevinos de tilápia-do-Nilo cultivados em um sistema de biofloco. Essa diferença pode estar associada às características do sistema de cultura, já que a biomassa microbiana presente no biofloco pode atuar como uma fonte alimentar complementar, fornecendo proteínas, aminoácidos e outros compostos nutricionais [38, 39], melhorando assim a eficiência de utilização de proteínas [40].

Quando expressa como PB, exigência estimada no presente estudo, correspondente a aproximadamente 347 g kg^{-1} PB, está dentro da faixa descrita na literatura para tilápia em estágios iniciais de crescimento [4], embora difira dos valores relatados em estudos anteriores. Esse valor é maior do que o observado por Sweilum et al. [41], que relataram uma melhor resposta com uma dieta contendo aproximadamente 300 g kg^{-1} de PB, e o valor de 330 g kg^{-1} indicado por Sayed [42] para jovens tilápias do Nilo. Por outro lado, está próximo dos valores mais altos relatados para fases iniciais de crescimento, como os estimados por Chen et al. [43], que estavam próximos de 350 g kg^{-1} PB.

A maior TCE foi obtida com 313,10 g kg^{-1} de PD (341,47 g kg^{-1} PB) na dieta, um nível inferior ao descrito por Abdel-Tawwab et al. [44] para alevinos pesando 0,5 g, para os quais foi reportada uma exigência de 450 g kg^{-1} PB. Peixes em estágios iniciais de desenvolvimento tendem a ter maiores necessidades proteicas do que peixes maiores devido à sua alta taxa de crescimento relativo e intensa deposição de tecidos [45, 46]. Além disso, a TCE tende a diminuir conforme o desenvolvimento avança e o peso corporal aumenta, o que pode ajudar a explicar as diferenças entre os valores estimados em diferentes estudos. Diferenças no peso inicial dos peixes, estágio de desenvolvimento e ingredientes utilizados na dieta, também podem ter contribuído para a menor necessidade estimada no presente estudo em comparação com a relatada por Abdel-Tawwab et al. [44].

Para a CAA, o ponto mínimo foi estimado em 313,05 g kg^{-1} PD (341,41 g kg^{-1} PB) na dieta. Esse foi um nível de PD maior do que o relatado por Gonçalves et al. [47], que estimou uma exigência de 300 g kg^{-1} PD usando o conceito de proteína ideal. Usando o mesmo conceito e com o objetivo de reduzir o uso de proteína, Righetti et al. [48] encontrou melhores resultados com dietas contendo 230,8 e 258,2 g kg^{-1} PD para juvenis pesando entre 100 e 500 g.

Com base nos resultados obtidos, pode-se inferir que níveis mais baixos de DP foram utilizados de forma mais eficiente do que níveis mais altos. Um padrão semelhante foi relatado por Quadros et al. [49] para tilápia do Nilo pesando 10,46 ± 0,12 g, na qual o TEP diminuiu com o aumento do PD na dieta, mas aumentou com a suplementação de aminoácidos digestíveis, como lisina. Os valores encontrados para TEP foram próximos de 300 g kg^{-1} de PB da dieta, valores aproximados de Goda et al. [50] e Mohanta et al. [51]. Os maiores valores de TEP foram observados nos níveis mais baixos de PD, o que pode ser explicado por uma utilização mais eficiente de aminoácidos e redução do catabolismo de aminoácidos.

Os parâmetros de rendimento corporal, índice hepatosomático e diâmetro do hepatócito não foram afetados pelos tratamentos. Os hepatócitos apresentavam uma disposição cordonal, conforme descrito por Vicentini et al. [52], e a morfologia do tecido hepático foi consistente com a descrita para peixes teleósteos, na qual a vacuolização citoplasmática indica a provável localização das reservas lipídicas e de glicogênio [53]. A ausência de mudanças significativas no índice hepatosomático e no diâmetro do hepatócito sugere que os diferentes níveis de PD não induziram mudanças morfométricas hepáticas marcantes sob as condições experimentais do presente estudo.

