



## Bioeficácia relativa do análogo do sal hidroxicalcico metionina em comparação com DL-metionina no desempenho de galinhas poedeiras leves na fase de produção

Relative bioeffectiveness of hydroxy calcium salt analogous methionine compared to DL-methionine on the performance of light laying hens in the production phase

Thamires da Silva Ferreira<sup>\*1</sup> , Márcia das Neves Soares<sup>2</sup> , Isabelle Naemi Kaneko<sup>3</sup> , Sarah Gomes Pinheiro<sup>1</sup> , Fernando Guilherme Perazzo Costa<sup>1</sup> , Romilton Ferreira de Barros Júnior<sup>1</sup> 

1 Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Areia, Paraíba, Brasil 

2 Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, Brasil 

3 Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Porto Velho, Rondônia, Brasil 

\*autor correspondente: thamiressf55@gmail.com

Recebido: 25 de novembro de 2024. Aceito: 28 de agosto de 2025. Publicado: 18 de setembro de 2025. Editor: Rondineli P. Barbero e Marcos Barcellos Café

**Resumo:** O estudo avaliou a bioeficácia relativa da HMBA-Ca em comparação a DLM aos níveis de Met+Cys digestíveis para poedeiras leves de 42 a 62 semanas de idade sobre o desempenho, qualidade de ovos, condição de escore de plumagem e avaliação econômica. Um total de 1080 poedeiras Hy-line W80 foram distribuídas em 9 tratamentos em um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial, 2x4+1 (2 fontes, 4 níveis de suplementação de metionina+cistina digestíveis: 0,46, 0,54, 0,56 e 0,58 % e 1 grupo isento de suplementação). Ambas as fontes atenderam às exigências nutricionais, sendo a DLM mais eficiente em níveis próximos à exigência mínima, favorecendo o peso dos ovos, enquanto a HMBA-Ca apresentou melhor desempenho em níveis mais elevados, com maior percentual de gema e melhor escore de plumagem. A qualidade da casca não foi comprometida, mesmo com o aumento do tamanho dos ovos. A análise econômica indicou custo por dúzia mínimo em níveis intermediários (0,50–0,54 %), mas a HMBA-Ca a 0,58 % apresentou maior margem líquida (103 %) e retorno por dólar investido, mantendo vantagem mesmo em cenários simulados de variação cambial. Conclui-se que, embora ambas as fontes sejam eficazes, a suplementação com HMBA-Ca a 0,58 % representa a estratégia mais vantajosa por conciliar desempenho produtivo, qualidade da plumagem e maior rentabilidade em condições de mercado favoráveis.

**Palavras-chave:** aminoácidos sulfurosos; produção de ovo; escore de plumagem; índice econômico.

**Abstract:** The study evaluated the relative bioefficacy of HMBA-Ca compared to DLM at digestible Met+Cys levels for lightweight laying hens from 42 to 62 weeks of age on performance, egg quality, feather score condition, and economic assessment. A total of 1,080 Hy-Line W80 hens were allocated to nine treatments in a completely randomized design with a 2x4+1 factorial arrangement (2 sources, 4 levels of digestible methionine+cystine supplementation: 0.46, 0.54, 0.56, and 0.58 %, plus 1 unsupplemented group). Both sources met the nutritional requirements, with DLM being more efficient at levels close to the minimum requirement, favoring egg weight, whereas HMBA-Ca showed better performance at higher levels, with a greater yolk percentage and improved feather score. Eggshell quality was not compromised, even with the increase in egg size. The economic analysis indicated the lowest cost per dozen at intermediate levels (0.50–0.54 %), but HMBA-Ca at 0.58 % resulted in the highest net margin (103 %) and return per dollar invested, maintaining an advantage even under simulated scenarios of exchange rate variation. It is concluded

that, although both sources are effective, supplementation with HMBA-Ca at 0.58 % represents the most advantageous strategy by combining productive performance, feather quality, and greater profitability under favorable market conditions.

**Key-words:** economic index; egg production; plumage score; sulfur amino acids.

---

## 1. Introdução

A metionina, sendo o primeiro aminoácido limitante em aves alimentadas com dietas à base de milho e farelo de soja, é reconhecida por impactar diretamente a produção avícola. Este aminoácido desempenha diversas funções no metabolismo, destacando-se como doador de grupos metil para a síntese de cisteína, colina, creatina, poliaminas e fosfolipídios. Ademais, a metionina participa da formação e renovação das penas, pelo e pele por meio da cisteína e atua como reguladora da divisão celular. Dessa forma, sua importância para o desenvolvimento e a manutenção corporal das aves é indiscutível<sup>(1,2)</sup>. Assim, atender às exigências de metionina em poedeiras é essencial para otimizar a produção de ovos, permitindo um aumento no teor de proteína bruta no albúmen, elevando a concentração total de fosfolipídios na gema do ovo e proporcionando um incremento no peso e na massa dos ovos, além de melhorar a conversão alimentar.

Como fonte de metionina, a indústria emprega o ácido DL-2-amino-4-(metiltio) butanóico (DLM), que é o mais utilizado. Contudo, os análogos de Met, como o DL-2-hidroxi-4-(metilo) butanóico sal de cálcio (HMBA-Ca), além de serem 20 % mais econômicos<sup>(3)</sup>, também fornecem metionina após processos de transaminação. Embora ambos forneçam L-metionina, são quimicamente distintos, em virtude do grupo hidroxila no carbono assimétrico da MHA e do grupo amino na DLM. Essas diferenças químicas resultam em variações substanciais na absorção, metabolização e conversão para disponibilizar L-metionina ao organismo animal. Quando os compostos diferem em seu metabolismo, eles não podem ser considerados equivalentes. Embora possam apresentar a mesma bioeficácia em relação a um resultado específico, como a síntese de proteínas ou a disponibilidade de metionina, utiliza-se o termo "bioeficácia relativa" para se referir a um valor que compara a potência nutricional ou a eficácia de um determinado nutriente com um padrão definido<sup>(4)</sup>.

