

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

DARLAN SILVA DOS SANTOS

**SUBSTITUIÇÃO DO FARELO DE SOJA POR MILHO MOÍDO, UREIA E
SULFATO DE AMÔNIA EM DIETAS COM ALTA PROPORÇÃO DE PALMA
FORRAGEIRA PARA OVINOS**

RECIFE

2025

DARLAN SILVA DOS SANTOS

**SUBSTITUIÇÃO DO FARELO DE SOJA POR MILHO MOÍDO, UREIA E
SULFATO DE AMÔNIA EM DIETAS COM ALTA PROPORÇÃO DE PALMA
FORRAGEIRA PARA OVINOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação
em Zootecnia da Universidade Federal Rural de
Pernambuco para obtenção do título de Doutor
em Zootecnia

Área de concentração: Zootecnia

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo de Andrade Ferreira

Coorientadores:

Prof. Dr. Francisco Fernando Ramos de Carvalho

Prof. Dr. Robert Emilio Mora-Luna

**RECIFE
2025**



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**SUBSTITUIÇÃO DO FARELO DE SOJA POR MILHO MOÍDO, UREIA E
SULFATO DE AMÔNIA EM DIETAS COM ALTA PROPORÇÃO DE PALMA
FORRAGEIRA PARA OVINOS**

DARLAN SILVA DOS SANTOS

Aprovado em 13/05/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



MARCELO DE ANDRADE FERREIRA

Data: 07/07/2025 09:22:16-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Andrade Ferreira (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Documento assinado digitalmente



KELLY CRISTINA DOS SANTOS

Data: 27/06/2025 15:32:52-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a. Kelly Cristina dos Santos
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Documento assinado digitalmente



LUCIANA FELIZARDO PEREIRA SOARES

Data: 27/06/2025 11:33:48-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a. Luciana Felizado
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Pesquisadora.^a Dr.^a. Juana Catarina Cariri Chagas
At the Swedish University of Agricultural Sciences

Documento assinado digitalmente



STELA ANTAS URBANO

Data: 27/06/2025 11:20:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a. Stela Antas Urbano
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

À minha família, meu alicerce

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter traçado minha caminhada na Zootecnia segundo tudo que almejei e me mantido perseverante nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Maria Elta e Claudení, meus irmãos (Luan e Lucas, Camilla e Darlene), minha avó Ganira (*in memoria*), a minha tia Maria (*in memoria*), a meu tio Reginaldo (*in memoria*), por sempre terem apoiado minhas escolhas de diferentes maneiras e acreditado que eu poderia concretizar quaisquer planos.

Aos colegas da Zootecnia, serei eternamente grato por terem permanecido ao meu lado durante os meses mais críticos de experimento.

Aos tratadores e demais funcionários do Departamento de Zootecnia, por todo o trabalho, amizade e ajuda ao longo do experimento.

Aos professores do Departamento de Zootecnia, pelo incentivo na construção do conhecimento.

Ao meu orientador, Prof. Marcelo Ferreira, pela confiança em mim depositada para desenvolver este trabalho e pelos ensinamentos transmitidos.

Aos meus coorientadores, Prof. Dr Robert Emilio Mora-Luna e Prof. Dr Francisco Fernando Ramos de Carvalho pelos esclarecimentos, disponibilidade e ajuda concedida durante a execução dos trabalhos.

A UFRPE, pela oportunidade de cursar o doutorado, como também, por tudo que tem me proporcionado ao longo da pós-graduação.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, por ser esse apoiador e incentivador da pesquisa no país.

Muito obrigado a todos!

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1 – Substituição total do farelo de soja por uma mistura de milho moído, ureia e sulfato de amônio: ingestão de nutrientes, digestibilidade e dinâmica da fibra em ovinos alimentados com dietas ricas em palma forrageira

Tabela	Título	Página
1	Composição química dos ingredientes	44
2	Proporção dos ingredientes e composição química das dietas	44
3	Consumo de nutrientes, digestibilidade e comportamento ingestivo em função da substituição de farelo de soja por mistura de milho, ureia e sulfato de amônio (M-USA) na dieta de ovinos	48
4	Dinâmica ruminal em função da substituição de farelo de soja por mistura de milho, ureia e sulfato de amônio (M-USA) na dieta de ovinos	48

Capítulo 2 – O farelo de soja pode ser substituído por uma mistura de milho moído, ureia e sulfato de amônio para ovinos alimentados com dietas ricas em palma forrageira?

Tabela	Título	Página
1	Composição química dos ingredientes	61
2	Proporção dos ingredientes e composição química das dietas	61
3	Consumo de NDT, nitrogênio e balanço de nitrogênio em função da substituição do farelo de soja por mistura de milho, ureia e sulfato de amônio na dieta de ovinos	64
4	pH ruminal e concentração de nitrogênio amoniacal (N-NH ₃ , mg/dL) em função da substituição do farelo de soja por mistura de milho, ureia e sulfato de amônio na dieta de ovinos	64

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 2 – O farelo de soja pode ser substituído por uma mistura de milho moído, ureia e sulfato de amônio para ovinos alimentados com dietas ricas em palma forrageira?

Figura	Título	Página
1	Efeito da interação entre nível de substituição e horário sobre a concentração de nitrogênio amoniacal (N-NH ₃) em ovinos alimentados com substituição do farelo de soja por mistura de milho, ureia e sulfato de amônio (M-USA) nos níveis de 0,0; 250,0; 500,0; 750,0 e 1000,0 g/kg de matéria seca	65

SUMÁRIO

	Página
Lista de tabelas	vi
Lista de ilustrações	vii
Resumo Geral	x
Abstract	xii
Considerações iniciais	13
CAPÍTULO 1- REVISÃO DE LITERATURA	15
1.1 <i>Unreia</i>	16
1.2 <i>Ureia na nutrição de ruminantes</i>	17
1.3 <i>Metabolismo ruminal de nitrogênio</i>	18
1.4 <i>Sincronia ruminal entre energia e nitrogênio</i>	20
1.5 <i>Efeito dos níveis de ureia na dieta de ruminantes</i>	24
2. Referências bibliográficas	29
CAPÍTULO 2 - Substituição total do farelo de soja por uma mistura de milho moído, ureia e sulfato de amônia: ingestão de nutrientes, digestibilidade e dinâmica da fibra em ovinos alimentados com dietas ricas em palma forrageira	38
Resumo	39
Abstract	40
1. Introdução	41
2. Matéria e Métodos	42
2.1. <i>Local e licença para condução do estudo</i>	43
2.2. <i>Animais e instalações</i>	43
2.3. <i>Delineamento experimental</i>	43
2.4. <i>Dietas experimentais</i>	43
2.5. <i>Coleta de dados e amostragem</i>	44
2.6. <i>Composição química</i>	45
2.7 <i>Cálculo</i>	46
2.8 <i>Análise estatística</i>	47
3. Resultados	47
4. Discussão	49
5. Conclusão	51
6. Referência	51
CAPÍTULO 3 - O farelo de soja pode ser substituído por uma mistura de milho moído, ureia e sulfato de amônia para ovinos alimentadas com dietas ricas em palma forrageira?	55
Resumo	56
Abstract	57
Introdução	58
2. Material e Métodos	60
2.1. <i>Local e licença para condução do estudo</i>	60
2.2. <i>Animais e instalações</i>	60
2.3. <i>Delineamento experimental</i>	60
2.4. <i>Dietas experimentais</i>	60
2.5 <i>Consumo de nutrientes e balanço de nitrogênio</i>	62

2.6	<i>Coleta e processamento de urina e sangue</i>	62
2.7	<i>Parâmetros ruminais</i>	62
2.8	<i>Coleta de amostras, composição química e cálculos.....</i>	62
2.9	<i>Análise estatística</i>	63
3.	Resultados.....	63
	Discussão.....	65
5.	Conclusão	68
6.	Referência	68