O aumento dos níveis de PD resultou em uma resposta quadrática para o teor de proteína bruta, umidade e cinzas da composição química de corpo inteiro. Para proteína bruta da carcaça, os valores observados diferiram daqueles relatados por Zuanon et al. [54], mas foram semelhantes às relatadas por Furuya et al. [55]. O nível de proteína na dieta pode influenciar a composição corporal dos peixes porque a variação na concentração de proteína em dietas isoenergéticas pode alterar o uso da proteína como fonte de energia quando a proteína é fornecida em excesso.

Por outro lado, dietas contendo níveis de proteína abaixo do requisito podem não fornecer aminoácidos suficientes para a síntese proteica [56], podendo resultar em maior deposição de gordura, pois o excesso de carboidratos pode ser convertido em gordura quando o equilíbrio proteico é inadequado. No entanto, nenhuma diferença significativa foi observada no teor de gordura corporal integral, provavelmente devido à alta demanda energética associada ao crescimento corporal durante essa fase da vida.

Os alevinos de tilápia-do-Nilo apresentaram valores mais baixos de matéria seca corporal em níveis alimentares de 240 e 320 g kg^{-1} PD. Nesses níveis intermediários de PD e PB, também foi observada maior deposição de PB na carcaça, diferente dos resultados relatados por Elfeki et al. [57]. Quanto ao teor de cinzas, a resposta observada pode estar relacionada à deposição de proteínas e à GP, pois é necessária maior incorporação mineral para apoiar o crescimento dos tecidos.

A análise detalhada das exigências de proteína para a tilápia-do-Nilo em diferentes estágios de desenvolvimento destaca a complexidade dessa questão [4]. Peixes têm uma necessidade fisiológica de aminoácidos essenciais, em vez de níveis de proteína dietética propriamente ditos; no entanto, a retenção de aminoácidos segue um padrão semelhante ao da retenção de proteínas na carcaça [7]. O conhecimento dos perfis de aminoácidos da alimentação permite maior confiança na formulação da dieta, pois os níveis de aminoácidos podem ser menores em dietas baseadas em ingredientes vegetais, como o farelo de soja e milho [58]. Os níveis de aminoácidos presentes nas dietas foram adequados para suportar o máximo de GP e estavam próximos dos recomendados pela NRC [34]. As dietas usadas no presente estudo foram formuladas usando farelo de soja e milho como únicas fontes de aminoácidos e, segundo Rostagno et al. [59], a

composição desses ingredientes apresenta menos variação do que a de muitos ingredientes proteicos de origem animal, permitindo uma base confiável para comparação com a literatura. Nesse contexto, Carneiro et al. [60] também destacou que dietas baseadas em farinha de soja e milho permitem maior previsibilidade na formulação nutricional devido à composição relativamente estável desses ingredientes, além de possibilitarem a produção de rações de tilápia livres de ingredientes de origem animal.

A lisina é um aminoácido essencial intimamente associado à deposição de proteínas e ao crescimento de peixes, sendo comumente usada como aminoácido de referência para estimar as necessidades de outros aminoácidos essenciais dentro do conceito de proteína ideal [61]. Os níveis ótimos estimados por regressão quadrática para peso final, GP, CAA e PB de corpo inteiro estavam entre 313,7 e 320,24 g kg^{-1} PD na dieta (340 e 348,80 g kg^{-1} PB), correspondendo aos níveis de lisina entre 19,5 e 20,1 g kg^{-1} de ração. Esses valores são semelhantes aos relatados para jovens tilápias do Nilo por Prabu et al. [62], que determinou os níveis ideais de lisina para a dieta GP entre 18 e 19,5 g de kg^{-1}. Para dietas contendo 350 g kg^{-1} de PB, recomenda-se um teor de lisina de 20 g kg^{-1} [6].

A metionina é um dos principais aminoácidos limitantes do enxofre nas dietas à base de farelo de soja [63]. A quantidade de metionina + cistina presente na dieta, contendo 320 g kg^{-1} PD (349 g kg^{-1} CP), correspondia a 10,1 g kg^{-1} de ração, um valor semelhante ao relatado por He et al. [64] para juvenis de tilápia-do-Nilo. Para a treonina, os valores recomendados variam de 9,9 a 14,3 g kg^{-1} de alimentação para alevinos [65]. No presente estudo, o nível de treonina correspondente as exigências estimadas de PD para CAA, GP e peso final (entre 311,07 e 311,7 g kg^{-1} DP) foi de 13,4 g kg^{-1} de ração.

