



EFICIÊNCIA ALIMENTAR EM OVINOS

Um animal eficiente, do ponto de vista alimentar, come menos e emite menos metano que outros com o mesmo nível produtivo, sem que a sua saúde seja afetada. Assim, melhorar a eficiência alimentar pode levar a uma redução dos custos de produção e a um menor impacto ambiental, maximizando a sustentabilidade da atividade pecuária.

Maria do Rosário Marques

Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária



Introdução

A produção de ovinos é um setor de grande relevância na bacia do Mediterrâneo, não só pela sua contribuição económica, mas também pela sua profunda ligação social e cultural às comunidades rurais. Os ovinos são maioritariamente explorados em pastoreio. Bem-adaptados, devido às suas características biológicas únicas, aproveitam as áreas menos favorecidas^[1], dando origem a produtos de elevada qualidade nutricional e organolética e ainda a serviços do ecossistema, contribuindo para a preservação dos mesmos e a manutenção da biodiversidade.

A sustentabilidade dos sistemas de produção de pequenos ruminantes enfrenta desafios crescentes. A variabilidade climática, manifestada em períodos de seca mais prolongados e chuvas irregulares, afeta diretamente a disponibilidade e a qualidade das pastagens^[2] e cria condições favoráveis a várias doenças, algumas de origem parasitária^[3, 4]. A pressão para reduzir o impacto ambiental da pecuária, particularmente as emissões de gases com efeito de estufa, como o metano entérico, é cada vez maior^[5]. Paralelamente, a rentabilidade das explorações exige uma otimização contínua da utilização dos recursos. Neste contexto, é fundamental

melhorar a eficiência alimentar, i.e., a capacidade dos animais de converterem o alimento em produto da forma mais eficaz possível. Esta otimização não só reduz os custos de produção e a dependência de alimentos externos, mas também minimiza a pegada ecológica da produção ovina^[6].

1. Eficiência alimentar

A eficiência alimentar é uma medida crucial na produção animal, refletindo a capacidade de um animal converter os alimentos em leite, carne ou lã. É uma característica complexa que descreve quão bem o animal utiliza a energia dos alimentos para a produção e pode ser avaliada através de vários parâmetros (exemplos na Tabela 1), sendo o mais utilizado atualmente a ingestão alimentar residual (RFI, do inglês *Residual Feed Intake*), devido à sua independência face ao nível de produção. A RFI é definida como a diferença entre a ingestão real e a ingestão prevista de um animal com base nas suas necessidades de manutenção e produção, corrigidas em função do peso corporal – ou seja, quão eficientemente a energia bruta (EB) de um alimento é convertida em energia líquida (EL; ver Figura 1). Um animal é mais eficiente quanto menor a sua RFI e vice-versa. Assim, animais com RFI mais bai-

Tabela 1 – Definição de parâmetros indicadores da eficiência alimentar

Parâmetro	Fórmula	Definição
Índice de conversão alimentar (FCR; kg MS/kg)	$\frac{IMS}{GMD}$	Quantidade de alimento consumido dividida pelo GMD (ou leite produzido). Valores mais baixos são favoráveis.
Taxa de crescimento relativo (RGR; kg PV/dia)	$100 \times \left[\frac{(\log PV_f - \log PV_i)}{(\text{Duração do teste})} \right]$	Potencial de crescimento em relação ao grau de maturidade. Valores mais elevados são favoráveis.
Rácio de Kleiber (KR; g ganho/kg PV ^{0,75})	$100 \times \left[\frac{GMD}{PV^{0,75}} \right]$	GMD, em gramas, proporcional a cada quilograma de PV ^{0,75} . Valores mais elevados são favoráveis.
Ingestão alimentar residual (RFI; kg DM/dia)	$IMS - IMS_e$	Diferença entre o IMS observado e estimado, para um determinado nível produtivo, com base no PV ^{0,75} . Os valores mais baixos são favoráveis.
Ganho de peso residual (RWG; kg ganho/dia)	$GMD - GMD_e$	Diferença entre o GMD observado e o estimado com base no IMS e no PV ^{0,75} . Valores mais altos são favoráveis.
Consumo residual e ganho de peso vivo (RIG)	$RWG + [(-1) \times RFI]$	Índice simples que inclui RFI e RWG cuja variância é ajustada a 1. Valores mais elevados são favoráveis.