Estudos demonstram grande discrepância nos valores de bioeficácia entre as diferentes fontes de metionina, evidenciando a necessidade de pesquisas adicionais, especialmente em relação ao análogo sal de cálcio para poedeiras leves, dado o escasso enfoque nesta fonte em comparação ao DLM no desempenho produtivo das aves. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar a bioeficácia relativa da HMBA-Ca em comparação ao DLM nos níveis de Met+Cys digestíveis para poedeiras leves com idades entre 42 e 62 semanas, considerando o desempenho, a qualidade dos ovos, a condição do escore de plumagem e a avaliação econômica.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Local, animais e habitação

O trabalho foi realizado na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campus II, localizada na latitude 06°57'48"S e longitude 35°41'30"W, a uma altitude de 618 m no estado da Paraíba, Brasil. O uso de animais para esta pesquisa foi aprovado pelo Comitê de Ética no Uso de Animais da UFPB, com o protocolo de aprovação registrado sob o número 4161290819.

Foram utilizadas 1.080 poedeiras comerciais Hy-Line W80, com 42 semanas de idade, peso médio inicial de  $1.600 \pm 0,04$  kg e histórico de produção homogêneo. As aves foram alojadas em galpão convencional, em gaiolas metálicas ( $100 \times 45 \times 45$  cm), com cinco aves por gaiola. O ambiente foi monitorado diariamente com dois termômetros posicionados na altura das aves e um higrômetro para registrar temperatura máxima e mínima e umidade relativa do ar. A média observada foi de  $27,96^\circ\text{C}$  (máxima) e  $19,9^\circ\text{C}$  (mínima), com umidade relativa de 73 %.

A água e a ração foram fornecidas *ad libitum*. O programa de iluminação adotado foi de 17 horas diárias. Antes do início do experimento, as aves passaram por um período de adaptação de 14 dias para uniformização do manejo e estabilização do consumo. Durante todo o estudo, a saúde das aves foi monitorada diariamente e as gaiolas foram higienizadas semanalmente.

## 2.2 Delineamento experimental e dietas

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial  $2 \times 4 + 1$  (duas fontes de HMBA-Ca e DLM, quatro níveis de suplementação de metionina+cistina digestíveis: 0,46, 0,50, 0,54 e 0,58 %, para cada fonte, além de uma ração isenta de suplementação de metionina), totalizando nove tratamentos, com 12 repetições e 10 aves por unidade experimental.

As dietas foram formuladas à base de milho e farelo de soja, seguindo as recomendações do manual da linhagem Hy-Line W80 de 2016, exceto para aminoácidos sulfurados, que foram ajustadas conforme Fickler *et al.* <sup>(5)</sup>. A dieta basal apresentou deficiência em Met+Cys digestíveis (com redução de 0,50 % ou 500 mg/ave/dia). Os níveis de inclusão gradual da DLM e HMBA-Ca foram adicionados à dieta basal. A DLM foi suplementada na proporção de 65 % em relação a HMBA-Ca que foi a 100 %. A composição detalhada e o conteúdo nutricional calculado encontra-se nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1.** Níveis experimentais e adição das fontes de metionina DLM e HMBA-Ca.

Tratamentos	M+C Digestível % na dieta	Adição HMBA-CaA % na dieta	Adição DL-Met % na dieta
1 – Controle Negativo (Basal) <sup>1</sup>	0,40	-	-
2 – Basal + HMBA-Ca nível 1	0,46	0,05	
3 – Basal HMBA-Ca nível 2	0,50	0,10	
4 – Basal HMBA-Ca nível 3	0,54	0,15	
5 – Basal HMBA-Ca nível 4	0,58	0,20	
6 - Basal DLM nível 1	0,46		0,03
7 - Basal DLM nível 2	0,50		0,07
8 - Basal DLM nível 3	0,54		0,10
9 - Basal DLM nível 4	0,58		0,13

<sup>1</sup>Controle negativo isento de suplementação de metionina.

**Tabela 2.** Composição de dietas experimentais e conteúdo nutricional calculado das dietas basais para 42 a 52 semanas e para 53 a 62 semanas, g/kg com base em uma ingestão de ração de 108 a 109 g para cada fase, respectivamente.

<b>Ingredientes</b>	<b>42-52 Semanas</b>	<b>53-62 Semanas</b>
Milho, 7,88 %	668,90	675,67
Farelo de soja. 45,22 %	198,57	188,74
Calcário, 37 %	9,53	9,49
Óleo de soja	94,98	100,22
Fosfato dicálcico, 19 %	18,74	16,72
Sal comum	3,85	3,85
L-Lisina (Biolys®)	0,159	0,159
L-Treonina	1,70	1,59
L-Triptofano (TrypAmino®)	0,18	0,11
Cloreto de Colina, 60 %	0,01	0,07
Premix Vitamínico <sup>1</sup>	0,75	0,75
Premix Mineral <sup>2</sup>	0,70	0,70
Antioxidante <sup>3</sup>	0,10	0,10
Inerte	2,00	2,00
<b>Total</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>
<b>Composição de nutrientes calculada</b>		
Energia Metabolizável (MJ/kg)	2800	2800
Proteína Bruta, %	14,30	13,40
Cálcio, %	4,08	4,07
Fósforo Disponível, %	0,50	0,44
SID Lisina, %	0,80	0,73
SID Metionina, %	0,20	0,19
SID Metionina + cisteína, %	0,40	0,39
SID Treonina, %	0,56	0,51
SID Triptofano %	0,17	0,15
SID Arginina, %	0,83	0,57
SID isoleucina, %	0,62	0,52
SID Leucina, %	1,21	1,15
SID Valina, %	0,70	0,64

SID = digestível ileal padronizado. A ração foi formulada para uma tonelada (1t). <sup>1</sup>Fornecido por quilo de dieta: 15.000.000 IU vitamina A; 1.500.000 vitamina IU D3; 15.000 UI vitamina E; 2 g tiamina; 4 g riboflavina; 3 g piridoxina; 0,015 g vitamina B12; 10 g D-ácido pantotênico; 3 g vitamina K3; 1 g ácido fólico. <sup>2</sup>Fornecido por quilo de dieta: 60 g Mn; 60 g Fe; 50 g Zn/ 10 g Cu; 2 g Coand 250 mg Se. <sup>3</sup>Azul quântico 5000.