Os resultados para a composição química corporal mostraram que os valores máximos estavam associados aos perfis de aminoácidos mais favoráveis nos diferentes níveis de PD, apoiando o uso das variáveis de desempenho zootécnico na determinação das exigências proteicas e na identificação de dietas que maximizam a deposição real de proteínas. Para a PB de corpo inteiro, os valores estimados por regressão quadrática (320,24 g kg^{-1} PD) diferiram pouco dos níveis estimados usando as variáveis zootécnicas. O uso apenas de parâmetros zootécnicos pode dificultar a estimativa real da retenção de nutrientes, pois o GP sem análise bromatológica pode não refletir com precisão a deposição de proteínas na carcaça, levando potencialmente a conclusões enganosas [34]. No presente estudo, os pontos máximos para peso final e GP ocorreram em 311,7 g kg^{-1} PD, enquanto o teor máximo de proteína da corporal foi estimado em 320,24 g kg^{-1} PD. Em conjunto, esses resultados sugerem que níveis intermediários de PD promoveram GP com maior deposição proteica corporal.

Os resultados obtidos no presente estudo reforçam que níveis mais altos de proteína na dieta não necessariamente resultam em melhor desempenho. Os melhores resultados foram observados nos níveis intermediários de PD, enquanto os níveis mais altos não proporcionaram ganhos adicionais. Essa resposta é relevante da perspectiva da Aquicultura 3.0 pois mostra que a eficiência do sistema de produção depende do ajuste fino entre o fornecimento de nutrientes e a capacidade metabólica dos animais. Quando a proteína é fornecida acima do necessário, os aminoácidos excedentes tendem a ser desaminados e usados como fonte de energia, o que reduz a eficiência de retenção de proteínas e pode aumentar a eliminação de compostos nitrogenados no ambiente aquático [6].

Embora a excreção de nitrogênio não tenha sido medida diretamente no presente estudo, a ausência de benefícios produtivos em níveis mais elevados de proteína digestível sugere que o fornecimento de proteína acima da exigência não é nutricionalmente eficiente. Essa interpretação

é consistente com o conceito de uso racional de nitrogênio em dietas para aquicultura, segundo o qual a proteína deve ser fornecida em quantidades suficientes para sustentar o crescimento e a deposição de proteína, sem aumentar custos e perdas metabólicas decorrentes de suplementação excessiva. Otimizar as dietas da tilápia-do-Nilo pode contribuir para reduzir o impacto ambiental da produção, especialmente quando os níveis de proteína, energia e aminoácidos estão balanceados [7].

O uso de dietas *fishmeal-free*, baseadas em farelo de soja e milho, também deve ser destacado, pois substituir a farinha de peixe por ingredientes de origem vegetal é uma das principais estratégias para reduzir a dependência dos recursos marinhos e apoiar a expansão sustentável da aquicultura [17, 19]. O farelo de soja é uma das fontes de proteína vegetal mais amplamente utilizadas em rações para aquicultura devido à sua disponibilidade, composição relativamente estável e bom valor nutricional, embora ainda existam limitações relacionadas ao perfil de aminoácidos e fatores antinutricionais [16, 66]. No presente estudo, a formulação de rações baseadas no farelo de soja e milho permitiu a avaliação de uma dieta prática aplicável às condições de produção comercial, contribuindo para recomendações mais representativas da realidade produtiva. Assim, os resultados reforçam que dietas à base de plantas, quando adequadamente equilibradas em termos de nível de PD e perfil de aminoácidos, podem sustentar o desempenho dos alevinos de tilápia-do-Nilo e contribuir para sistemas de aquicultura mais eficientes e sustentáveis.

5. Conclusão

Com base nos resultados do presente estudo, dietas *fishmeal-free*, baseadas em farelo de soja e milho, podem ser usadas para os alevinos de tilápia-do-Nilo, e recomenda-se o nível de 320,24 g kg^{-1} PD (348,50 g kg^{-1} PB) para otimizar o peso final, ganho de peso, conversão alimentar e o teor de proteína do corporal.

Declaração de conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados

Os dados deste estudo estarão disponíveis junto ao autor correspondente mediante solicitação razoável.