MS – Matéria seca; GMD – Ganho médio diário; IMS – Ingestão de matéria seca; PV – Peso vivo; PV_f – PV final; PV_i – PV inicial; PV^{0,75} – PV metabólico; IMS_e – IMS estimada; GMD_e – GMD estimado. Adaptado de Lima et al.^[7]

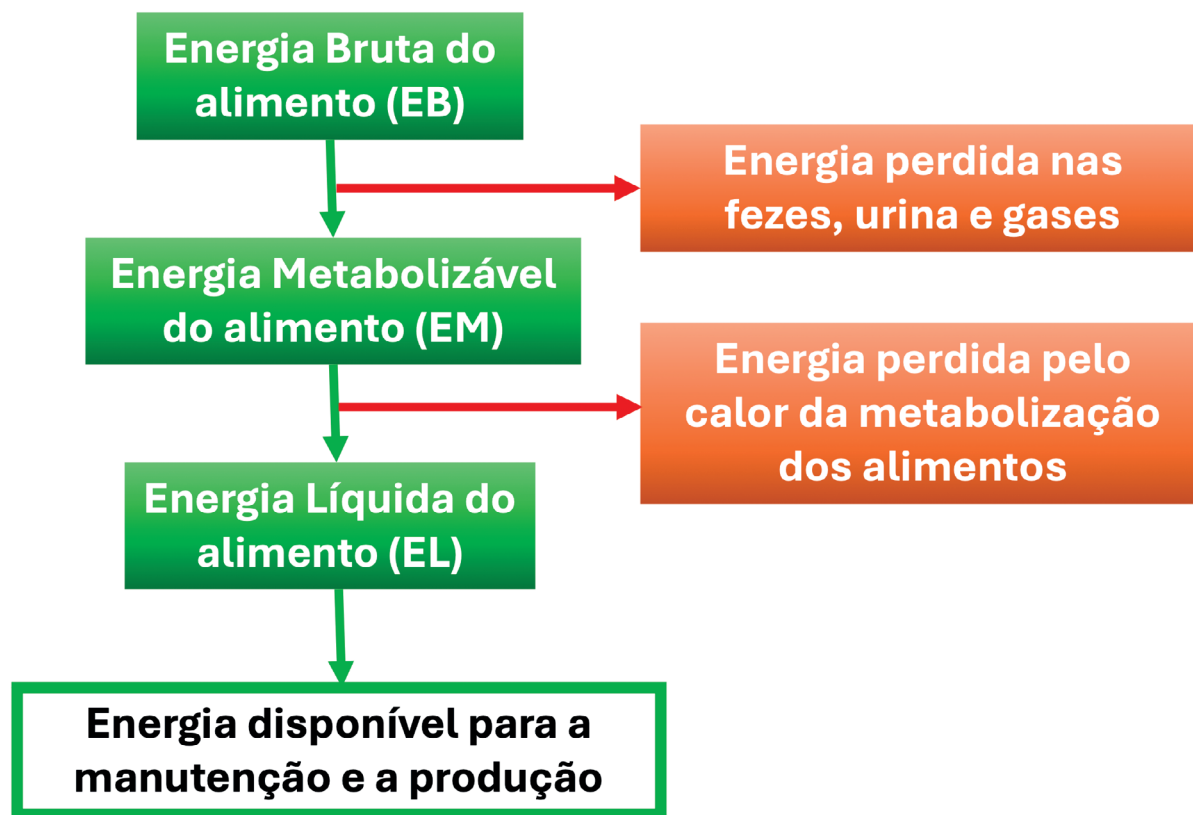


Figura 1 – Esquema simplificado do fluxo de energia no animal, desde a energia bruta ingerida com a alimentação até à sua utilização final na manutenção e produção.

xa consomem menos alimento do que o previsto e produzem menos resíduos, isto sem comprometer a produtividade, o peso corporal ou a saúde.