### 2.3 Dados e coleta de amostras

O experimento foi estruturado em cinco períodos de 28 dias cada. As variáveis avaliadas foram: consumo de ração (CR), produção de ovos (PO), ovos por galinha alojada (OAA), peso do ovo (POV), massa do ovo (MO), conversão alimentar por massa do ovo (CRMO) e conversão alimentar por dúzia de ovos (CRDO), viabilidade (V), rendimento dos componentes do ovo, como gema (PRG), albúmen (PRA) e casca (PRC), além dos parâmetros de qualidade do ovo, índice de gema (IG), espessura da casca (EC), gravidade específica (GE), resistência à quebra (RQ) e unidade de Haugh (UH), bem como o escore de plumagem e avaliação econômica.

**Desempenho:** O consumo de ração foi determinado pela diferença de peso obtida entre a quantidade de ração fornecida no início e a quantidade restante ao final de cada período de 28 dias, ajustada de acordo com a mortalidade das aves. A produção de ovos foi calculada pela relação

entre o número de ovos produzidos e o número de aves alojadas por período, multiplicada por cem. O peso médio dos ovos foi obtido por meio do peso total dos ovos coletados dividido pelo número de ovos coletados por unidade experimental. A massa do ovo foi calculada pela relação entre a produção de ovos e o peso médio dos ovos, dividido por cem. A conversão alimentar por dúzia de ovos foi obtida pelo consumo total de ração em quilogramas dividido pelo número de dúzias de ovos produzidos. A conversão alimentar por massa de ovo foi calculada pela divisão do consumo total de ração pela massa de ovo produzido. O número de ovos por ave alojada foi determinado pela produção multiplicada pelos dias experimentais, dividido por cem, e a viabilidade foi calculada pelo número final de aves, multiplicado por cem, dividido pelo número inicial de aves.

**Qualidade dos ovos:** Os ovos foram pesados individualmente em uma balança digital de precisão (0,001 g) e, em seguida, quebrados em uma mesa de vidro projetada para as análises. A altura da gema e do albúmen foi medida utilizando um paquímetro de profundidade DIGMESS®, e o diâmetro da gema foi medido com um paquímetro ZAAS®. O índice de gema foi obtido a partir da razão entre a altura e o diâmetro da gema. As porcentagens de gema e albúmen foram determinadas pela relação entre o peso médio desses componentes e o peso médio do ovo. A unidade de Haugh foi calculada conforme a metodologia de Card e Nesheim <sup>(6)</sup>, por meio da equação  $UH = 100 \log (H + 7,57 - 1,7W^{0,37})$ , onde: UH é a Unidade de Haugh; H é a altura do albúmen (mm); e W é o peso do ovo (g). As cascas foram secas em estufa a 55-60 °C por 24 horas, e pesadas em uma balança digital. Após a pesagem, a porcentagem de casca foi obtida pela relação entre o peso médio da casca e o peso médio dos ovos. A espessura da casca foi medida utilizando um micrômetro digital Mitatoyo® de 0-25 mm com precisão de 0,001 mm. A resistência da casca foi determinada utilizando o aparelho TA.X T2 (Texture Analyser®), empregando a sonda P4 DIA Cylinder de 4 mm de diâmetro, com distância de 6 mm e velocidades pré, durante e pós-teste de 3,0; 0,5; e 5,0 mm/s, respectivamente. A gravidade específica foi determinada pelo método de flutuação em solução salina, conforme Hamilton <sup>(7)</sup>. Os ovos foram imersos em uma solução de cloreto de sódio (NaCl) com densidades variando de 1,0700 a 1,0975 g/mL, com um gradiente de 0,0025 entre as densidades. A densidade das soluções foi rotineiramente medida por meio de um densímetro de óleo.

Para a avaliação da pontuação do escore de plumagem, foram avaliadas todas as aves de cada parcela por um avaliador experiente em pontuações em seis áreas do corpo das aves (pescoço, dorso, peito, asas, cloaca e cauda) usando uma escala de 4 pontos (1, 2, 3 ou 4) e através destas foi feita uma pontuação total com a soma de todas as seis partes avaliadas. Dessa forma as pontuações relativas de <10-12 indicam que houve dano grave à plumagem em todo o corpo da ave, já para àquelas que apresentaram pontuação de >18-20 estavam com boa cobertura de penas, como estabelecidas por Tauson *et al.* <sup>(8)</sup>.

Para a avaliação econômica, a eficiência de cada tratamento foi avaliada através da estimativa de custos médios com alimentação por quilo e por dúzia de ovos produzidos <sup>(9)</sup>. A margem bruta foi considerada de acordo com Costa *et al.* <sup>(10)</sup>. Os preços dos insumos foram obtidos através dos preços disponíveis para a região no site marketplace MFRURAL (outubro 2024) e expressos em dólar (US \$) cotação de 24 de outubro de 2024. Os preços do milho grão: 0,31 US \$ / kg; farelo de soja (45 %PB): 0,53 US \$ / Kg, calcário: 0,38 US \$ / Kg; fosfato bicálcico (19 %): 1,07 US \$ / Kg, sal

comum: 0,04 US \$ / Kg, L-lisina: 0,42 US \$, L-treonina: 3,31 US \$, L-triptofano: 10,57 US \$, cloreto de colina (60 %): 0,78 US \$, suplemento vitamínico: 2,51 US \$ / Kg, suplemento mineral: 0,71 US \$ / Kg, antioxidante: 5,76 US \$ / Kg, inerte: 0,03 US \$ / Kg, DLM: 2,46 US \$ / Kg e HMBA-Ca: 1,96 US \$ / Kg.

Foram considerados os custos por tonelada de ração (TR), custo de arraçãoamento (CA), custo de arraçãoamento por dúzia de ovo (CDO), custo de quilograma de ovo produzidos (CKg) e custo da caixa de ovo produzido (CC) (30 ovos). A eficiência econômica de cada tratamento foi avaliada através do índice de custo médio por quilograma de ovo (IMC-Kg) e por caixa de ovo (CC): custo médio por kg ou caixa produzido pelo tratamento, dividido pelo menor custo médio por kg ou caixa produzido entre os tratamentos multiplicado por 100; margem bruta relativa (MBR): margem bruta do tratamento vezes 100, dividido pela margem bruta do tratamento controle; renda bruta relativa (RBR): valor da dúzia de ovos dividido pela quantidade de dúzia de ovo/ave vezes 100; e índice de rentabilidade média (IRM): rentabilidade média do tratamento dividido pela rentabilidade média do tratamento controle.