RESUMO GERAL

Objetivou-se avaliar o efeito da substituição (0,0; 250,0; 500,0; 750,0 e 1000,0g/kg) do farelo de soja (FS) por milho moído, ureia e sulfato de amônio (M-USA) em dietas com alta proporção de palma forrageira sobre o consumo e a digestibilidade da matéria seca (MS) e dos nutrientes, comportamento ingestivo, dinâmica ruminal, balanço de nitrogênio, pH ruminal e nitrogênio amoniacal (N-NH_3). Cinco ovinos mestiços, não castrados e fistulados no rúmen foram distribuídos em quadrado latino 5×5 . A dieta continha 135g de proteína bruta (PB)/kg de MS, com volumoso composto de palma forrageira (500g/kg de MS) e bagaço de cana-de-açúcar (300g/kg de MS), em uma relação volumoso:concentrado de 80:20. Não houve efeito da substituição sobre os consumos de MS (1596g/dia), MS em % do peso corporal (3,52%), PB (230g/dia), fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e compostos nitrogenados (FDNcp;623 g/dia), nutrientes digestíveis totais (1087g/dia), energia metabolizável (3,9Mcal/dia) e digestibilidade da MS (719g/kg), PB (819g/kg), carboidratos não fibrosos (CNF;903g/kg) e FDNcp (454g/kg). Os tempos de alimentação (230 min/dia), ruminação (516min/dia), ócio (704min/dia) e as eficiências de alimentação da MS (457g/h) e da FDNcp(178g/h) e de ruminação da MS(189g/h) e da FDNcp(74g/h) não foram alterados com a substituição, assim como o pool ruminal de MS (664g), FDNcp (419g) e FDN indigestível (282g), taxa de ingestão (K_i ;0,102h⁻¹), taxa de passagem (K_p : 0,033h⁻¹), taxa de degradação (K_d ;0,070 h⁻¹) da MS e K_i (0,063h⁻¹), K_p (0,022h⁻¹), K_d (0,042h⁻¹) da FDNcp e K_p da FDN indigestível (0,382h⁻¹). O CNF aumentou linearmente. O nitrogênio (N) consumido (36,39g/dia), N urinário (14,4g/dia), N absorvido (30,4 g/dia), balanço de N (16,7g/dia), N ureico no plasma (16,61mg/dL) e N ureico urinário (10,29g/dia) não foram alterados. O N fecal diminuiu linearmente com a substituição. O pH ruminal (6,6) não foi alterado, mas variou quadraticamente com os horários de coleta, atingindo pH mínimo de 6,34 aos 5:29h. Houve interação para o N-NH_3 entre os níveis de substituição e os horários de coleta. No tempo 0h, a maior concentração de N-NH_3 (24,03mg/dL) foi observada no nível 0g/kg de MS. Após 2h da alimentação, todos os níveis apresentaram maiores concentrações, destacando-se o nível de 750g/kg de MS (42,88mg/dL). Aos 4 e 6h, o nível de 1000g/kg de MS apresentou as maiores concentrações (21,43 e 19,83mg/dL, respectivamente). Após 8h, a maior concentração (9,67mg/dL) foi observada na dieta com 500g/kg de MS. Conclui-se, que o FS pode ser totalmente substituído por M-USA, permitindo a inclusão total de até 2,7% de MS de ureia em dietas com alta proporção de palma forrageira, sem afetar o consumo e digestibilidade

da MS e dos nutrientes, comportamento ingestivo, dinâmica ruminal, balanço de nitrogênio, e pH e os níveis de NH_3 ruminal, dentro dos limites aceitáveis para ovinos.

Palavras-chave: Cactáceas. Concentrado. Nitrogênio não proteico. Semiárido. Eficiência do uso de nitrogênio. *Opuntia* sp.

GENERAL ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of replacing soybean meal (SM) with a mixture of ground corn, urea, and ammonium sulfate (M-USA) at levels of 0.0, 250.0, 500.0, 750.0, and 1,000.0 g/kg of dry matter (DM) in diets with a high proportion of cactus cladodes, on the intake and digestibility of DM and nutrients, ingestive behavior, ruminal dynamics, nitrogen balance, ruminal pH, and ammonia nitrogen (NH₃-N) concentration. Five rumen-fistulated, non-castrated crossbred sheep were assigned to a 5×5 Latin square design. Diets contained 135 g of crude protein (CP)/kg DM, with cactus cladodes (500 g/kg DM) and sugarcane bagasse (300 g/kg DM) as forage sources, resulting in a forage-to-concentrate ratio of 80:20. No effects were observed on DM intake (1,596 g/day), DM intake as a percentage of body weight (3.52%), CP intake (230 g/day), intake of ash- and nitrogen-corrected neutral detergent fiber (NDFcp; 623 g/day), total digestible nutrients (1,087 g/day), metabolizable energy (3.9 Mcal/day), or digestibility of DM (719 g/kg), CP (819 g/kg), non-fibrous carbohydrates (NFC; 903 g/kg), and NDFcp (454 g/kg). Feeding (230 min/day), rumination (516 min/day), and idling times (704 min/day), feeding efficiency (457 g/h for DM; 178 g/h for NDFcp), and rumination efficiency (189 g/h for DM; 74 g/h for NDFcp) were unaffected. Likewise, there were no changes in ruminal pool sizes, intake (K_i), passage (K_p), or degradation (K_d) rates. NFC intake increased linearly. Fecal nitrogen excretion decreased linearly, while other nitrogen parameters remained unchanged. Ruminal pH was not affected but followed a quadratic pattern over time. NH₃-N concentrations varied with time and substitution level. Full replacement of SM with M-USA, including up to 2.7% urea (DM basis), is recommended in high-cactus diets for sheep without compromising performance or rumen function.

Keywords: Cactaceae. Concentrate. Semiarid. Non-protein nitrogen. Nitrogen efficiency. *Opuntia* sp

1.INTRODUÇÃO GERAL

A criação de ruminantes na região Nordeste, notadamente no Semiárido, é uma atividade de grande relevância econômica, social e ambiental, especialmente devido à escassez de outras culturas na região. Entre os ruminantes, a criação de caprinos e ovinos desempenha um papel fundamental na geração de renda e na segurança alimentar de propriedades de diferentes portes. No entanto, essa atividade enfrenta desafios significativos.

A escassez hídrica, a degradação de pastagens e a baixa disponibilidade de forragem em períodos de estiagem prolongada são obstáculos recorrentes que exigem manejo eficiente e a adoção de tecnologias sustentáveis. Para lidar com esses desafios, práticas como técnicas de manejo e suplementação alimentar adaptadas são indispensáveis, garantindo a sustentabilidade da criação animal mesmo diante das adversidades climáticas.

Geralmente, para suprir a falta de forragens em qualidade e quantidade, os produtores passaram a adquirir insumos, tanto volumosos (como silagens, cana-de-açúcar, bagaço de cana, dentre outros) quanto concentrados. Nesse contexto, o farelo de soja é amplamente utilizado como fonte proteica na alimentação de ruminantes, devido ao seu alto teor de proteína bruta (em torno de 44–48%) e excelente valor nutritivo. Contudo, o custo elevado desse insumo pode representar uma limitação para pequenos e médios produtores, exigindo alternativas viáveis e acessíveis.

Uma dessas alternativas é o uso da ureia como fonte de nitrogênio não proteico de baixo custo. Essa prática é especialmente relevante em regiões onde há dificuldades para a aquisição de fontes de proteína verdadeira. A ureia, ao ser combinada com forragens de baixo teor proteico, fornece nitrogênio para os microrganismos do rúmen, que o utilizam para sintetizar proteínas. Esse processo melhora a fermentação ruminal e aumenta o aproveitamento das fibras, contribuindo para uma alimentação mais eficiente.

Para maximizar a utilização da ureia, é essencial associá-la a uma fonte de carboidratos altamente fermentescíveis. A fim de potencializar os benefícios dessa

combinação, o sulfato de amônio é frequentemente adicionado, pois fornece enxofre necessário à formação de aminoácidos sulfurados, como metionina e cisteína, otimizando a síntese de proteína microbiana no rúmen. Somado a isso, a utilização de forrageiras adaptadas à região semiárida, também se apresenta como uma alternativa viável aos produtores. A palma forrageira se destaca nessa situação por apresentar alta disponibilidade de energia e por favorecer o uso de alimentos menos palatáveis, como a ureia e o bagaço de cana-de-açúcar.

Esta tese é composta por três capítulos. O primeiro, corresponde ao referencial teórico, no qual se descrevem brevemente as principais características da ureia utilizada no ensaio experimental e seu sincronismo com a energia no ambiente ruminal. Os capítulos 2 e 3 apresentam e discutem os resultados obtidos com a substituição do farelo de soja por uma mistura de milho, ureia e sulfato de amônio.

O capítulo 2, aborda a substituição total do farelo de soja por uma mistura de milho moído, ureia e sulfato de amônio, enfocando a ingestão de nutrientes, digestibilidade e dinâmica da fibra em ovinos alimentados com dietas ricas em palma forrageira. Já o capítulo 3, discute se o farelo de soja pode ser substituído por essa mistura em dietas para ovinos também ricas em palma forrageira.

CAPÍTULO I

REFERENCIAL TEÓRICO

1 REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Ureia

A ureia é um composto orgânico cuja estrutura molecular consiste em duas amidas (NH_2), caracterizando-a como fonte de nitrogênio não proteico (NNP), ligadas a um grupo carbonila (CO). Sua fórmula química é $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, também conhecida como diaminometanal. Trata-se de uma substância sólida, cristalina, branca, altamente solúvel em água e comumente usada como fonte de nitrogênio em dietas animais (TEIXEIRA; SANTOS, 2008).

Essa substância ganhou atenção histórica em 1828, quando Friedrich Wöhler realizou sua síntese pela primeira vez, a partir da reação de cianato de potássio (KOCN) com sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) um marco na história da química orgânica (KINNE-SAFFRAN; KINNE, 1999). Posteriormente, em 1870, Bassarow desenvolveu um procedimento industrial para produzi-la, utilizando CO_2 e NH_3 como matérias-primas (SANTOS et al., 2001). Na síntese moderna, o uso do processo Haber–Bosch para a obtenção de amônia é essencial, com o CO_2 também derivado da mesma fonte (ZHANG et al., 2020).