2. Fatores que influenciam a eficiência alimentar

A variabilidade na eficiência alimentar encontrada entre animais, influenciada por uma complexa interação entre vários processos, pode dever-se a diferenças: fisiológicas associadas à ingestão/digestão do alimento [eficiência digestiva (conversão de alimento em nutrientes)]; metabólicas [eficiência metabólica (conversão de nutrientes em produtos)]; do microbioma ruminal; da atividade física e termorregulação; e genéticas (Figura 2).

2.1. Metabolismo e fisiologia

A identificação de marcadores fisiológicos e metabólicos (Tabela 2) é uma via promissora para prever a eficiência alimentar de forma menos invasiva.

2.1.1. Marcadores hematológicos

O perfil hematológico refere-se aos componentes celulares do sangue, como glóbulos vermelhos (eritrócitos), glóbulos brancos (leucócitos) e plaquetas. Estudos têm mostrado que estes parâmetros podem estar relacionados com o RFI.

Ovelhas e carneiros da raça Rambouillet com menor eficiência alimentar (RFI positivo) apresentaram um maior número de glóbulos vermelhos (eritrócitos; RBC) e menos hemoglobina corpuscular média (HCM)^[8]. Diferenças na contagem de RBC podem refletir variações na capacidade de transporte de oxigénio, que é um fator-chave no metabolismo energético. Carneiros com RFI positivo tiveram mais glóbulos brancos (leucócitos; WBC); enquanto animais mais eficientes (RFI negativo) apresentavam uma maior proporção de eosinófilos e uma menor percentagem de monócitos^[8]. Estas variações podem sugerir diferenças na resposta imunitária e no estado inflamatório dos animais.



Figura 2 – Fatores que influenciam a eficiência alimentar.

Um sistema imunitário hiperativo ou um estado inflamatório crônico podem desviar energia do crescimento e da produção, diminuindo a eficiência alimentar.

2.1.2. Marcadores metabólicos

O perfil metabólico do sangue, que inclui diversas moléculas resultantes do metabolismo dos nutrientes, fornece uma janela para os processos bioquímicos que ocorrem no corpo do animal.

Animais mais eficientes (menor RFI) tendem a apresentar menores concentrações séricas de proteína total e globulinas, e, em alguns casos, menores níveis de albumina^[8,9], o que pode indicar um metabolismo proteico mais eficiente, com menor *turnover* das proteínas ou menor degradação, resultando

numa melhor utilização dos aminoácidos para a síntese proteica.

Os níveis de ureia no sangue e no leite são um indicador do metabolismo proteico e da função renal. Animais mais eficientes tendem a ter níveis mais baixos de ureia sérica^[8,9], o que pode ser consistente com um menor catabolismo de proteínas. A creatinina, relacionada com o metabolismo muscular, tende a ser mais elevada em animais mais eficientes, refletindo um melhor desenvolvimento muscular e renovação proteica. Já o ácido hipúrico, associado à atividade microbiana intestinal e ao metabolismo energético, também varia de acordo com a eficiência alimentar^[12].

A glucose é a principal fonte de energia e o seu metabolismo é central para a eficiência. Ovelhas e car-

Tabela 2 – Componentes do soro sanguíneo associados à RFI em ovinos

Biomarcador	Classificação do biomarcador	Referência
Glóbulos vermelhos, glóbulos brancos	Parâmetros hematológicos e bioquímicos	[8]
Volume corpuscular médio, hemoglobina corpuscular média, eosinófilos, monócitos	Parâmetros hematológicos e bioquímicos	[8, 9]
Tiroxina (T4), hormona adrenocorticotrófica (ACTH), cortisol	Hormonas	[10, 11]
Albumina, creatinina, proteína plasmática total, glucose, ácido hipúrico	Metabólitos	[8, 9]

Adaptado de Goldansaz et al.^[82]

neiros com RFI positivo (menos eficientes) registraram níveis mais elevados de glucose no sangue^[8], o que parece indicar que animais menos eficientes podem ter um maior *turnover* de glucose ou uma menor eficiência na sua utilização. Em relação aos lipídios, algumas associações com triglicerídeos e HDL (lipoproteínas de alta densidade) foram reportadas pelos mesmos autores, sugerindo que o metabolismo lipídico pode estar envolvido nas diferenças de eficiência alimentar.