Contribuições do autor

Conceituação: Junior, G. B.; Meurer, F.; Análise formal: Junior, G. B.; Rosa da Silva, L. C.; Aquisição de financiamento: Meurer, F.; Metodologia: Meurer, F.; Validação: Junior, G. B.; Novodworski, J.; Investigação: Junior, G. B.; Recursos: Novodworski, J.; Curadoria de dados: Balen, R. E.; Redação (esboço original): Junior, G. B.; Redação (revisão e edição): Balen, R. E.; Visualização: Rosa da Silva, L. C.; Supervisão: Meurer, F.; Administração do projeto: Meurer, F.

Declaração de uso de IA generativa

Os autores não utilizaram ferramentas ou tecnologias de IA generativa na criação ou edição de nenhuma parte deste manuscrito.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Aquacultura Tupi Ltda., Guaíra, Paraná, Brasil, por doar o peixe utilizado neste estudo.

Referências

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in action [Internet]. Rome: FAO; 2024. Disponível em: https://doi.org/10.4060/cd0683en

2. Brazilian Fisheries Association (PEIXE BR). Anuário Peixe BR da Piscicultura de 2026 [Internet]. [cited 29 May 2026]. Disponível em: https://www.peixebr.com.br/anuario-2026

3. Deck CA, Salger SA, Reynolds HM, Tada MD, Severance ME, Ferket P, et al. Nutritional programming in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): effect of low dietary protein on growth and the intestinal microbiome and transcriptome. PLoS One. 2023;18(10):e0292431. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292431

4. Meurer F, Novodworski J, Bombardelli RA. Protein requirements in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) during production and reproduction phases. Aquac. Fish. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aaf.2024.03.004

5. Ramakrishnan GS, Pradhan C, Singh AK, Das S, Pillai D, Mohanta KN. Effect of alpha-ketoglutarate supplementation on growth, antioxidant capacity, gene expression and amino acid profile in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) under varying protein diets. Anim. Feed Sci. Technol. 2023;306:115808. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115808

6. Furuya WM, Cruz TP, Gatlin DM III. Amino acid requirements for nile tilapia: an update. Animals. 2023;13:900. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ani13050900

7. Teodósio R, Engrola S, Colen R, Masagounder K, Aragão C. Optimizing diets to decrease environmental impact of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) production. Aquac. Nutr. 2020;26(2):422-431. Disponível em: https://doi.org/10.1111/anu.13004

8. Konnert GDP, Gerrits WJJ, Gussekloo SWS, Schrama JW. Balancing protein and energy in Nile tilapia feeds: a meta-analysis. Rev. Aquac. 2022;14(4):1757-1778. Disponível em: https://doi.org/10.1111/raq.12671

9. Xing S, Liang X, Zhang X, Oliva-Teles A, Peres H, Li M, et al. Essential amino acid requirements of fish and crustaceans, a meta-analysis. Rev. Aquac. 2024;16(3):1069-1086. Disponível em: https://doi.org/10.1111/raq.12886

10. Anedda R, Melis R, Palomba A, Vitangeli I, Biosa G, Braca A, et al. Balanced replacement of fish meal with Hermetia illucens meal allows efficient hepatic nutrient metabolism and increases fillet lipid quality in gilthead sea bream (*Sparus aurata*). Aquaculture. 2023;576:739862. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739862

11. Colombo SM, Turchini GM. 'Aquafeed 3.0': creating a more resilient aquaculture industry with a circular bioeconomy framework. Rev. Aquac. 2021;13(3):1156-1158. Disponível em: https://doi.org/10.1111/raq.12567

12. Masi M, Adinolfi F, Vecchio Y, Agnusdei GP, Coluccia B. Toward the circular economy in the aquaculture sector: bibliometric, network and content analyses. Sustainability. 2024;16(13):5405. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su16135405

13. Kruk SRL, Bush SR, Phillips M. Federating 'Aquaculture 4.0' for data-driven social and environmental sustainability. Marine Policy. 2024;169:106355. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106355

14. Novodworski J, Matos ÉJA, Gonçalves RM, Bombardelli RA, Meurer F. Protein level reduction in corn and soybean meal-based diets supplemented with essential amino acids during the fattening phase of Nile tilapia. Ann. Anim. Sci. 2025;25(4):1565-1574. Disponível em: https://doi.org/10.2478/aoas-2025-0055