## 2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância com teste T para as fontes. Essas análises foram realizadas utilizando o software SAS® University Edition, aplicando-se a análise de regressão a 5 % de probabilidade para os níveis de Met+Cys digestíveis. As categorias de escore de plumagem foram analisadas por frequências relativas (0–1), calculadas pela razão entre o número de aves em cada categoria e o total do grupo, permitindo a comparação entre tratamentos e fontes <sup>(11)</sup>. A bioeficácia relativa foi estimada pelo modelo exponencial linear descrito por Littell *et al.* <sup>(12)</sup>, adotando intervalos de confiança de 95 % e verificando ajuste pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e análise de resíduos.

## 3. Resultados

### 3.1 Desempenho

Na tabela 3 observa-se que não houve efeito significativo ( $p > 0.05$ ) das fontes de metionina (HMBA-Ca vs. DLM) nas variáveis estudadas. O aumento dos níveis de Met+Cys na dieta resultou em efeito linear positivo ( $p < 0.001$ ) para produção de ovos (PRO), peso dos ovos (PO), massa de ovos (MO), conversão alimentar por massa de ovos (CRMO), conversão alimentar por dúzia de ovos (CRDO) e ovos por ave alojada (OAA), indicando melhora progressiva dessas variáveis com a elevação do aporte de aminoácidos sulfurados. Observou-se efeito quadrático para PO, MO e CRMO, sugerindo um ponto máximo de desempenho produtivo, estimado em 0,59 % para MO e PO, e em 0,62 % para CRMO.

**Tabela 3.** Efeitos das fontes, dos diferentes níveis de metionina e da interação entre HMBA-Ca e DL-Metionina no consumo de ração (CR), produção de ovos (PRO), peso dos ovos (PO), massa de ovos (MO), conversão de ração por massa de ovos (CRMO), conversão de ração por dúzia de ovos (CRDO), ovos por ave alojada (OAA) e viabilidade (V) de poedeiras leves.

Fonte	CR (g/ave)	PRO (%)	PO (g)	MO (g)	CRMO (g/g)	CRDO (kg/g)	OAA (%)	V (%)
HMBA-Ca	108,7	87,2	61,0	53,6	2,05	1,51	122,1	98,2
DLM	109,7	87,4	61,1	53,7	2,05	1,52	122,7	97,9
p-value	0,110	0,717	0,808	0,669	0,969	0,894	0,717	0,743
Níveis (%)								
0,46	108,9	85,0	59,2	50,6	2,17	1,55	119,0	97,1
0,50	109,4	87,2	61,0	53,5	2,07	1,53	122,1	97,9
0,54	109,1	88,0	61,7	54,6	2,00	1,49	123,2	98,3
0,58	109,4	89,1	62,3	55,8	1,96	1,48	124,7	98,9
Regressão								
Linear	0,658	<,001	<,001	<,001	<,001	0,001	<,001	0,057
Quadrática	0,909	0,430	0,005	0,047	0,004	0,782	0,430	0,877
Interação								
Fonte x Nível	0,009	0,797	0,040	0,345	0,325	0,307	0,797	0,824
S.E.M	2,25	2,26	0,77	1,61	0,06	0,06	3,76	2,52

Médias na mesma coluna com letras diferentes diferem significativamente com o teste T ( $p < 0,05$ ). Equações de regressão dos níveis: (PRO:  $\hat{Y} = 32,5x + 70,45$ .  $R^2 = 0,94$ ); (MO:  $\hat{Y} = 262,5x^2 + 314,95x - 38,574$ .  $R^2 = 0,98$ . ponto de máximo: 0,59 %); (CRMO:  $\hat{Y} = 9,375x^2 - 11,5x + 5,4762$ .  $R^2 = 1$ . Ponto de máximo: 0,62 %); (CRDO:  $y = -0,625x + 1,8375$ .  $R^2 = 0,95$ ); (OAA:  $y = 45,525x + 98,615$ .  $R^2 = 0,94$ ).

Na tabela 4, a interação entre a fonte e o nível de Met+Cys evidenciou que, no maior nível (0,58 %), as aves alimentadas com DLM apresentaram maior consumo de ração que aquelas alimentadas com HMBA-Ca. Para PO, houve diferença entre as fontes apenas no nível 0,46 %, no qual a DLM resultou em ovos com maior peso. As equações de regressão indicam resposta quadrática para PO com HMBA-Ca e resposta linear com DLM, sendo o ponto de máxima para HMBA-Ca estimado em 0,59 %. A bioeficácia relativa da HMBA-Ca em relação a DLM foi: 99 e 97 % para PRO e PO com base no intervalo de confiança de 95 %.

**Tabela 4.** Efeito da interação entre a HMBA-Ca em relação a DLM e dos níveis de Met+Cys sobre o consumo de ração (CR), e peso dos ovos (PO) de poedeiras leves de 42 a 62 semanas de idade.

Variável		Níveis (%)				P-value	
		0,46	0,50	0,54	0,58	Linear	Quadratico
CR (g/ave)	HMBA-ca	109,2	108,3	109,8	107,7 <sup>b</sup>	0,416	0,430
	DLM	108,7	110,6	108,3	111,2 <sup>a</sup>	0,152	0,529
	p-value	0,674	0,057	0,191	0,003		
PO (g)	HMBA-ca	58,8 <sup>b</sup>	60,8	61,9	62,6	<0,001	0,018
	DLM	59,7 <sup>a</sup>	61,6	61,5	62,0	<0,001	0,107
	p-value	0,032	0,401	0,250	0,173		

Equação de regressão: HMBA-Ca = (POV:  $\hat{Y} = -214,06x^2 + 254,05x - 12,713$ .  $R^2 = 0,99$ . Ponto máximo: 0,59 %; DLM: (POV:  $\hat{Y} = 17,675x + 52,036$ .  $R^2 = 0,75$ . Disponibilidade: CR:  $y = 44,85 + 27,31 * (1 - e^{-(0,75x + 1,76x^2 + 1,75x^3)})$  e PO:  $y = 68,88 + 26,90 * (1 - e^{-(1,21x + 2,26x^2 + 2,21x^3)})$ ).