Atualmente, a produção pode ocorrer tanto em laboratório quanto em escala industrial por meio da reação entre amônia e dióxido de carbono, geralmente via processo Bosch-Meiser (REDDY et al., 2012). No Brasil, a ureia comercial apresenta em sua composição, em média, aproximadamente 46,4% de nitrogênio, até 0,55% de biureto, 0,003% de cinzas, 0,008% de aminas livres e traços de ferro e chumbo (SANTOS et al., 2001). Quanto à composição bromatológica, ela contém cerca de 97,9% de matéria seca, 290% de proteína bruta (devido ao seu teor de nitrogênio), 99,8% de matéria orgânica e 0,22% de matéria mineral.

Há, ainda, variações tecnológicas no processo de produção da ureia, que podem influenciar sua pureza e propriedades físico-químicas, conforme a planta industrial e as condições operacionais adotadas. De modo geral, a ureia é considerada uma das fontes de nitrogênio mais econômicas por unidade de N, além de apresentar facilidade de manuseio e ampla disponibilidade. Por isso, seu uso se estende desde aplicações como fertilizante

agrícola até sua inclusão em ração animal como fonte eficiente de nitrogênio (TEIXEIRA; SANTOS, 2008; SANTOS et al., 2001).

1.2 Ureia na nutrição de ruminantes

Ruminantes demandam uma dieta equilibrada em nitrogênio e energia para suprir suas necessidades nutricionais e garantir um crescimento e produtividade adequados. O uso de fontes alternativas de nitrogênio é especialmente importante devido à competição entre as fontes proteicas tradicionais e a alimentação humana e de outros animais.

Dentre essas alternativas, a ureia destaca-se como uma fonte de nitrogênio não proteico (NNP) amplamente utilizada nas dietas de ruminantes. Contudo, seu uso apresenta desafios, tais como baixa palatabilidade e potencial toxicidade quando incluída em níveis elevados, decorrentes de sua rápida solubilidade no rúmen.

Historicamente, o emprego da ureia na alimentação animal teve início em 1879, na Alemanha. Sua utilização intensificou-se durante a Primeira Guerra Mundial (1914–1918), em virtude da escassez de alimentos, com o intuito de viabilizar a produção intensiva de carne e leite a custos reduzidos (SANTOS et al., 2001).

No contexto brasileiro, a ureia é comumente incorporada na dieta de vacas leiteiras (BUSTAMANTE, 2008) como uma alternativa para diminuir custos, substituindo fontes proteicas mais caras, como o farelo de soja (KERTZ, 2010; SCHWAB, 2017). A microbiota ruminal potencializa a utilização da ureia, favorecendo a digestão das forragens (FIGUEIRAS et al., 2010; SAMPAIO et al., 2009) e otimizando a disponibilidade de compostos nitrogenados para a síntese de proteína microbiana de alto valor nutritivo (NORRAPOKE et al., 2022).

Segundo Lucci (1997), a recomendação para uso da ureia deve considerar a taxa de degradabilidade proteica no rúmen, o teor de NNP das forragens e os níveis adequados de amônia e energia no ambiente ruminal.

Entretanto, o uso excessivo da ureia deve ser evitado, visto que a ingestão em quantidades elevadas pode resultar em toxicidade (CURRIER et al., 2004). Isso ocorre

porque a ureia é rapidamente hidrolisada no rúmen pela urease, convertendo-se em amônia (NH_3) (LAZCANO et al., 2012). O excesso de NH_3 é absorvido e transportado ao fígado para ser transformado em ureia e excretado; contudo, se o fígado não metabolizar todo o excesso, a amônia acumula-se na corrente sanguínea, causando toxicidade (CABRITA et al., 2006).

É importante destacar que a hidrólise natural da ureia ocorre independentemente da suplementação, uma vez que os ruminantes realizam reciclagem endógena de ureia (KOSTER et al., 2002).

1.3. Metabolismo Ruminal de Nitrogênio

O metabolismo do nitrogênio (N) em ruminantes depende fundamentalmente da capacidade da microbiota ruminal de utilizar a amônia (NH_3) para a síntese de aminoácidos (AA), desde que haja energia suficiente disponível para esse processo. O nitrogênio é essencial na nutrição dos ruminantes e pode ser encontrado tanto em proteínas verdadeiras (PV), provenientes de grãos, cereais e forragens, quanto em compostos de nitrogênio não proteico (NNP), como ureia, biureto, sais de amônio (NH_4^+), aminoácidos, nitratos e ácidos nucleicos.

A proteína bruta (PB) da dieta se divide em proteína degradável no rúmen (PDR) e proteína não degradável no rúmen (PNDR) (BOHNERT et al., 2002). A degradabilidade da PDR é influenciada pela presença tanto da PV quanto do NNP, sendo que a ureia, um NNP, possui equivalente proteico estimado em 281%, podendo substituir cinco vezes a quantidade de soja em termos de nitrogênio disponível (JOYSOWAL et al., 2019). A ureia é completamente degradada no rúmen a NH_3 , enquanto as proteínas verdadeiras apresentam diferentes taxas de degradação devido à sua estrutura complexa.

A quantidade e qualidade da proteína metabolizada no rúmen dependem do tipo de proteína dietética e da interação microbiana com os substratos disponíveis. Variações no nível e fonte de nitrogênio podem alterar a composição da microbiota ruminal e o perfil dos produtos fermentativos (CANTALAPIEDRA-HIJAR et al., 2022).

As proteínas verdadeiras degradáveis no rúmen são hidrolisadas pelas enzimas bacterianas em pequenos peptídeos e aminoácidos, que são, então, absorvidos e utilizados para a síntese de proteína microbiana (PBmic) ou desaminados para gerar esqueletos de carbono e amônia (NH_4^+), que podem ser reciclados para nova síntese proteica (BACH et al., 2005). Já o nitrogênio oriundo da ureia é rapidamente convertido por enzimas ureolíticas em NH_4^+ e dióxido de carbono (CO_2), com o NH_4^+ sendo usado pelas bactérias para síntese de aminoácidos e PBmic, desde que haja energia suficiente no rúmen para esse processo (NORO; WITTEWER et al., 2012).

Quando os níveis de NH_4^+ são baixos, as bactérias gastam energia para incorporá-lo por meio de enzimas como a glutamina sintetase e a glutamato desidrogenase; em níveis elevados, a incorporação ocorre de forma mais eficiente, sem gasto energético (ZHAO et al., 2023).

Aproximadamente 80% das bactérias ruminais, especialmente as celulolíticas, utilizam NH_4^+ como fonte única de nitrogênio, sendo que 26% usam exclusivamente NH_4^+ e 55% podem utilizar tanto NH_4^+ quanto aminoácidos (JOYSOWAL et al., 2019). A amônia resultante da degradação proteica está presente majoritariamente na forma de NH_4^+ no rúmen (NORO; WITTEWER et al., 2012). Para evitar toxicidade, o excesso de NH_4^+ é expelido pelas bactérias para o meio ruminal.

O pico de concentração de NH_3 no rúmen ocorre em diferentes horários dependendo da fonte de nitrogênio: para PB verdadeira, entre 3 e 5 horas após a alimentação, enquanto para a ureia ocorre cerca de 2 horas após o consumo (MORALLUNA et al., 2022; SANTOS, 2011).

Desequilíbrios entre a oferta de energia e de proteína degradável podem levar ao aumento do NH_4^+ no rúmen, elevando o pH e favorecendo a conversão para NH_3 , que atravessa rapidamente a parede ruminal em decorrência da sua lipossolubilidade (SINCLAIR et al., 2000). Em pHs baixos, comuns em dietas ricas em carboidratos não fibrosos, a forma predominante é NH_4^+ , que é absorvida lentamente, enquanto em pHs

elevados, típicos de jejum ou dietas fibrosas, a absorção de NH_3 é mais rápida (MOHAMMED-NOUR et al., 2019).

O excesso de NH_3 é absorvido pela mucosa ruminal e transportado via veia porta até o fígado, onde é convertido em ureia (LU et al., 2014; SHEN et al., 2023). A concentração de NH_4^+ no sangue geralmente atinge o pico entre 2 e 3 horas após a alimentação, dependendo do tipo e da quantidade de proteína ingerida (SIQUEIRA et al., 2022). A glutamina atua como um transportador não tóxico de amônia até o fígado, onde o NH_4^+ é transformado em ureia, uma substância muito menos tóxica (NORO; WITTEWER et al., 2012).

Cerca de 67% da ureia produzida no organismo é reciclada para o trato gastrointestinal, com aproximadamente 90% sendo secretados de volta ao rúmen via saliva ou difusão transepitelial, contribuindo para o suprimento de nitrogênio microbiano. O restante é eliminado na urina (KOZLOSKI, 2019). A eficiência dessa reciclagem depende da disponibilidade de energia ruminal (ZHANG et al., 2020). Em dietas com baixo teor de proteína bruta, há maior reabsorção renal de ureia para reciclagem, enquanto uma menor eficiência microbiana resulta em maior excreção urinária, aumentando o custo metabólico para o animal (DIJKSTRA et al., 2013).