As adaptações metabólicas a exigências energéticas elevadas, como a lactação, conduzem à mobilização de lipídios, a qual poderá ser mais acentuada em ovelhas com menor eficiência alimentar^[13]. Este fenómeno é apoiado pelo menor ganho de peso corporal das ovelhas ao longo da lactação e pelo menor rácio entre ácidos gordos sintetizados *de novo* do leite e o cis-9 18:1, um potencial indicador de deficiência energética e mobilização de gordura corporal^[14].

Animais menos eficientes apresentaram níveis mais elevados de enzimas como a aspartato aminotransferase (AST), um marcador de deterioração hepática e muscular^[8], o que pode indicar uma maior atividade metabólica ou stress a nível hepático.

2.1.3. Composição corporal e as respostas endócrinas

Animais mais eficientes apresentam melhor absorção e utilização de nutrientes no intestino, com maior atividade enzimática e expressão de transportadores de nutrientes^[15]. Distribuem a energia de forma mais eficaz entre manutenção, crescimento e produção, com menores exigências energéticas de base. Níveis ótimos de hormonas tiroideias, que controlam o metabolismo energético, são cruciais para a eficiência na utilização de nutrientes; desequilíbrios podem levar a um metabolismo menos eficiente, aumentando o RFI, como revisto por Todini^[16], que descreve os efeitos de fatores endógenos, ambientais e nutricionais nas hormonas tiroideias em pequenos ruminantes.

A renovação proteica, especialmente no músculo esquelético, influencia o gasto energético total, sendo afetada pelas concentrações de aminoácidos

no plasma. A regulação hormonal, com destaque para a regulação da expressão de genes como a insulina, o Fator de Crescimento Semelhante à Insulina tipo 1 (IGF-1) e a leptina, modulam o metabolismo e o aproveitamento dos nutrientes^[16], direcionando-os para a produção (e.g., de leite no início da lactação) e promovendo a mobilização das reservas corporais, com aumento dos níveis de ácidos gordos (AG) não esterificados (AGNE) em fases energeticamente mais exigentes, como se observou em ovelhas em pastoreio (Belo *et al.*, 2018; Marques *et al.*, 2024).

A eficiência alimentar e a composição corporal estão relacionadas com a resposta do cortisol à hormona adrenocorticotrófica (ACTH) e à hipoglicemia induzida pela insulina^[11]. Isto indica que a regulação hormonal do stress e do metabolismo energético pode influenciar diretamente a eficiência com que um animal converte alimento em produto. De forma complementar, Zhang *et al.*^[10] associaram o RFI em borregos em crescimento ao ganho médio diário (GMD), desempenho ao abate, metabolismo sanguíneo e composição corporal, reforçando a ideia de que animais eficientes podem exibir características distintas na alocação de nutrientes e no desenvolvimento corporal.

2.1.4. Mecanismos moleculares:

desvendar a eficiência ao nível do metaboloma

Os avanços nas abordagens “ómicas” têm permitido uma compreensão mais profunda dos mecanismos moleculares subjacentes à eficiência alimentar, especialmente em ovelhas leiteiras. A metabolómica, que estuda o conjunto de metabolitos presentes num organismo ou tecido, tem sido uma ferramenta poderosa. Toral *et al.*^[19] investigaram a metabolómica do plasma e do leite em ovelhas lactantes com diferentes níveis de eficiência alimentar. Os seus resultados fornecem um panorama das diferenças metabólicas que distinguem estes grupos de animais. Numa aplicação mais direta, Marina *et al.*^[20] investigaram especificamente metabolitos do leite como biomarcadores para prever a eficiência alimentar em ovelhas leiteiras. Foram identificados 41 metabolitos relevantes associados com o RFI

(e.g., d-eritrose 4-fosfato, d-frutose 6-fosfato, ribose 5-fosfato) e 26 com o FCR (NADP⁺, fitoesfingosina, esfingosina, e3-desidroesfinganina), a maioria dos quais estão relacionados com as vias metabólicas da glucólise, glicogénese, metabolismo de galactose, frutose, esfingolipídios, aminoácidos, insulina e hormonas da tiroide, que estão envolvidos na regulação da eficiência alimentar em ovelhas. Isto demonstra o potencial de identificar indicadores não invasivos que podem ser usados para a seleção de animais mais eficientes.