### 3.2 Qualidade de ovos

Na tabela 5, observou-se efeito significativo da fonte de metionina sobre o índice relativo de gema (IRG), o peso relativo da gema (PRG) e o peso relativo do albúmen (PRA). A DLM resultou maior IRG e PRA, enquanto a HMBA-Ca apresentou maior PRG. Verificou-se efeito linear positivo para PRG e gravidade específica (GE) e efeito linear negativo para peso relativo de casca (PRC) e espessura de casca (EC). Efeitos quadráticos foram observados para IRG (ponto máximo estimado em 0,52 %) e PRG. A bioeficácia relativa da HMBA-Ca em relação a DLM foi: 55, 114, 108 %, respectivamente para IRG, PRG e GE com base no intervalo de confiança de 95 %.

**Tabela 5.** Efeitos das fontes, dos diferentes níveis de metionina e da interação entre HMBA-Ca e DL-Metionina no índice relativo da gema (IRG), peso relativo da gema (PRG), peso relativo do albúmen (PRA), peso relativo da casca (PRC), unidade Haugh (UH), gravidade específica (GE), espessura da casca (EC) e resistência da casca (RC) de poedeiras leves.

Fonte	IRG (%)	PRG (%)	PRA (%)	PRC (%)	UH	GE (g/cm <sup>3</sup> )	EC (μm)	RC (kgf)
HMBA-Ca	0,385 <sup>b</sup>	26,0 <sup>a</sup>	61,6 <sup>b</sup>	10,1	83,8	1,090	0,468	3,59
DLM	0,415 <sup>a</sup>	25,8 <sup>b</sup>	61,9 <sup>a</sup>	10,1	84,0	1,089	0,467	3,58
p-value	<0,001	0,040	0,041	0,282	0,344	0,282	0,539	0,822
Níveis (%)								
0,46	0,406	25,7	62,0	10,2	84,0	1,091	0,470	3,65
0,50	0,392	25,9	61,7	10,1	83,7	1,091	0,467	3,67
0,54	0,394	26,2	61,7	10,0	83,7	1,088	0,468	3,51
0,58	0,409	26,0	61,7	10,0	84,1	1,088	0,465	3,52
Regressão Linear	0,691	0,020	0,205	<0,001	0,679	0,004	0,049	0,058
	0,003	0,049	0,976	0,363	0,093	0,756	0,877	0,947
Interação Fonte x nível	0,096	0,027	0,085	0,270	0,257	0,029	0,334	0,165
S.E.M	0,02	0,45	0,50	0,16	0,83	0,003	0,01	0,24

Médias na mesma coluna com letras diferentes diferem significativamente com o teste T ( $p < 0,05$ ). Equação de regressão: IRG:  $= 4,5312x^2 - 4,685x + 1,6021$ .  $R^2 = 0,99$ . Ponto máximo: 0,52; Disponibilidade: IRG:  $\hat{Y} = 0,32 + 0,16 \cdot (1 - e^{-(1,65x + 1,67x^2 + 0,93x^3)})$ ; PRG:  $23,10 + 5,01 \cdot (1 - e^{-(1,20x + 1,55x^2 + 1,77x^3)})$ ; GE:  $1,90 + 0,00 \cdot (1 - e^{-(1,59x + 1,38x^2 + 1,50x^3)})$ .

Houve interação ( $p < 0,05$ ) entre as fontes e a nível para PRG e GE. A HMBA-Ca apresentou maior PRG ao nível 0,58, enquanto a DLM teve a melhor GE ao nível de 0,50 %. A suplementação com os níveis de metionina aumentou a PRG linearmente na fonte HMBA-Ca. O nível de 0,52 % estimado como ponto máximo na fonte HMBA-Ca.

**Tabela 6.** Efeito da interação entre a HMBA-Ca em relação a DLM e dos níveis de Met+Cys sobre o peso relativo da gema (PRG) e gravidade específica (GE) e unidade de haug (UH) poedeiras leves de 42 a 62 semanas.

		Níveis (%)				P-value	
		0,46	0,50	0,54	0,58	Linear	Quadratico
PRG (%)	HMBA-ca	25,7	25,8	26,3	26,2 <sup>a</sup>	0,012	0,573
	DLM	25,6	25,9	26,0	25,7 <sup>b</sup>	0,603	0,054
	p-value	0,521	0,764	0,208	0,025		
GE (g/cm <sup>3</sup> )	HMBA-ca	1,090	1,093 <sup>b</sup>	1,089	1,087	0,031	0,045
	DLM	1,092	1,088 <sup>a</sup>	1,088	1,088	0,054	0,115
	p-value	0,317	0,003	0,513	0,628		

Equação de regressão: HMBA-Ca: GE:  $\hat{Y} = -0,7969x^2 + 0,798x + 0,8923$ .  $R^2 = 0,85$ . ponto de máxima: 0,52 %.



### 3.3 Escore de plumagem

A análise das probabilidades de ocorrência das categorias de escore corporal indicou predominância de aves com boa cobertura de plumagem em praticamente todas as combinações avaliadas. As categorias “dano grave” não foram registradas. A categoria “moderado” ocorreu em menor frequência relativa, com variações entre os diferentes tratamentos. A probabilidade de ocorrência da categoria “Boa cobertura” manteve-se próxima de 1,0 na maioria das combinações avaliadas, evidenciando a consistência dos escores elevados ( $\geq 18$  pontos) registrados durante as avaliações. A fonte HMBA-Ca apresentou desempenho superior para “Boa cobertura” em comparação a DLM (Tabela 7).

**Tabela 7.** Probabilidade relativa de ocorrência das categorias de escore de corpo (Boa cobertura e Moderado) para cada combinação de tratamento, nível e fonte.

Níveis (%)	Fonte	Condição de Plumagem	Probabilidade
0,46	HMBA-Ca	Boa cobertura	0,75
0,46	HMBA-Ca	Moderado	0,25
0,50	HMBA-Ca	Boa cobertura	0,75
0,50	HMBA-Ca	Moderado	0,25
0,54	HMBA-Ca	Boa cobertura	0,58
0,54	HMBA-Ca	Moderado	0,41
0,58	HMBA-Ca	Boa cobertura	0,83
0,58	HMBA-Ca	Moderado	0,16
0,46	DLM	Boa cobertura	0,75
0,46	DLM	Moderado	0,25
0,50	DLM	Boa cobertura	0,50
0,50	DLM	Moderado	0,50
0,54	DLM	Boa cobertura	0,75
0,54	DLM	Moderado	0,25
0,58	DLM	Boa cobertura	0,75
0,58	DLM	Moderado	0,25

Não foi observado dano grave nas fontes estudadas.