1.4 Sincronia Ruminal entre Energia e Nitrogênio

A microbiota do rúmen exerce papel essencial na decomposição dos alimentos ingeridos, transformando-os em ácidos graxos voláteis (AGV), aminoácidos (AA), peptídeos (PP) e amônio (NH_4^+) (SHABAT et al., 2016). Esses microrganismos dependem de fontes fermentáveis de energia e nitrogênio (N) para manter sua atividade metabólica e proporcionar benefícios ao hospedeiro ruminante (DERAKHSHANI et al., 2018).

Os alimentos consumidos pelos ruminantes — como forragens, grãos e suplementos proteicos e energéticos — são convertidos em proteína microbiana (PBmic) de alta qualidade, com excelente perfil aminoacidítico. Aproximadamente 60% dos aminoácidos absorvidos no intestino derivam da PBmic, enquanto os outros 40% provêm da proteína não degradável no rúmen (PNDR) presente na dieta (WATTIAUX, 1998). A

PBmic é responsável pela maior parcela do aporte proteico, contribuindo com cerca de 50 a 80% da proteína bruta (PB) digerida no intestino dos ruminantes (COSTA et al., 2011).

Para que essa conversão ocorra de modo eficiente, é necessário sincronizar os níveis de nitrogênio e energia fermentável (carboidratos) no rúmen. Essa sincronia potencializa a atividade microbiana, melhora a digestibilidade ruminal e incrementa o fluxo de nutrientes, tanto de AGVs quanto de PBmic.

Johnson (1976) definiu o conceito de sincronização entre energia e nitrogênio, sugerindo que a síntese máxima de PBmic ocorre quando o animal recebe fontes proteicas de diferentes solubilidades, promovendo liberação gradual de amônia combinada com fermentação adequada, favorecendo a produção microbiana.

Com base nessa ideia, a liberação coordenada de fontes dietéticas de energia e nitrogênio para a microbiota ruminal tornou-se essencial para otimizar o uso da proteína degradável no rúmen (PDR), melhorar a taxa de síntese de PBmic, aumentar a eficiência no uso do nitrogênio, reduzir perdas de amônia (NH_3) e aprimorar o desempenho produtivo dos ruminantes (DELEVATTI et al., 2019; ZHANG et al., 2020b). Entretanto, mesmo com níveis semelhantes de sincronismo, respostas variam conforme os ingredientes e proporções das dietas, impactando a eficiência da síntese microbiana (CHEN et al., 2022).

Estudos indicam que a maior sincronia entre energia e nitrogênio nem sempre eleva diretamente a síntese de PBmic, mas melhora a retenção de nitrogênio, diminui as concentrações de N-NH_3 e reduz a excreção total de nitrogênio (YALCHI et al., 2020). Além disso, a sincronização tem sido associada ao aumento da eficiência da síntese microbiana e à redução do nitrogênio total excretado (SEO et al., 2010; ANGGRAENY et al., 2021).

A PDR fornece aminoácidos, peptídeos e NH_4^+ durante a degradação microbiana, sendo crucial o equilíbrio entre a oferta e a utilização desse nitrogênio para evitar perdas via excreção urinária, decorrentes do excesso de NH_4^+ no rúmen. Assim, a disponibilidade sincronizada de carboidratos e nitrogênio é fundamental para o máximo rendimento microbiano (SANTOS; PEDROSA, 2011).

Fontes proteicas altamente solúveis geram NH_4^+ e AGVs após desaminação (GULINSKI, 2016). A presença de NH_4^+ promove maior síntese microbiana, acelerando a degradação das forragens, aumentando o consumo voluntário e elevando a produção de AGVs (COSTA et al., 2015).

A eficiência microbiana está diretamente relacionada à disponibilidade de nitrogênio e carboidratos fermentáveis, estes últimos fornecendo a energia principal para a síntese de PBmic. Portanto, a fermentação ruminal eficiente depende da viabilidade e do equilíbrio da microbiota (MATTHEWS et al., 2019; CHEN et al., 2022b). É imprescindível garantir aporte energético adequado para melhorar a utilização do nitrogênio no rúmen.

A síntese de PBmic constitui o principal processo do metabolismo do nitrogênio em ruminantes, envolvendo a fixação do N-NH_3 a moléculas de carbono, em um processo que demanda energia. Assim, fontes energéticas altamente degradáveis devem ser acompanhadas por fontes nitrogenadas igualmente degradáveis, como o nitrogênio não proteico (NNP) (HOOVER; STOKES, 1991). O sincronismo entre a liberação de energia e nitrogênio, favorecem a assimilação ativa do NH_3 e aumenta a taxa e eficiência da síntese microbiana (ZHANG et al., 2020). A PBmic circula nas fases líquida e sólida da digestão, sendo absorvida no intestino na forma de aminoácidos e peptídeos, correspondendo a 50–80% da proteína verdadeira absorvível e compondo parte fundamental da proteína metabolizável (BACH et al., 2005; CHERDTHONG; LU et al., 2019; WANAPAT, 2010).

A composição do alimento impacta diretamente a produção de N-NH_3 no rúmen. Alimentos altamente degradáveis aumentam a concentração de NH_3 ruminal, intensificando a atividade microbiana (KÖSTER et al., 1996). Dietas ricas em PDR requerem elevada oferta de carboidratos fermentáveis; a combinação de carboidratos altamente degradáveis com fontes proteicas pouco degradáveis pode gerar excesso energético e falta de nitrogênio, prejudicando a fermentação. A deficiência de nitrogênio limita o crescimento microbiano, enquanto o excesso de energia é desperdiçado (RUSSEL, 1998).

A palma forrageira (*Opuntia* spp.), muito cultivada nas regiões semiáridas brasileiras, destaca-se por sua alta produtividade, adaptabilidade e valor nutricional. Seu perfil carboidrato é dominado por frações solúveis e rapidamente fermentáveis, o que afeta diretamente a fermentação ruminal e a eficiência no uso do nitrogênio, especialmente de fontes como a ureia, cuja eficácia está relacionada à sincronia entre energia e nitrogênio no rúmen (BATISTA et al., 2009; SILVA et al., 2010; LIRA et al., 2020).

Os carboidratos da palma consistem principalmente em carboidratos não fibrosos (CNF), como glicose, frutose, pectinas e pequenas quantidades de amido, representando de 400 a 600 g/kg de matéria seca, dependendo da espécie e manejo (BATISTA et al., 2009; SILVA et al., 2010; LIRA et al., 2020). A pectina, um polissacarídeo solúvel da parede celular da palma, é altamente fermentável, gerando AGVs como acetato e butirato que abastecem de energia a microbiota e ao animal (HALL et al., 2010; NASCIMENTO et al., 2021).

A elevada proporção de carboidratos fermentáveis torna a palma especialmente adequada para associação com fontes nitrogenadas não proteicas, como a ureia, promovendo sincronia entre energia e nitrogênio no rúmen, favorecendo a síntese microbiana e o aproveitamento eficiente dos nutrientes (RUSSELL et al., 1992; SINCLAIR et al., 1993).

Assim, o perfil carboidrato da palma, marcado por alta solubilidade e fermentabilidade, justifica seu uso estratégico em dietas para ruminantes em regiões semiáridas, onde sua adaptabilidade e produtividade compensam limitações nutricionais. A sincronização entre nitrogênio e energia no rúmen busca maximizar o aproveitamento do nitrogênio para síntese de PBmic e reduzir perdas de NH_4^+ .

1.5. Efeito dos níveis de ureia na dieta de ruminantes

A ureia constitui uma fonte importante de proteína degradável no rúmen (PDR), apresentando alta densidade de equivalente proteico (de 262 a 292%). No rúmen, os microrganismos convertem essa ureia em proteína bruta (PB) de elevado valor biológico. A utilização da ureia como fonte de nitrogênio não proteico (NNP) tem se mostrado

bastante relevante na nutrição de ruminantes, por atender às demandas microbianas de nitrogênio no rúmen e contribuir para a redução dos custos alimentares (BENEDETI et al., 2014; HOLDER et al., 2015; ROZANSKI et al., 2019). Entretanto, o uso da ureia na dieta desses animais é frequentemente limitado pela sua rápida hidrólise, que ocorre em velocidade superior à de outras fontes proteicas vegetais (BRODERICK; REYNAL, 2009).

Essa rápida degradação da ureia em amônia (NH_3) pode ultrapassar a capacidade dos microrganismos ruminais de absorvê-la, especialmente quando a taxa de fermentação de carboidratos no rúmen é insuficiente para acompanhar essa liberação (CHERDTHONG; WANAPA, 2010). Como consequência, ocorre acúmulo e absorção excessiva de NH_3 , com posterior excreção de nitrogênio pela urina (HIGHSTREET et al., 2010). Por isso, é fundamental garantir a sincronia entre a disponibilidade de energia rapidamente fermentável e a liberação acelerada de NH_3 oriunda da ureia. Caso essa sincronia não ocorra, a elevada concentração de N- NH_3 pode causar ineficiência na fermentação ruminal, redução na síntese de proteína microbiana, queda no desempenho animal e, em alguns casos, toxicidade por NH_3 (BARTLEY et al., 1976; NRC, 2001; HUNTINGTON et al., 2006).