A combinação destas abordagens, incluindo a análise da microbiota ruminal, como demonstrado por Zhou *et al.*^[21], que usaram multiómicas para desvendar o mecanismo da eficiência alimentar em ovinos pela ação combinada do hospedeiro e da microbiota, oferece uma compreensão holística de como a eficiência alimentar é orquestrada ao nível molecular. Yang *et al.*^[15] aprofundam esta perspetiva, investigando as diferenças no desempenho produtivo, na microbiota do trato digestivo anterior e nos níveis de expressão de transportadores de nutrientes em ovelhas Hu com diferentes taxas de conversão alimentar, reforçando a relação intrínseca entre a microecologia intestinal e a absorção de nutrientes. Em resumo, a investigação em ovinos está a avançar rapidamente, integrando o conhecimento de marcadores fisiológicos e metabólicos com as complexidades dos mecanismos moleculares para impulsionar a produção animal sustentável.

2.2. Microbioma do rúmen

Os microrganismos ruminais desempenham um papel crucial na conversão eficiente dos alimentos ao degradarem fibras vegetais complexas (como celulose e hemicelulose) em ácidos gordos voláteis (AGV), como acetato, propionato e butirato. Estes AGV são a principal fonte de energia absorvível pelos animais. Potenciar a degradação da fibra através de microrganismos específicos pode melhorar significativamente a eficiência de conversão alimentar nos ovinos. Xu *et al.*^[22] investigaram a relação entre a taxa de degradação das fibras no rúmen e microbiota ruminal na eficiência alimentar em borregos em engorda, tendo identificado géneros microbia-

nos específicos, principalmente *Firmicutes* e *Lachnospiraceae* (mas também géneros dos filos *Bacteroidetes* e *Actinobacteria*), que produzem enzimas como celulasas, promovendo uma digestão mais eficiente da fibra. A interação entre diferentes tipos de bactérias (degradadoras e não degradadoras de fibra) também contribui para um processo mais eficaz. Quanto maior a taxa de degradação da fibra, maior é a eficiência na conversão do alimento em ganho de peso vivo.

A relação simbiótica entre os ruminantes e a sua comunidade microbiana ruminal contribui para a digestão eficiente dos alimentos fibrosos, mas também para a produção de metano (CH₄). Devido à sua elevada atividade fermentativa, os protozoários ruminais produzem grandes quantidades de hidrogénio, o qual é utilizado pelas arqueias metanogénicas para a produção de CH₄^[23].

As arqueias metanogénicas desempenham um papel importante na eficiência alimentar dos ovinos ao influenciarem a utilização de energia no rúmen. McLoughlin *et al.*^[24], ao analisarem bactérias e arqueias no rúmen de ovinos com alta e baixa eficiência alimentar, verificaram que a composição da comunidade, a diversidade e a abundância relativa, especialmente nas arqueias metanogénicas do género *Methanobrevibacter*, diferiam entre grupos. Apesar das ligações entre a comunidade de protozoários ruminais e a metanogénese no rúmen ainda não serem totalmente compreendidas, as variações nas populações de arqueias podem explicar, em parte, as diferenças na forma como a energia é perdida sob a forma de CH₄, o que representa uma perda de energia para o animal e um problema ambiental. Com o objetivo de compreender melhor a influência da comunidade de protozoários ruminais nas emissões de metano, foi desenvolvido no INIAV o projeto PtzR'Methane (<https://projects.inia.pt/PtzRMethane/>), no qual foi analisada a relação entre diferentes géneros de protozoários e a produção de CH₄ *in vitro* em 54 borregos. Os resultados sugerem que a manipulação seletiva da composição dos protozoários ruminais, controlando as populações de *Isotricha* e *Entodinium* e favorecendo a densidade de *Epidinium* no rúmen, pode contribuir

para reduzir as emissões de CH₄ dos ruminantes^[23]. Compreender o papel da microbiota ruminal permite estratégias práticas para melhorar a produtividade nas explorações pecuárias:

- Probióticos direcionados: Uso de suplementos com microrganismos benéficos específicos.
- Formulação alimentar otimizada: Dietas que favoreçam o crescimento de bactérias eficazes na degradação da fibra.
- Seleção genética: Criar animais com perfis microbianos ruminais mais eficientes.

Estas abordagens podem aumentar a eficiência na utilização dos alimentos, reduzir custos com rações e melhorar o desempenho dos animais, promovendo sistemas de produção mais sustentáveis.

2.3. Genética

Avanços nas abordagens “ômicas” têm permitido uma compreensão mais profunda dos mecanismos moleculares subjacentes à eficiência alimentar, especialmente em ovelhas leiteiras. Através da análise do transcriptoma (o conjunto de todas as moléculas de ARN mensageiro) das células somáticas do leite de ovelhas leiteiras da raça Assaf, foram identificados vários genes expressos diferencialmente nas ovelhas com alta e baixa eficiência alimentar^[13]. Os genes que são expressos de maneira diferente nas ovelhas com alta (H-FE) e baixa (L-FE) eficiência alimentar estão principalmente relacionadas com processos como a divisão celular, a resposta imunitária, o metabolismo lipídico e o stress. Nas ovelhas H-FE, destacam-se funções associadas à divisão e proliferação celular, evidenciadas pela sobre-expressão de genes como KIF4Aⁱ e PRC1ⁱⁱ, envolvidos na formação do fuso mitótico e na regulação do ciclo celular. Estes processos são essenciais para o desenvolvimento e funcionamento da glândula mamária durante a lactação, podendo contribuir para uma maior produção de leite. Nas ovelhas L-FE, foi observada uma maior expressão de genes associados à resposta imunitária e ao stress, incluindo aqueles envolvidos na resposta aos lipídios, às citocinas e ao stress oxidativo (e.g., SESN2ⁱⁱⁱ). Estas funções sugerem que os animais menos eficientes podem gastar mais ener-

gia para funções de defesa e adaptação, o que pode comprometer a eficiência produtiva.

A mobilização lipídica favorece as respostas inflamatórias e o stress oxidativo^[25]. Estudos de ARN-Seq em ovinos^[26] e vacas leiteiras^[27] destacam a associação entre eficiência alimentar e metabolismo lipídico, inflamação e stress oxidativo, indicando que estes últimos processos podem aumentar as exigências de manutenção e, assim, reduzir a produção nos animais com baixa eficiência alimentar^[13]. Na glândula mamária foram ainda identificados genes associados com o metabolismo lipídico como marcadores importantes para distinguir entre ovelhas H-FE e L-FE, sugerindo uma relação direta entre a eficiência alimentar e a produção e composição do leite^[14]. No grupo H-FE, observaram-se níveis mais elevados de expressão de genes como os da LPL^{iv} envolvido na captação de AG pela glândula mamária e associado à manutenção da síntese de leite^[28]; da SCD^v responsável pela dessaturação de AG e cujos polimorfismos têm sido relacionados com a produção de leite e proteína em vacas leiteiras^[29]; do GPAM^{vi} que participa na síntese de triglicéridos^[30], no metabolismo lipídico e homeostase em ovinos^[31] e influencia a composição do leite em vacas leiteiras^[32]; e da ACOX3^{vii} envolvido na β-oxidação peroxissomal. Embora este último gene esteja geralmente associado a baixa eficiência alimentar noutros tecidos, como o fígado^[33], no estudo de Suárez-Veja *et al.*^[13] apresentou maior expressão nas ovelhas H-FE, sugerindo um papel potencialmente positivo no tecido mamário. Os resultados destacam o metabolismo lipídico na glândula mamária como um fator determinante para a eficiência alimentar em ovelhas leiteiras, com impacto direto na quantidade e qualidade do leite produzido, nomeadamente no teor de gordura e na concentração de certos AG no leite.