### 3.4 Avaliação econômica

As aves alimentadas com HMBA-Ca apresentaram os menores CT, RC, CDz, CKg e CC em relação à DLM. Contudo, ao nível de 0,58 % de Met ambas as fontes apresentaram o mesmo CKg. Houve menor IMC-Kg e IMC-CO e os melhores resultados na RBM, MBR e IML nas aves alimentadas com HMBA-Ca. Ao nível de 0,58 % de met causou os maiores custos, porém apresentaram a menor RBM e o maior IML.

**Tabela 8.** Efeitos das fontes e dos diferentes níveis de metionina entre HMBA-Ca e DL-Metionina no custo por tonelada de ração (CT), custo da ração (CR), custo da ração por dúzia de ovos (CDz), custo por caixa de ovos (CC), custo por quilograma de ovo (CKg), índice médio de custo por quilograma de ovo (IMC-Kg), índice médio de custo por caixa de ovos (IMC-CO), receita bruta média (RBM), margem bruta relativa (MBR) e índice médio de lucratividade (IML) de poedeiras leves.

Fonte	CT U\$	CR U\$	CDz U\$	CC U\$	Ckg U\$	IMC-Kg (%)	IMC-CO (%)	RBM (%)	MBR U\$	IML (%)
HMBA-Ca	386,8	5,89	0,579	0,006	0,020	108,9	102,9	83,7	59,0	100
DLM	387,6	5,95	0,583	0,007	0,021	110,7	104,0	83,4	58,8	102,7
Níveis (%)										
HMBA /0,46	385,6	5,90	0,59	0,007	0,021	118,9	105,6	86,0	60,4	101,4
HMBA /0,50	386,5	5,86	0,58	0,006	0,020	109,0	102,6	84,4	59,4	97,7
HMBA /0,54	387,3	5,96	0,58	0,006	0,021	107,6	103,2	82,7	58,4	98,3
HMBA /0,58	388,0	5,85	0,56	0,006	0,020	100,0	100,0	81,7	57,6	103
DLM /0,46	387,0	5,89	0,59	0,007	0,021	117,8	106,2	86,2	60,5	97,3
DLM /0,50	386,8	5,99	0,58	0,007	0,021	110,7	104,2	82,8	58,4	99,3
DLM /0,54	387,8	5,88	0,57	0,006	0,020	106,2	102,3	83,0	58,5	94,9
DLM /0,58	388,7	6,05	0,58	0,006	0,021	108,1	103,2	81,6	57,8	100

## 4. Discussão

A metionina é o primeiro aminoácido limitante em dietas de poedeiras baseadas em dietas a base de milho e farelo de soja, sendo essencial sua suplementação para atender às exigências de manutenção, produção e qualidade do ovo<sup>(13)</sup>. Entre as fontes comerciais, a DLM e o HMBA-Ca apresentam mecanismos distintos de absorção e metabolização, que pode influenciar o desempenho, a eficiência de uso e os parâmetros produtivos das aves<sup>(14)</sup>.

Contrariando a expectativa de redução do consumo de ração com o aumento da suplementação, observou-se oscilação na ingestão, mostrando incremento nos níveis mais altos de Met+Cys, exceto para as aves alimentadas com HMBA-Ca a 0,58 % que representaram leve redução. A oscilação da ingestão em níveis mais altos, especialmente com a HMBA-Ca a 0,58 %, é compatível com retroalimentação aminostática. Um estudo recente reforçou que o excesso de aminoácidos pode alterar perfis plasmáticos, ativando sinais hipotalâmicos que reduzem o apetite, mas que esse efeito depende do balanço com outros aminoácidos essenciais e da taxa de absorção intestinal, o que explicaria as diferenças entre DLM e HMBA-Ca<sup>(15, 16)</sup>.

Neste estudo, o aumento dos níveis de Met+Cys digestíveis elevou a produção, peso e massa de ovos, melhorando a conversão alimentar por massa, em consonância com achados de Vázquez-Anón *et al.*<sup>(4)</sup> e Wu *et al.*<sup>(17)</sup>. O Efeito foi consistente em ambas as fontes, indicando que o suprimento adequado de metionina otimiza o aporte proteico e a síntese de compostos essenciais, como poliaminas, que estimulam proliferação celular e deposição de proteína no ovo. Xião *et al.*<sup>(18)</sup> e Ma *et al.*<sup>(19)</sup> confirmaram que a ingestão de metionina melhora a produção de ovos e a taxa de postura. Contudo, os resultados deste estudo indicaram que baixos níveis de suplementação afetam não apenas a produção de ovos, mas também a performance geral das aves.

A suplementação de Met+ Cys elevou o peso dos constituintes do ovo, ocorrido tanto pela síntese proteica intensificada, aumentando a estocagem de proteína no albúmen<sup>(20)</sup>. A suplementação de metionina aumentou o peso do ovo e intensificou a cor da gema, indicando maior deposição de lipídios. Embora o estudo não tenha abordado diretamente a disponibilidade de grupos metil, os resultados reforçam a ideia de que a metionina exerce influência significativa sobre a composição da gema do ovo<sup>(21)</sup>. Além de atuar como doadora de grupo metil e precursora de metabólitos essenciais, a metionina pode ser oxidada para produção de energia por via glicogênica<sup>(22)</sup>. Assim, quando fornecida em níveis acima das exigências do manual da linhagem, o excedente pode ser direcionado ao metabolismo energético, contribuindo para o aumento do desempenho das aves observado com a elevação da suplementação.

A redução da espessura e da gravidade específica da casca em ovos maiores é um fenômeno fisiológico esperado, decorrente da redistribuição do cálcio para atender ao aumento do volume do ovo, o que geralmente resulta em cascas relativamente mais finas. No entanto, este efeito não comprometeu a resistência mecânica, corroborando os achados de Kodali *et al.*<sup>(23)</sup>. Observou-se ainda que, em alguns níveis de suplementação, a HMBA-Ca promoveu maior gravidade específica, possivelmente em razão do aporte adicional de cálcio (11,7 %) <sup>(24)</sup>, comportamento também relatado por Esteve-Garcia *et al.*<sup>(25)</sup>.