Diversos estudos vêm investigando formas de sincronizar a liberação de NNP da ureia com a degradação dos carboidratos no rúmen (LÖEST et al., 2001; PROKOP; KLOPFENSTEIN, 1977; SCHACH et al., 1992). Devido à alta solubilidade da ureia no meio ruminal, a busca tem sido pela combinação ideal entre níveis de ureia e fontes energéticas que assegurem energia suficiente para a máxima utilização do nitrogênio pelos microrganismos, otimizando a síntese e eficiência da proteína microbiana.

A literatura recomenda que o NNP pode substituir até 33 a 35% do nitrogênio proteico na dieta (VELLOSO, 1984), com limite sugerido de ureia em até 1,0% da matéria seca total da dieta (HADDAD, 1984). Valores máximos entre 1 e 2% na matéria seca total ou até 5% na matéria seca do concentrado não costumam prejudicar o consumo devido à baixa palatabilidade ou toxicidade (VELLOSO, 1984). No entanto, inclusões maiores têm sido testadas sem comprometer o desempenho animal (VOLTOLINI et al., 2010; BARBOSA et al., 2012; PESSOA et al., 2013; WANG et al., 2015; CORTE et al., 2018).

Estudos que avaliaram o pH ruminal e a concentração de N-NH₃ em dietas com níveis variados de ureia sincronizados com fontes energéticas indicam que o pH ruminal permanece estável, enquanto o N-NH₃ aumenta em correlação com a dose de ureia. Por exemplo, em ovinos fistulados, a inclusão de ureia (0; 0,5; 1,0 e 1,5% da matéria seca total) associada ao farelo de vagem de algaroba elevou os níveis de N-NH₃ sem alterar o pH ruminal (ALVES et al., 2012). Resultados semelhantes foram encontrados em outros estudos que observaram aumento de N-NH₃ sem mudanças no pH (AFSHAR et al., 2015; LI et al., 2020).

Em dietas ricas em concentrados, a substituição parcial do farelo de soja por ureia (0, 1, 2 ou 3% da matéria seca) também resultou em maior concentração de N-NH₃ (XU et al., 2019). Por outro lado, a inclusão de 2,4% de ureia com 45% de palma forrageira não alterou pH ou N-NH₃ (PEREIRA et al., 2020). Estudos que usaram proporções maiores de palma forrageira e ureia (67,6% e 2,7% da matéria seca total, respectivamente) também não observaram variações significativas em N-NH₃ e pH quando comparados a outros suplementos proteicos, o que foi atribuído à adequada sincronia entre energia e nitrogênio, dada a alta concentração de carboidratos solúveis na palma forrageira, favorecendo a incorporação do nitrogênio na proteína microbiana (PESSOA et al., 2013).

Em síntese, a literatura aponta que o aumento nos níveis de ureia eleva o N-NH₃ sem impactar negativamente o pH ruminal, conforme confirmado por metanálises que indicam a ureia como suplemento eficaz para estimular a fermentação ruminal (CHEN et al., 2010; WAHYONO et al., 2022). Entre as fontes energéticas, a palma forrageira destaca-se como aliada para utilizar níveis maiores de ureia (>2%) em dietas de ruminantes, devido ao AQ seu alto teor de carboidratos fermentescíveis.

É importante destacar que o pH ruminal, o N-NH₃ e o nitrogênio ureico sanguíneo variam em função do tempo após a alimentação, havendo forte correlação positiva entre o aumento do N-NH₃ e do nitrogênio ureico no sangue ao longo do dia em dietas suplementadas com ureia. Além disso, a ureia pode contribuir para o aumento do pH ruminal após a alimentação, uma vez que o pH é parcialmente regulado pelo N-NH₃ (KANG et al., 2015; VAN SOEST, 1994).

Fontes energéticas digestíveis, quando sincronizadas com a ureia, não só elevam o N-NH_3 , mas também potencializam a síntese e eficiência da proteína microbiana. Por exemplo, níveis de ureia de até 0,6% na dieta aumentaram a síntese de proteína microbiana em dietas à base de silagem de milho (BOUCHER et al., 2007), e níveis de até 1,95% de ureia em dietas com 50% de concentrado elevaram a produção microbiana (RENNÓ et al., 2008). Em ovinos, níveis crescentes de ureia (até 1,5% do concentrado) associados a tâmaras como fonte energética aumentaram a fermentação ruminal e crescimento microbiano (KHATTAB et al., 2013). Também foi reportado um aumento de 64% na produção de proteína microbiana ao elevar a ureia de 0 para 2% na dieta, sem ganhos adicionais com 3% (ZHANG et al., 2016). Níveis de ureia entre 3 e 5% em dietas energéticas mostraram melhoria até 3%, enquanto níveis maiores resultaram em perdas nitrogenadas ambientais (PAENGKOUM et al., 2006). O uso de polpa de mandioca e melaço com ureia também elevou a síntese de proteína microbiana (NORRAPOKE et al., 2022).

Por outro lado, substituições parciais do farelo de soja por ureia, usando como fonte energética a casca de algodão, não afetaram a eficiência da síntese proteica microbiana (MAGALHÃES et al., 2005). De forma similar, diferentes níveis de concentrado e fontes proteicas (farelo de soja e ureia) também não alteraram essa eficiência (PAIXÃO et al., 2006).

Em resumo, a suplementação com ureia, quando corretamente sincronizada com fontes de carboidratos de rápida disponibilidade energética, pode maximizar ou manter a eficiência do crescimento microbiano sem causar danos à microbiota ruminal. Esses achados corroboram conceitos tradicionais que defendem a sincronia entre a degradação dos carboidratos não fibrosos e a proteína degradável para maximizar a síntese de proteína microbiana e, conseqüentemente, o desempenho animal (CASPER et al., 1999).

Para garantir essa sincronia ao substituir o farelo de soja por ureia e sulfato de amônio, é essencial o uso de fontes de carboidratos fermentescíveis, como o milho. Dentre os volumosos, poucos oferecem alternativas em carboidratos não fibrosos (CNF), destacando-se a cana-de-açúcar e a palma forrageira. Assim, espera-se que a inclusão de

volumosos ricos em CNF em dietas com substituição do farelo de soja por milho e ureia permita o uso de níveis de ureia superiores aos atualmente recomendados na literatura.

2.REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AFSHAR, S. et al. Effect of feeding whole or cracked barley grain accompanied by soybean meal or urea on nutrients digestibility and parameters of rumen in Mehraban sheep. *Research on Animal Production*, v. 6, n. 11, p. 102-107, 2015.

ANGGRAENY, Y. N.; PAMUNGKAS, D.; SOETANTO, H. Synchronous feeding of liquid protein source with different grains on performance, digestibility, ruminal fermentation, blood metabolites, and carcass characters in growing lambs. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2021. p. 012042. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-019-02074-y>.

BACH, A.; CALSAMIGLIA, S.; STERN, M. D. Nitrogen metabolism in the rumen. *Journal of Dairy Science*, v. 88, n. 1, p. E9–E21, 2005. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73133-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73133-7).

BARTLEY, E. E. et al. Ammonia toxicity in cattle. I. Rumen and blood changes associated with toxicity and treatment methods. *Journal of Animal Science*, v. 43, n. 4, p. 835-841, 1976. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas1976.434835x>.

BARBOSA, J. G. et al. Use of different urea levels in the feeding of Alpine goats. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 41, n. 5, p. 1713-1719, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000700022>.

BATISTA, Â. M. V. et al. Composição química e frações de carboidratos e proteínas de palma forrageira. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 449–455, 2009.

BENEDETI, P. D. B. et al. Soybean meal replaced by slow-release urea in finishing diets for beef cattle. *Livestock Science*, v. 165, p. 51-60, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.04.027>.

BOUCHER, S. E. et al. Effect of incremental urea supplementation of a conventional corn silage-based diet on ruminal ammonia concentration and synthesis of microbial protein. *Journal of Dairy Science*, v. 90, n. 12, p. 5619-5633, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0012>.

BOHNERT, D. W. et al. Influence of rumen protein degradability and supplementation frequency on steers consuming low-quality forage: I. Site of digestion and microbial efficiency. *Journal of Animal Science*, v. 80, n. 13, p. 2967-2977, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2527/2002.80112967x>.

BRODERICK, G. A.; REYNAL, S. M. Effect of source of rumen-degraded protein on production and ruminal metabolism in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, v. 92, n. 6, p. 2822-2834, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1865>.

BUSTAMANTE, M. C. U. Uréia na alimentação de vacas leiteiras: formas de utilização na dieta e desempenho animal. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2008. 19 p. Disponível em: Infoteca Embrapa.

CABRITA, A. R. J. et al. Evaluation of the effects of synchronising the availability of N and energy on rumen function and production responses of dairy cows – a review. *Animal Research*, v. 55, n. 12, p. 1–24, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1051/animres:2005045>.

CASPER, D. P. et al. Synchronization of carbohydrate and protein sources on fermentation and passage rates in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, v. 82, n. 11, p. 1779-1790, 1999. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75408-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75408-1).