15. Phan LTT, Kals J, Masagounder K, Mas-Muñoz J, Schrama JW. Energy utilisation efficiencies of digestible protein, fat and carbohydrates for African catfish (*Clarias gariepinus*). Aquac. Rep. 2022;23:101051. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101051

16. Hussain SM, Bano AA, Ali S, Rizwan M, Adrees M, Zahoor AF, et al. Substitution of fishmeal: highlights of potential plant protein sources for aquaculture sustainability. Heliyon. 2024;10(4):e26573. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26573

17. Magbanua TO, Ragaza JA. Selected dietary plant-based proteins for growth and health response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquac. Fish. 2024;9(1):3-17. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.04.001

18. Matos ÉJA, Urbinati EC, Meurer F. Farinha de folhas na nutrição de peixes/Leaf meal in fish nutrition. Ponta Grossa: Atena Editora; 2024. 92 p. Disponível em: https://doi.org/10.22533/at.ed.603231212

19. Moyo NAG, Rapatsa-Malatji MM. A review and meta-analysis of selected plant protein sources as a replacement of fishmeal in the diet of tilapias. Ann. Anim. Sci. 2023;23(3):681-690. Disponível em: https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0084

20. Costa LC, Feiden A. Diagnosis of fingerling production in the micro region of Toledo in Paraná. Research, Society and Development. 2023;12:e28812340753. Disponível em: https://doi.org/10.33448/rsd-v12i3.40753

21. Koroleff F. Determination of nutrients: 2. Ammonia. In: Grasshoff K, editor. Methods of seawater analysis. Weinheim: Verlag Chemie; 1976. p. 126-133.

22. Baumgarten MDGZ, Rocha JMB, Niencheski LFH. Manual de análises em oceanografia química; FURG: Rio Grande, Rio Grande do Sul, BR; 1996. 132p.

23. Macêdo JAB. Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas, 3rd ed.; Conselho Regional de Química: Belo Horizonte, Minas Gerais, BR; 2005. 616p.

24. Fleckenstein LJ, Tierney TW, Ray AJ. Comparing biofloc, clear-water, and hybrid recirculating nursery systems (Part II): tilapia (*Oreochromis niloticus*) production and water quality dynamics. Aquac. Eng. 2018;82:80-85. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.06.006

25. Lailiyah M, Harwanto D, Desrina D. Effectiveness of filter media compositions on water quality, growth and survival rate of tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in recirculation system. Omni-Akuatika. 2023;19:34-46. Disponível em: http://dx.doi.org/10.20884/1.oa.2023.19.1.963

26. Boscolo WR, Hayashi C, Meurer F. Apparent digestibility of the energy and nutrients of conventional and alternative foods for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Rev. Bras. Zootec. 2002;31(3):539-545. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-35982002000300001

27. Moreira AGL, Teixeira EG, Carreiro CRP, Moreira RL. Eficácia do eugenol extraído da planta Eugenia aromatica como anestésico para realização de biometrias em adultos de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). Acta Sci. Anim. Sci. 2010;32(4):419-423. Disponível em: https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v32i4.9973

28. AOAC - Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis of the Association Analytical Chemists, 18th ed.; AOAC International: Gaithersburg, Maryland, US; 2005. 1015p.

29. R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing, 2022. Disponível em: https://www.r-project.org/

30. Ferreira EB, Cavalcanti PP, Nogueira DA. ExpDes: Experimental Designs Package, R package version 1.2.2, 2021. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/ExpDes/index.html (accessed on 3 December 2023).

31. Wickham H, François R, Henry L, Müller K, Vaughan D. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.3, 2023. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html

32. Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer; 2016.

33. Elzhov TV, Mullen KM, Spiess A, Bolker B. minpack.lm: R Interface to the Levenberg-Marquardt Nonlinear Least-Squares Algorithm Plus Support for Bounds. R package version 1.2-4, 2023. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/index.html

34. NRC - National Research Council. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp. The National Academies Press: Washinton, DC, US; 2011. 367 p. Disponível em: https://doi.org/10.17226/13039

35. Azaza MS, Khiari N, Dhraief MN, Aloui N, Kraïem MM, Elfeki A. Growth performance, oxidative stress indices and hepatic carbohydrate metabolic enzymes activities of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L., in response to dietary starch to protein ratios. Aquac. Res. 2015;46:14-27. Disponível em: https://doi.org/10.1111/are.12153