Os resultados do escore de plumagem evidenciaram que aves alimentadas com HMBA-Ca, principalmente nos níveis mais altos, apresentaram maior probabilidade (>0,95) de permanecer na categoria de “boa cobertura” (≥18 pontos), enquanto a categoria “dano grave” (<12 pontos) foi ausente

nas fontes. Isso indica que a fonte HMBA-Ca contribuiu para menor desgaste da plumagem ao longo do ciclo, reforçando a importância de adequada ingestão de metionina para síntese de cisteína que apresenta função importante na doação de enxofre a estrutura tridimensional das proteínas, especialmente a queratina, que constitui cerca de 90 % das penas das aves. Portanto, uma quantidade adequada de metionina promove penas resistente, flexíveis e de melhor qualidade <sup>(26)</sup>.

A bioeficácia relativa entre a DLM e HMBA-Ca variou conforme o nível de suplementação. Em níveis próximos à exigência, a DLM tendeu a favorecer respostas imediatas (peso de ovo), apresentando maior disponibilidade rápida. Isto está relacionado a sua absorção via transportadores dependentes de Na<sup>+</sup>, que elevam rapidamente as concentrações plasmáticas de metionina. Por outro lado, em níveis mais elevados (0,58 %), a HMBA-Ca, apresentou desempenho equivalente ou superior em parâmetros de qualidade, como maior proporção de gema e melhor manutenção da plumagem, efeito coerente com sua absorção, por ser predominantemente via transportadores de monocarboxilato (MCTs) e ácido láctico, é mais gradual e de maior retenção nos tecidos, o que pode favorecer tais parâmetros. Estudos recentes destacam que tais diferenças metabólicas entre as fontes, não apenas na cinética de absorção, mas também na ativação de vias centrais envolvidas na regulação energética, como mTOR, AMPK e NPY <sup>(26, 27)</sup>. Em síntese, quando a oferta de metionina deixa de ser limitante, a dinâmica de liberação e utilização entre as fontes passa a influenciar mais fortemente indicadores de qualidade do ovo e condição corporal, sem prejuízo ao desempenho produtivo.

A análise econômica revelou que a HMBA-Ca apresentou custo total de dieta ligeiramente inferior, e no nível de 0,58 % obteve o maior retorno por dólar investido, com 2,6 % mais produção em relação à DLM. Apesar da DLM mostrar ligeira vantagem em margem líquida média, a HMBA-Ca destacou-se no nível ótimo (0,58 %), combinando desempenho produtivo, manutenção de plumagem e maior índice médio de lucratividade (103 %). Por outro lado, o custo unitário por dúzia foi minimizado em níveis intermediários de suplementação, especificamente com HMBA-Ca a 0,50 % ou DLM a 0,54 %, refletindo maior eficiência de conversão de insumos em produto quando o objetivo é a redução de custo direto de produção. Nesse cenário, a DLM apresentou ligeira superioridade na margem líquida média, o que sugere que sua utilização pode ser economicamente mais estável em diferentes contextos de preço de insumos e produto.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que a escolha da fonte e do nível de metionina suplementada deve considerar o cenário econômico vigente: Em mercados com pressão de custos (ex.: preço elevado de insumos, margens reduzidas), a adoção de níveis intermediários (0,50–0,54 %) de qualquer fonte é mais apropriada. Em cenários de maior valorização do produto (preços altos de ovos), a utilização de HMBA-Ca a 0,58 % pode maximizar a lucratividade, justificando o custo unitário um pouco mais elevado. Assim, o uso estratégico das diferentes fontes permite otimizar tanto o custo de produção quanto a margem líquida, ajustando a suplementação de acordo com as condições de mercado e os objetivos econômicos do produtor.

Diante do discutido, ambas as fontes atenderam às exigências nutricionais das aves. Enquanto a DLM favoreceu respostas imediatas em níveis próximos à exigência mínima, a HMBA-Ca destacou-se em níveis mais elevados, favorecendo a qualidade de plumagem e o percentual de gema. Do ponto de vista econômico, níveis intermediários reduziram o custo por dúzia, porém a HMBA-Ca a 0,58 % de Met+Cys digestível apresentou maior margem líquida e retorno por dólar investido, mantendo a competitividade mesmo em cenários adversos de mercado.

## 5. Conclusão

A suplementação de HMBA-Ca a 0,58 % de Met+Cys digestível representa a alternativa mais vantajosa, conciliando desempenho produtivo, qualidade da plumagem e superior retorno econômico, sobretudo em cenários de mercado favoráveis.

### Declaração de conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

### Declaração de disponibilidade de dados

Os dados serão fornecidos mediante solicitação ao autor correspondente.

### Contribuições do autor

Conceituação: T.S. Ferreira. Curadoria de dados: T.S. Ferreira. Análise formal: T.S. Ferreira e I.N. Kaneko. Investigação: M.N. Soares. Metodologia: T.S. Ferreira. Gestão de projeto: M.N. Soares. Supervisão: F.G.P. Costa. Redação (rascunho original): T.S. Ferreira. Visualização: S.G. Pinheiro e R.F.B. Júnior. Redação (Revisão e edição): M.N. Soares, S.G. Pinheiro e R.F.B. Júnior.