CANTALAPIEDRA-HIJAR, G. et al. The extent of nitrogen isotopic fractionation in rumen bacteria is associated with changes in rumen nitrogen metabolism. *PLOS ONE*, v. 18, n. 9, e0291243, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2350552/v1>.

CHEN, S. et al. Effects of dietary protein on ruminal fermentation, nitrogen utilization and crude protein maintenance in growing Thai-indigenous beef cattle fed rice straw as roughage. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, v. 9, n. 18, p. 2396-2400, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3923/javaa.2010.2396.2400>.

CHEN, Y. H.; CHEN, C. Y.; WANG, H. T. The effect of forage source and concentrated liquid feedstuff supplementation on improving the synchronization of ruminant dietary energy and nitrogen release in vitro. *Fermentation*, v. 8, n. 9, p. 443, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation8090443>.

CHEN, P. et al. Effect of dietary rumen-degradable starch to rumen-degradable protein ratio on in vitro rumen fermentation characteristics and microbial protein synthesis. *Animals*, v. 12, n. 19, p. 2633, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12192633>.

CHERDTHONG, A.; WANAPAT, M. Development of urea products as rumen slow-release feed for ruminant production: a review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 4, n. 8, p. 2232-2241, 2010.

COSTA, N. D. L. et al. Considerações sobre a degradação da fibra em forragens tropicais associada com suplementos energéticos ou nitrogenados. *Archivos de Zootecnia*, v. 64, n. 247, p. 31-34, 2015. DOI: <https://doi.org/10.21071/az.v64i247.504>.

COSTA, V. A. C. et al. Digestibilidade total e parcial e balanço nitrogenado em bovinos em pastejo no período das águas recebendo suplementos com nitrogênio não-proteico e/ou proteína verdadeira. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, n. 8, p. 2815-2826, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011001200028>.

CORTE, R. R. et al. The effects of partial substitution of soybean with urea or slow-release urea on finishing performance, meat quality, and digestion parameters of Nellore steers. *Animal Production Science*, v. 58, n. 12, p. 2242-2248, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN16609>.

CURRIER, T. A. et al. Use of urea by lactating dairy cows: effects on milk yield and utilization of dietary nitrogen. *Journal of Dairy Science*, v. 87, n. 7, p. 2314-2321, 2004. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73374-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73374-5).

DIJKSTRA, J. Challenges in ruminant nutrition: towards minimal nitrogen losses in cattle. In: OLTJEN, J. W.; KEBREAB, E.; LAPIERRE, H. (ed.). *Energy and protein metabolism and nutrition in sustainable animal production*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2013. v. 134. DOI: https://doi.org/10.3920/978-90-8686-781-3_3.

DERAKHSHANI, H. et al. Association of bovine major histocompatibility complex (BoLA) gene polymorphism with colostrum and milk microbiota of dairy cows during the first week of lactation. *Microbiome*, v. 6, p. 1-18, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40168-018-0586-1>.

DELEVATTI, L. M. et al. Forage management intensification and supplementation strategy: intake and metabolic parameters on beef cattle production. *Animal Feed Science and Technology*, v. 247, p. 74-82, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.11.004>.

FIGUEIRAS, J. F. et al. Intake and digestibility in cattle under grazing supplemented with nitrogenous compounds during dry season. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 39, n. 9, p. 1303-1312, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000600020>.

GULIŃSKI, P.; SALAMOŃCZYK, E.; MŁYNEK, K. Improving nitrogen use efficiency of dairy cows in relation to urea in milk – a review. *Animal Science Papers and Reports*, v. 34, n. 1, p. 5-24, 2016.

HALL, M. B. et al. Fermentability of carbohydrate fractions using the gas production technique. *Journal of Dairy Science*, v. 93, n. 6, p. 2307-2318, 2010.

HADDAD, C. M. Ureia em suplementos alimentares. In: *Simpósio sobre Nutrição de Bovinos*, 2., 1984, Piracicaba. Anais [...]. Piracicaba: FEALQ, 1984. p. 119-141.

HIGHSTREET, A. et al. Response of Holstein cows to replacing urea with a slowly rumen released urea in a diet high in soluble protein. *Livestock Science*, v. 129, n. 12, p. 179-185, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.01.022>.

HOOVER, W. H. et al. [Título do artigo ausente]. *Journal of Dairy Science*, v. 74, n. 8, p. 3630-3644, 1991. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78553-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78553-6).

HOLDER, V. B. et al. The effects of degradable nitrogen level and slow-release urea on nitrogen balance and urea kinetics in Holstein steers. *Animal Feed Science and Technology*, v. 200, n. 9, p. 57-65, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.12.009>.

HUNTINGTON, G. B. et al. Effects of a slow-release urea source on absorption of ammonia and endogenous production of urea by cattle. *Animal Feed Science and Technology*, v. 30, n. 4, p. 225-241, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.01.012>.

JOHNSON, M. B. Synchronization of ruminal energy and protein supply for optimal microbial protein production. Cambridge: Cambridge University Press, 1976.

JOYSOWAL, M. et al. Use of slow-release ammonia products in ruminant diet: a review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, v. 7, n. 1, p. 882-888, 2019.

KANG, S.; WANAPAT, M.; PHESATCHA, K.; NORRAPOKE, T. Effect of protein level and urea in concentrate mixture on feed intake and rumen fermentation in swamp buffaloes fed rice straw-based diet. *Tropical Animal Health and Production*, v. 47, n. 13, p. 671-679, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-015-0777-8>.

KHATTAB, I. M. et al. Effects of urea supplementation on nutrient digestibility, nitrogen utilisation and rumen fermentation in sheep fed diets containing dates. *Livestock Science*, v. 155, n. 2-3, p. 223-229, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.024>.

KINNE-SAFFRAN, E.; KINNE, R. K. H. Vitalism and synthesis of urea: from Friedrich Wöhler to Hans A. Krebs. *American Journal of Nephrology*, v. 19, n. 2, p. 290-294, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1159/000013463>.

KÖSTER, H. H. et al. Ammonia production, ammonia absorption and urea recycling in ruminants. *Journal of Animal Science*, Champaign, v. 80, n. E. Suppl. 2, p. E21–E32, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2527/2002.802e21x>.

KÖSTER, H. H. et al. Effect of increasing degradable intake protein on intake and digestion of low-quality, tallgrass-prairie forage by beef cows. *Journal of Animal Science*, v. 74, n. 10, p. 2473-2481, 1996. DOI: <https://doi.org/10.2527/1996.74102473x>.

KOZLOSKI, G. V. Bioquímica dos ruminantes. 2. reimp. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

KERTZ, A. F. Review: Urea feeding to dairy cattle: a historical perspective and review. *The Professional Animal Scientist*, v. 26, n. 7, p. 257–272, 2010.

LAZCANO, G. J. et al. Nutrient utilization of fresh sugarcane-based diets with slow-release nonprotein nitrogen addition for control-fed dairy heifers. *Journal of Dairy Science*, v. 95, n. 1, p. 370-376, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4275>.

- LI, Z. et al. Changes in the solid-, liquid-, and epithelium-associated bacterial communities in the rumen of Hu lambs in response to dietary urea supplementation. *Frontiers in Microbiology*, v. 11, n. 6, p. 244, 2020.
- LIRA, M. A. et al. Palma forrageira: cultivo, uso atual e perspectivas futuras no semiárido brasileiro. *Documentos Embrapa*, n. 126, Recife: Embrapa Semiárido, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1129830>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- LUCCI, A. Synchronization of nitrogen degradability and energy availability in the rumen: implications for urea use in ruminant diets. 1997. 198 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.
- LÖEST, C. A. et al. Urea and biuret as nonprotein nitrogen sources in cooked molasses blocks for steers fed prairie hay. *Animal Feed Science and Technology*, v. 94, n. 3-4, p. 115-126, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00312-1](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00312-1).
- LU, Z. et al. Modulation of sheep ruminal urea transport by ammonia and pH. *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, v. 307, n. 5, p. R558-R570, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00107.2014>.
- MAGALHÃES, K. A. et al. Produção de proteína microbiana, concentração plasmática de ureia e excreções de ureia em novilhos alimentados com diferentes níveis de ureia ou casca de algodão. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 34, n. 12, p. 1400-1407, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982005000400038>.
- MATTHEWS, C. et al. The rumen microbiome: a crucial consideration when optimising milk and meat production and nitrogen utilisation efficiency. *Gut Microbes*, v. 10, n. 2, p. 115-132, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/19490976.2018.1505176>.
- MORA-LUNA, R. E. et al. Spineless cactus plus urea and Tifton-85 hay: maximizing the digestible organic matter intake, ruminal fermentation and nitrogen utilization of wethers in semi-arid regions. *Animals*, v. 12, n. 3, p. 401, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12030401>.
- MOHAMMED-NOUR, J. et al. The influence of alkalization and temperature on ammonia recovery from cow manure and the chemical properties of the effluents. *Sustainability*, v. 11, n. 8, p. 2441, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11082441>.
- NORRAPOKE, T.; PONGJONGMIT, T.; FOIKLANG, S. Effect of urea and molasses fermented cassava pulp on rumen fermentation, microbial population and microbial protein synthesis in swamp buffaloes fed rice straw-based diets. *Animal Feed Science and Technology*, v. 155, n. 3-4, p. 171-181, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.02.008>.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. Nutrient requirements of dairy cattle. 7. ed. Washington, D.C.: National Academic Press, 2001. 381 p.