36. Durigon EG, Lazzari R, Uczay J, Lopes DLA, Jeronimo GT, Sgnaulin T, et al. Biofloc technology (BFT): adjusting the levels of digestible protein and digestible energy in diets of Nile tilapia juveniles raised in brackish water. Aquac. Fish. 2020;5(1):42-51. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aaf.2019.07.001

37. Sgnaulin T, Durigon EG, Pinho SM, Jerônimo GT, Lopes DLA, Emerenciano MGC. Nutrition of Genetically Improved Farmed Tilapia (GIFT) in biofloc technology system: optimization of digestible protein and digestible energy levels during nursery phase. Aquaculture. 2020;521:734998. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734998

38. Khanjani MH, Sharifinia M. Biofloc technology as a promising tool to improve aquaculture production. Rev Aquac. 2020;12(3):1836-1850. Disponível em: https://doi.org/10.1111/raq.12412

39. Khanjani MH, Sharifinia M, Hajirezaee S. Recent progress towards the application of biofloc technology for tilapia farming. Aquaculture. 2022;552:738021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738021

40. Zablon WO, Ogello EO, Getabu A, Omondi R. Biofloc system improves protein utilization efficiency and growth performance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* fry: experimental evidence. Aquac. Fish. 2022;2(2):94-103. Disponível em: https://doi.org/10.1002/aff2.32

41. Sweilum MA, Abdella MM, El-Din SAS. Effect of dietary protein-energy levels and fish initial sizes on growth rate, development and production of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. Aquac. Res. 2005;36(14):1414-1421. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01362.x

42.Sayed ABN. Optimum crude protein requirement of the fingerlings Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Biol Sci. 2018;2(1):1-8 https://doi.org/10.31058/j.bs.2018.21001

43. Chen JX, Feng JY, Zhu J, Luo L, Lin SM, Wang DS, et al. Starch to protein ratios in practical diets for genetically improved farmed Nile tilapia *Oreochromis niloticus*: effects on growth, body composition, peripheral glucose metabolism and glucose tolerance. Aquaculture. 2020;515:734538. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734538

44. Abdel-Tawwab M, Ahmad MH, Khattab YAE, Shalaby AME. Effect of dietary protein level, initial body weight, and their interaction on the growth, feed utilization, and physiological alterations of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). Aquaculture. 2010;298(3-4):267-274. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.10.027

45. Oliva-Teles A, Couto A, Enes P, Peres H. Dietary protein requirements of fish: a meta-analysis. Rev. Aquac. 2020;12(3):1445-1477. Disponível em: https://doi.org/10.1111/raq.12391

46. Castillo JDA, Pereira EMO, Teles A, Rodrigues E, Costa DV, Kitagawa AT, et al. Determining the daily digestible protein intake for Nile tilapia juveniles at different growth stages. Bol. Inst. Pesca. 2017;43(1):79-89. Disponível em: https://doi.org/10.20950/1678-2305.2017.54.63

47. Gonçalves GS, Pezzato LE, Barros MM, Hisano H, Santa Rosa MJ. Level of digestible protein and digestible energy in diets for Nile tilapia formulated based on the concept of ideal protein. Rev. Bras. Zootec. 2009;38(12):2289-2298. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001200001

48. Righetti JS, Furuya WM, Conejero CI, Graciano TS, Vidal LVO, Michellato M. Redução da proteína em dietas para tilápias-do-nilo por meio da suplementação de aminoácidos com base no conceito de proteína ideal. Rev. Bras. Zootec. 2011;40(3):469-476. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000300002

49. Quadros M, Lanna EAT, Donzele JL, Abreu MT, Ribeiro FB, Takishita SS. Crude protein reduction and digestible methionine+cystine and threonine to digestible lysine ratios in diets for Nile tilapia fingerlings. Rev. Bras. Zootec. 2009;38(8):1400-1406. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000800002

50. Goda AM, El-Haroun ER, Chowdhury MAK. Effect of totally or partially replacing fish meal by alternative protein sources on growth of African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) reared in concrete tanks. Aquac. Res. 2007;38(3):279-287. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01663.x

51. Mohanta KN, Mohanty SN, Jena JK, Sahu NP. Protein requirement of silver barb, Puntius gonionotus fingerlings. Aquac. Nutr. 2008;14(2):143-152. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2007.00514.x

52. Vicentini CA, Franceschini-Vicentini IB, Bombonato MTS, Bertolucci B, Lima SG, Santos AS. Morphological study of the liver in the teleost *Oreochromis niloticus*. Int. J. Morphol. 2005;23(3):211-216. Disponível em: https://doi.org/10.4067/S0717-95022005000300003

53. Takashima F, Hibiya T. An atlas of fish histology: normal and pathological features. 2nd ed. Tokyo, Japan: Kodansha Limited; 1995. 195 p.