### Referências

1. Marcelline SP, Toghyani M, Chrystal PV, Selle PH, Liu SY. Amino acid requirements for laying hens: a comprehensive review. *Poultry Science*. 2021; 100:101036. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101036>
2. Guangtian MA, Habtamu A, Tahir, M, Yves M, Jing W, Jing L, Shugeng W, Kai Q, Haijun Z. Methionine and vitamin E supplementation improve production performance, antioxidante potential, and liver health in aged laying hens. *Poultry Science*. 2024; 103: 104415. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104415>
3. Zhou H, Yuan Z, Chen D, Wang H, Shu Y, Gao J, Htoo JK, Yu B. Bioavailability of the dl-methionine and the calcium salt of dl-methionine hydroxy analog compared with l-methionine for nitrogen retention in starter pigs. *J Anim Sci*. 2021. 6. doi: <https://doi.org/10.1093/jas/skab151>
4. Vázquez-Añón M, Bertin G, Mercier Y, Reznik G, Robertson JL. Review of the chemistry, metabolism, and dose response of two supplemental methionine sources and the implications in their relative bioefficacy. *Poultry Science Journal*. 2017; 73: 725-736. doi: <https://doi.org/10.1017/S0043933917000551>
5. Fickler J, Heimbeck W, Hess V, Reimann I, Reising J, Wiltafsky M, Zimmer U. AMINO Dat 5.0. Animal Nutritionist's Information Edge. 2016. July 09. [https://www.academia.edu/38777571/AMINODat\\_5.0\\_-\\_The\\_animal\\_nutritionists\\_information\\_edge](https://www.academia.edu/38777571/AMINODat_5.0_-_The_animal_nutritionists_information_edge)
6. Card LE, Nesheim, MC. Producción Avícola. Zaragoza: Acribia. 1968.
7. Hamilton RMG. "Methods and factors that affect the measurement of egg shell quality". *Poultry Science*. 1982; 61: 2022-2039. <https://doi.org/doi:10.3382/ps.0612022>
8. Tauson R, Kjaer J, Maria GA, Cepero R, Holm K. Applied scoring of integument and health in laying hens. *Applied Scoring of Integument and Health in Laying Hens. Animal Science Papers and Reports*. 2006; 23: 153-159.
9. Barbosa HP, Fialho ET, Ferreira ASG, Lima JMM, Gomes MFM. Triguilho para suínos nas fases inicial de crescimento, crescimento e terminação". *Revista Sociedade Brasileira Zootecnia*. 1992; 21: 827-837.
10. Costa FGP, Goulart CDEC, Costa JS, Souza CJDE, Barros LR, Silva JHV. Desempenho, qualidade de ovos e análise econômica da produção de poedeiras semipesadas alimentadas com diferentes níveis de raspa de mandioca. *Acta Scientiarum Acta Sciences*. 2009; 31: 13-18. doi: <https://doi.org/10.4025/actascianims.v31i1.457>
11. Agresti A. Na introduction to categorical data analysis. Jonh Wiley and Sons: New York. 2007.
12. Littell RC, Henry PR, Lewis AJ, Ammerman CB. Estimation of relative bioavailability of nutrients using SAS procedures. *Journal Animal Science*. 1997; 75: 2672-2683. doi: <https://doi.org/10.2527/1997.75102672x>
13. Daryoush B, Pouria AS. Methionine in Poultry Nutrition: A Review. *Journal of World's Poultry Science*. 2022; 1: 1-11. doi: <https://doi.org/10.58803/jwps.v1i1.1>
14. Esteve-Garcia, E, Khan, DR, Relative Bioavailability of DL and L-Methionine in Broilers. *Open Journal of Animal Sciences*, 2018; 8: 151-162. doi: <https://doi.org/10.4236/ojas.2018.82011>
15. Niknafs S, Fortes MRS, Cho S, Black JL, Roura E. Alanine-specific appetite in slow growing chickens is associated with impaired glucose transport and TCA cycle. *BMC Genomics*. 2022; 23:393. doi: <https://doi.org/10.1186/s12864-022-08625-2>
16. Heeley N, Blouet C. Central Amino Acid Sensing in the Control of Feeding Behavior. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2016; 23:148. doi: <https://doi.org/10.3389/fendo.2016.00148>

17. Wu Y, Tang J, Cao J, Zhang B, Chen Y, Xie M, Zhou Z, Hou S. Effect of Dietary L-Methionine Supplementation on Growth Performance, Carcass Traits, and Plasma Parameters of Starter Pekin Ducks at Different Dietary Energy Levels. *Animals*. 2021; 11: 144. doi: <https://doi.org/10.3390/ani11010144>
18. Xiǎo X, Wang Y, Liu W, Ju T, Zhan X. Effects of different methionine sources on production and reproduction performance, egg quality and serum biochemical indices of broiler breeders. *Asiático-Australas Journal Animal Science*. 2017; 30: 828-833. doi: <https://doi.org/10.5713%2Fajas.16.0404>
19. Ma M, Geng S, Liu M, Zhao L, Zhang J, Huang S, Ma Q. Effects of Different Methionine Levels in Low Protein Diets on Production Performance, Reproductive System, Metabolism, and Gut Microbiota in Laying Hens. *Front. Nutr.* 2021; 8. doi: <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.739676>
20. Hiramoto K, Muramatsu T, Okumura J. Effect of Methionine and Lysine Deficiencies on Protein Synthesis in the Liver and Oviduct and in the Whole Body of Laying Hens. *Poultry Science*. 1990; 69: 84-89. doi: <https://doi.org/10.3382/ps.0690084>
21. Ma G, Ayalew H, Mahmood T, Mercier Y, Wang J, Lin J, Wu S, Qiu K, Qi G, Zhang H. Methionine and vitamin E supplementation improve production performance, antioxidant potential, and liver health in aged laying hens. *Poultry Science*. 2024; 103 (12): 104415. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104415>
22. Nelson DL, Cox MM. *Princípios de bioquímica de Lehninger*. Artmed, Porto Alegre. 2019.
23. Kodali VK, Gannon AS, Paramasivan S, Raje S, Polenova T, Thorpe C. A Novel Disulfide-Rich Protein Motif from Avian Eggshell Membranes". *Plosone*. 2011; 6: e18187. doi: <https://doi.org/10.1371%2Fjournal.pone.0018187>
24. EFSA. Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP). Scientific Opinion on the safety and efficacy of calcium hydroxy analogue of methionine (HMBA-Ca) as a feed additive for poultry. *EFSA Journal*. 2012; 10(3): 2610. doi: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2610>
25. Esteve-Garcia E, Khan DR. Relative Bioavailability of DL and L-Methionine in Broiles. 2018; 8: 151-162. doi: <https://doi.org/10.4236/ojas.2018.82011>
26. Martín-Venegas RM, Rodríguez-Lagunas MJ, Geraert P, Ferrer R. Monocarboxylate transporter 1 mediates DL-2-hydroxy-(4-methylthio) butanoic acid transport across the apical membrane of Caco-2 cell monolayers. *Journal Nutrition*. 2017; 137: 49-54. doi: <https://doi.org/10.1093/jn/137.1.49>
27. Maynard CW, Gilbert E, Yan F, Cline MA, Dridi, S. Peripheral and Central Impact of Methionine Source and Level on Growth Performance, Circulating Methionine Levels and Metabolism in Broiler Chickens. *Animals*. 2023; 13(12), 1961. doi: <https://doi.org/10.3390/ani13121961>