NORO, M.; WITTEWER, F. Interrelaciones entre ureagénesis y gluconeogénesis hepática en rumiantes alimentados con elevado contenido de nitrógeno. *Veterinaria México*, v. 43, n. 14, p. 143–154, 2012.

PAENGKOUM, P. et al. Utilization of steam-treated oil palm fronds in growing Saanen goats: II. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, v. 19, n. 11, p. 1623-1631, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.2006.1623>.

PAIXÃO, M. L. et al. Ureia em dietas para bovinos: consumo, digestibilidade dos nutrientes, ganho de peso, características de carcaça e produção microbiana. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 35, n. 3, p. 2451-2460, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000800035>.

PEREIRA, G. F. C. et al. Urea can replace soybean meal in sheep diet without alter intake, digestibility and ruminal parameters. *International Journal of Development Research*, v. 10, n. 11, p. 42092-42097, 2020. DOI: <https://doi.org/10.37118/ijdr.20338.11.2020>.

PESSOA, R. A. S. et al. Diferentes suplementos associados à palma forrageira em dietas para ovinos: consumo, digestibilidade aparente e parâmetros ruminais. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, v. 14, n. 3, 2013.

PROKOP, M. et al. Slow ammonia release urea. *Nebraska Beef Cattle Report*, 1976.

REDDY, N. S. et al. Synthesis and antibacterial activity of urea and thiourea derivatives of anacardic acid mixture isolated from a natural product cashew nut shell liquid (CNSL). *International Journal of Organic Chemistry*, v. 2, n. 3, p. 267, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.4236/ijoc.2012.23036>.

RENNÓ, L. N. et al. Níveis de ureia na ração de novilhos de quatro grupos genéticos: parâmetros ruminais, ureia plasmática e excreções de ureia e creatinina. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 37, n. 15, p. 556-562, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008000300022>.

ROZANSKI, S. et al. The economic viability of the inclusion of urea in the ration for feedlot lambs. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, v. 20, n. 16, p. 123-134, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-9940200262019>.

RUSSEL, J. B. Strategies that ruminal bacteria use to handle excess carbohydrate. *Journal of Animal Science*, v. 76, n. 7, p. 1955-1963, 1998. DOI: <https://doi.org/10.2527/1998.7671955x>.

RUSSELL, J. B. et al. Microbial energetics and metabolism of ruminal bacteria. *Journal of Animal Science*, Champaign, v. 70, p. 3551–3561, 1992.

SAMPAIO, C. B. et al. Rumen dynamics of neutral detergent fiber in cattle fed low-quality tropical forage and supplemented with nitrogenous compounds. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, n. 17, p. 560-569, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000300023>.

SANTOS, F. A. P.; PEDROSA, A. M. Metabolismo de proteínas. In: BERCHIELLI, T. T.; PIRES, A. V.; OLIVEIRA, S. G. (org.). *Nutrição de ruminantes*. 2. ed. Jaboticabal: Funep, 2011. cap. 9, p. 265-297.

SANTOS, G. T. D.; CAVALIERI, F. L. B.; MODESTO, E. C. Recentes avanços em nitrogênio não protéico na nutrição de vacas leiteiras. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL EM BOVINOCULTURA DE LEITE: NOVOS CONCEITOS EM NUTRIÇÃO, 2., 2001, Lavras. Anais [...]. Lavras: UFLA, 2001. p. 199-228.

SCHACH, D. M. et al. Synchronization of carbohydrate and nitrogen degradation in the rumen. *Journal of Dairy Science*, Champaign, v. 75, n. 5, p. 1230–1238, 1992. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)77813-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)77813-1).

SCHWAB, G. C. Alimentos para bovinos. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2017. 451 p.

SEO, J. K. et al. Effects of synchronization of carbohydrate and protein supply on ruminal fermentation, nitrogen metabolism and microbial protein synthesis in Holstein steers. *Journal of the Asian-Australasian Society of Animal Sciences*, v. 23, n. 11, p. 1455-1461, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.10247>.

SHABAT, S. K. B. et al. Specific microbiome-dependent mechanisms underlie the energy harvest efficiency of ruminants. *The ISME Journal*, v. 10, n. 12, p. 2958-2972, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.62>.

SHEN, J. et al. The inhibition of high ammonia to in vitro rumen fermentation is pH dependent. *Frontiers in Veterinary Science*, v. 10, p. 1163021, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1163021>.

SIQUEIRA, M. C. et al. Cactus cladodes *Opuntia* or *Nopalea* and by-product of low nutritional value as solutions to forage shortages in semiarid areas. *Animals*, v. 12, n. 22, p. 3182, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12223182>.

SILVA, T. G. F. et al. Produtividade e composição químico-bromatológica da palma forrageira sob diferentes estratégias de manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 467–473, 2010.

SINCLAIR, K. D. et al. Nitrogen metabolism and fertility in cattle: I. Adaptive changes in intake and metabolism to diets differing in their rate of energy and nitrogen release in

the rumen. *Journal of Animal Science*, v. 78, n. 10, p. 2659-2669, 2000. DOI: <https://doi.org/10.2527/2000.78102659x>.

SINCLAIR, L. A. et al. Synchronization of ruminal degradation of dietary nitrogen and energy and the effect on microbial protein synthesis in sheep. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, v. 120, p. 251–263, 1993.

TEIXEIRA, R. R.; SANTOS, C. A. Ureia: características, usos e aplicações. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 515–520, 2008.

VAN SOEST, P. J. Nutritional ecology of the ruminant. 2. ed. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1994. 476 p.

VELLOSO, L. Ureia em rações de engorda de bovinos. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS - UREIA PARA RUMINANTES, Piracicaba. Anais [...]. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1984. p. 174-199.

VOLTOLINI, T. V. et al. Urea levels in multiple supplements for lambs grazing on buffelgrass. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, v. 32, n. 4, p. 461-465, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v32i4.7829>.

WAHYONO, T. et al. Effects of urea supplementation on ruminal fermentation characteristics, nutrient intake, digestibility, and performance in sheep: a meta-analysis. *Veterinary World*, v. 15, n. 2, p. 331, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14202/vetworld.2022.331-340>.

WANAPAT, M. et al. Effect of protein level and urea in concentrate mixture on feed intake and rumen fermentation in swamp buffaloes fed rice straw-based diet. *Tropical Animal Health and Production*, v. 47, p. 671-679, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-015-0777-8>.

WANG, P. et al. Ammonia and amino acids modulate enzymes associated with ammonia assimilation pathway by ruminal microbiota in vitro. *Livestock Science*, v. 178, n. 1, p. 130-139, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.05.033>.

WATTIAUX, M. A. Protein requirements of dairy cattle: accounting for metabolizable protein and amino acids. *Journal of Dairy Science*, Champaign, v. 81, n. 11, p. 3219–3232, 1998. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75968-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75968-4).

XU, Y. et al. Effects of incremental urea supplementation on rumen fermentation, nutrient digestion, plasma metabolites, and growth performance in fattening lambs. *Animals*, v. 9, n. 9, p. 652, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani9090652>.

YALCHI, T. et al. Effect of nutrient synchrony on ruminal fermentation, microbial protein synthesis and nitrogen balance in sheep. *Iranian Journal of Animal Science*

Research, v. 12, n. 1, p. 0-1, 2020. DOI:
<https://doi.org/2020.10.22067/IJASR.V12I1.76961>.

ZHANG, J. et al. Synchrony degree of dietary energy and nitrogen release influences microbial community, fermentation, and protein synthesis in a rumen simulation system. *Microorganisms*, v. 8, n. 2, p. 231, 2020. DOI:
<https://doi.org/10.3390/microorganisms8020231>.

ZHANG, M. et al. Reduced graphene oxides with engineered defects enable efficient electrochemical reduction of dinitrogen to ammonia in wide pH range. *Nano Energy*, v. 68, n. 16, p. 104323, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104323>.

ZHANG, S. et al. Effects of urea supplementation on rumen fermentation characteristics and protozoa population in vitro. *Journal of Applied Animal Research*, v. 44, n. 1, p. 1-4, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/09712119.2014.978779>.

ZHAO, X. et al. Glutamine synthetase and GlnR regulate nitrogen metabolism in *Paenibacillus polymyxa* WLY78. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 89, n. 9, p. 00139-23, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00139-23>.