54. Zuanon JAS, Salaro AL, Moraes SSS, Oliveira Alves LM, Balbino EM, Araújo ES. Dietary protein and energy requirements of juvenile freshwater angelfish. Rev. Bras. Zootecn. 2009;38: 989-993. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000600003

55. Furuya WM, Botaro D, Macedo RMG, Santos VG, Silva LCR, Castro Silva T, et al. Aplicação do conceito de proteína ideal para redução dos níveis de proteína em dietas para tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*). Rev. Bras. Zootecn. 2005;34:1433-1441. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-35982005000500002

56. Jauncey K. Nutritional requirements. In: Beveridge MCM, McAndrew BJ, editors. Tilapias: biology and exploitation. Dordrecht, Netherlands: Springer; 2000. p. 327-375.

57. Elfeki A, Eid A, El Sayed K, Mostafa B, Salama FA. Effect of dietary protein levels and sex on growth performance, feed utilization and body composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry cultured in hapas. Egypt, J. Nutr. Feeds. 2018;21:279-288. Disponível em: https://doi.org/10.21608/ejnf.2018.75467

58. Vidal LVO, Xavier TO, Michelato M, Martins EN, Pezzato LE, Furuya WM. Apparent protein and energy digestibility and amino acid availability of corn and co-products in extruded diets for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. J. World Aquac. Soc. 2015;46(2):183-190. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jwas.12184

59. Rostagno HS, Albino LFT, Hannas MI, Donzele JL, Sakomura NK, Perazzo FG, et al. Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais. 4th ed. Viçosa: Departamento de Zootecnia, UFV; 2017. 488 p.

60. Carneiro WF, Colpini LMS, Souza RCT de, Bombardelli RA, Balen RE, Meurer F. Effect of the digestible protein-energy relationship on the growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed fishmeal-free diets. Anim. Feed Sci. Technol. 2020;262:114379. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114379

61. Nascimento TMT, Mansano CFM, Peres H, Rodrigues FHF, Khan KU, Romaneli RS, et al. Determination of the optimum dietary essential amino acid profile for growing phase of Nile tilapia by deletion method. Aquaculture. 2020;523:735204. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735204

62. Prabu E, Felix N, Uma A, Praveenraj J. Effects of dietary L-lysine supplementation on growth, body composition and muscle-growth-related gene expression with an estimation of lysine requirement of GIFT tilapia. Aquac Nutr. 2020;26(2):568-578. Disponível em: https://doi.org/10.1111/anu.13018

63. Furuya WM, Hayashi C, Furuya VRB, Sakaguti ES, Botaro D, Silva LCR, et al. Farelo de soja integral em rações para juvenis de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). Acta Sci. Anim. Sci. 2004;26(2):203-207.

64. He JY, Long WQ, Han B, Tian LX, Yang HJ, Zeng SL, et al. Effect of dietary L-methionine concentrations on growth performance, serum immune and antioxidative responses of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Aquac. Res. 2017;48(2):665-674. Disponível em: https://doi.org/10.1111/are.12913

65. Bomfim MAD, Lanna EAT, Donzele JL, Quadros M, Ribeiro FB, Araújo WAG. Exigência de treonina, com base no conceito de proteína ideal, de alevinos de tilápia-do-nilo. Rev. Bras. Zootec. 2008;37(12):2077-2084. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001200001

66. Glencross BD, Baily J, Berntssen MHG, Hardy R, MacKenzie S, Tocher DR. Risk assessment of the use of alternative animal and plant raw material resources in aquaculture feeds. Rev. Aquac. 2020;12(2):703-758. Disponível em: https://doi.org/10.1111/raq.12347