ⁱ KIF4A – Membro 4A da família de kinesinas

ⁱⁱ PRC1 – Regulador de proteína da citocinese 1

ⁱⁱⁱ SESN2 – Sestrina 2

^{iv} LPL – Lipoproteína lipase

^v SCD – Esteroil-CoA dessaturase

^{vi} GPAM – Glicerol-3-fosfato aciltransferase mitocondrial

^{vii} ACOX3 – Acil-CoA oxidase 3

Em conjunto, esses conhecimentos permitem aplicar uma abordagem de pecuária de precisão, integrando genética, nutrição e manejo para melhorar a eficiência alimentar e a produção leiteira em ovinos.

3. Parâmetros nutricionais e metabólicos para avaliação da eficiência alimentar

A melhoria da eficiência alimentar pode ser conseguida através da nutrição – manipulação do processo digestivo com recurso a aditivos alimentares; e/ ou da genética – seleção de animais mais eficientes. No INIAV, a investigação na área da alimentação de ovinos tem-se concentrado na valorização de recursos locais como as pastagens^[17, 18, 34], os arbustos mediterrânicos^[35–38], ou coprodutos da agroindústria^[39] e na modulação das fermentações ruminais^[40, 41], visando otimizar a eficiência alimentar e reduzir as emissões de metano.

A avaliação da eficiência alimentar dos ovinos é feita através da monitorização de um conjunto de parâmetros nutricionais e metabólicos sumariados na Tabela 3.

A monitorização dos parâmetros nutricionais e metabólicos, combinada com dados de produção (produção diária de leite, peso corporal, condição corporal) e o uso de ferramentas de agricultura de precisão permitirão ajustar as dietas em tempo real, maximizando a eficiência e garantindo a resiliência dos sistemas de produção vitais para a economia e ecologia do Mediterrâneo. 🌱

Bibliografia

As referências podem ser consultadas mediante a leitura do QRcode:



Tabela 3 – Parâmetros nutricionais e metabólicos para avaliação da eficiência alimentar	
Parâmetros	Função
Nutricionais	
Ingestão de matéria seca (IMS)	Avaliar a quantidade de alimento consumido e a sua relação com a produção
Digestibilidade	Determinar a proporção de nutrientes que é efetivamente absorvida pelo animal
Balanço de azoto	Compreender a eficiência da utilização da proteína na dieta e as perdas de azoto para o ambiente
Composição do leite	Conhecer os teores de gordura, proteína, lactose e sólidos totais, que refletem a qualidade nutricional do leite e a resposta metabólica da ovelha
Perfil de ácidos gordos do leite	Determinar o impacto do sistema de exploração (extensivo vs intensivo), do microbioma ruminal, ou da inclusão de certas fontes alimentares (e.g., subprodutos ricos em óleos), sobre o perfil de ácidos gordos e possíveis implicações para a saúde humana.
Metabólicos	
Concentrações de glucose e ácidos gordos não esterificados (AGNE) no plasma	Indicadores do estado energético do animal, especialmente relevantes em períodos de balanço energético negativo (e.g., pico de lactação)
Ureia no leite ou plasma	Refletem a eficiência da utilização da proteína e o balanço proteico no rúmen. Níveis elevados podem indicar excesso de proteína na dieta ou baixa eficiência de utilização
Parâmetros de fermentação ruminal	Incluindo pH ruminal, concentrações de ácidos gordos voláteis (AGV) e amónia ruminal, que fornecem informações diretas sobre a atividade microbiana no rúmen e a eficiência da digestão da fibra e proteína
Emissões de metano entérico	Medidas diretamente (e.g., com câmaras de respiração ou técnicas de SF6) ou estimadas, são cruciais para avaliar o impacto ambiental das dietas