CAPÍTULO II

**Substituição total do farelo de soja por uma mistura de milho moído,
ureia e sulfato de amônia: ingestão de nutrientes, digestibilidade e
dinâmica da fibra em ovinos alimentados com dietas ricas em palma
forrageira**

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da substituição do farelo de soja (FS) por uma mistura de milho moído e ureia-sulfato de amônio (M-USA), nos níveis de 0, 250, 500, 750 e 1.000g/kg de matéria seca (MS), em dietas para ovinos contendo alta proporção de palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), sobre a ingestão e digestibilidade de nutrientes, comportamento ingestivo e dinâmica ruminal da MS e da fibra em detergente neutro (FDN). Foram utilizados cinco ovinos mestiços, machos castrados, fistulados e canulados no rúmen, com peso corporal médio inicial de $47,2 \pm 9,7$ kg, alocados em delineamento quadrado latino 5×5 . A dieta foi formulada com 135 g de proteína bruta (PB)/kg de MS, tendo como volumoso a palma forrageira (500g/kg de MS) e o bagaço de cana-de-açúcar (300g/kg de MS), resultando em relação volumoso:concentrado de 80:20. Os níveis de substituição não influenciaram a ingestão de MS (1.596g/dia), PB (230g/dia), FDN (623g/dia) ou energia metabolizável (3,9 Mcal/dia). Também não foram observados efeitos sobre a digestibilidade da MS (719 g/kg), matéria orgânica (698g/kg), PB (819g/kg), FDN (454g/kg) e carboidratos não fibrosos (903 g/kg). Entretanto, a ingestão de CNF aumentou linearmente com a elevação dos níveis de M-USA. Os tempos de alimentação (220 min/dia), ruminação (516 min/dia) e ócio (704min/dia), bem como as eficiências de alimentação (EALMS; 457g/h; EALFDN; 178g/h), de ruminação (ERUMS: 189g/h; ERUFDN; 74g/h) e a dinâmica ruminal — pools de MS (0,664 kg), FDN (0,419 kg) e FDNi (0,282 kg), taxas de ingestão (KiMS; $0,102h^{-1}$; KiFDN; $0,064h^{-1}$), de passagem (KpMS; $0,032h^{-1}$; KpFDN; $0,022h^{-1}$; KpFDNi; $0,038 h^{-1}$) e de degradação (KdMS; $0,070h^{-1}$; KdFDN; $0,042h^{-1}$) — não foram afetados. Conclui-se que a substituição total do FS por M-USA em dietas com alta proporção de palma forrageira não compromete a ingestão, digestibilidade, comportamento ingestivo e dinâmica ruminal, sendo, portanto, recomendada.

Palavras-chave: cactáceas; concentrado; nitrogênio não proteico; semiárido.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effects of replacing soybean meal (SBM) with a blend of ground corn and urea-ammonium sulfate (GCU-AS) at levels of 0, 250, 500, 750, and 1,000 g/kg of dry matter (DM) in sheep diets containing a high proportion of cactus cladodes (*Opuntia stricta* [Haw.] Haw.) on nutrient intake and digestibility, ingestive behavior, and ruminal dynamics of DM and neutral detergent fiber (NDF). Five crossbred, castrated male sheep, fitted with rumen cannulas and with an initial average body weight of 47.2 ± 9.7 kg, were assigned to a 5×5 Latin square design. The diet was formulated to contain 135 g of crude protein (CP)/kg DM, with roughage consisting of cactus cladodes (500 g/kg DM) and sugarcane bagasse (300 g/kg DM), resulting in a forage-to-concentrate ratio of 80:20. The replacement levels had no effect on DM intake (1,596g/day), CP (230g/day), NDF (623g/day), or metabolizable energy intake (3.9MJ/day). Similarly, no significant differences were observed in the digestibility of DM (719 g/kg), organic matter (OM: 698g/kg), CP (819 g/kg), NDF (454g/kg), or non-fibrous carbohydrates (NFC: 903 g/kg). However, NFC intake increased linearly with the increasing levels of SBM replacement. Feeding (220 min/day), ruminating (516min/day), and idling (704 min/day) times, as well as feeding efficiencies (EALDM;457g/h; EALNDF: 178g/h), rumination efficiencies (ERUDM;189g/h; ERUNDF;74g/h), and ruminal parameters — including ruminal pools (DM;0.664 kg; NDF;0.419 kg; NDFi: 0.282kg), intake rates (KiDM; 0.102h^{-1} ; KiNDF; 0.064h^{-1}), passage rates (KpDM; 0.032h^{-1} ; KpNDF; 0.022h^{-1} ; KpNDFi: 0.038h^{-1}), and degradation rates (KdDM; 0.070h^{-1} ; KdNDF; 0.042h^{-1}) — were not affected by the replacement of SBM with GCU-AS. Therefore, the complete replacement of SBM with GCU-AS is recommended in sheep diets containing a high proportion of cactus cladodes, as it does not impair nutrient intake, digestibility, ingestive behavior, or ruminal dynamics.

Keywords: Cactaceae; concentrate; semiarid; non-protein nitrogen.

1 INTRODUÇÃO

O farelo de soja (FS) é uma das principais fontes proteicas utilizadas na nutrição animal, notadamente pela sua elevada qualidade proteica. No entanto, a sua utilização apresenta desafios econômicos, principalmente em virtude da volatilidade de preços e da forte dependência do mercado externo (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2019). Adicionalmente, surgem críticas relacionadas aos impactos ambientais e sociais, devido à expansão da soja sobre áreas sensíveis, como florestas tropicais, e à sua competição direta com a produção de alimentos destinados ao consumo humano.

No contexto da sustentabilidade e da redução dos custos de produção, tem-se intensificado o uso de ingredientes alternativos em substituição às fontes proteicas convencionais, como o farelo de soja (FS), principal insumo proteico utilizado em dietas para ruminantes (KARLSSON et al., 2021). Fontes de nitrogênio não proteico (NNP), como a ureia e os sais de amônio, representam alternativas economicamente viáveis, fornecendo nitrogênio em quantidade equivalente à das fontes proteicas verdadeiras (KERTZ, 2010; NICHOLS et al., 2022).

Entre esses ingredientes, a ureia se destaca como uma fonte eficiente e acessível de nitrogênio não proteico (NNP), capaz de substituir parcial ou totalmente as proteínas convencionais, como o FS, especialmente quando utilizada em conjunto com fontes energéticas de rápida fermentação. Além de promover eficiência alimentar, seu uso contribui para a mitigação de impactos ambientais, ao reduzir a necessidade de cultivos proteicos e, conseqüentemente, a ocupação de terras agrícolas e as emissões associadas (VAN SOEST, 1994; GERBER et al., 2013; PIRES et al., 2010; MOTTET et al., 2017).

A substituição de proteínas verdadeiras por NNP, como a ureia, também pode representar um ganho em sustentabilidade para os sistemas de produção. No rúmen, a ureia é rapidamente convertida em amônia (NH_3), utilizada pelas bactérias para a produção de proteína microbiana, de elevado valor biológico (GERASSEV et al., 2013). Bactérias celulolíticas utilizam predominantemente a amônia, enquanto as que fermentam carboidratos não fibrosos (CNF) aproveitam amônia, peptídeos e aminoácidos como fontes nitrogenadas.

Dessa forma, dietas que oferecem NNP diretamente no rúmen podem beneficiar diversos grupos microbianos, promovendo maior eficiência na síntese de proteína microbiana (N_{mic}). No entanto, essa síntese depende de uma adequada sincronia entre a liberação de nitrogênio e a disponibilidade de energia fermentescível no rúmen (VAN SOEST, 1994). O fornecimento excessivo de NH_3 , sem uma correspondente oferta energética, pode resultar em perdas de nitrogênio via urina, além de riscos de intoxicação por amônia (BAKER et al., 1995).

Portanto, o uso de ureia em dietas de ruminantes exige um equilíbrio cuidadoso entre o fornecimento de nitrogênio e carboidratos fermentáveis. A sincronização entre esses nutrientes é essencial para otimizar a síntese de proteína microbiana e reduzir as perdas ambientais de nitrogênio (SINCLAIR et al., 1993; RUSSELL et al., 1992). Dietas bem formuladas, que promovem esse equilíbrio, tendem a melhorar o desempenho animal e a reduzir a excreção urinária de nitrogênio, importante fonte de poluição ambiental por compostos como NO_x e N_2O (HUHTANEN et al., 2008; TEDESCHI et al., 2007).

A literatura recomenda níveis conservadores de ureia, entre 1% e 2% da matéria seca da dieta (HADDAD, 1984; VELLOSO, 1984). Contudo, estudos indicam que a inclusão de até 2,5% de ureia, especialmente quando associada à palma forrageira, pode melhorar a eficiência da utilização do nitrogênio e a produção de proteína microbiana, sem prejudicar a fermentação ruminal (CONCEIÇÃO et al., 2018).

Com base nisso, partiu-se da hipótese de que a alimentação de ovinos com níveis elevados de ureia — acima dos limites tradicionalmente recomendados —, em dietas compostas por milho moído e elevada proporção de palma forrageira, não comprometeria os parâmetros ruminais relacionados ao metabolismo do nitrogênio. Assim, este estudo objetivou investigar os efeitos da substituição do FS por ureia e milho moído em dietas com alta inclusão de palma forrageira sobre o consumo de nutrientes digestíveis totais, balanço de nitrogênio, níveis de ureia e nitrogênio plasmáticos, pH ruminal e concentrações de NH_3-N no rúmen.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local e licença para condução do estudo

O experimento foi conduzido no Laboratório de Avaliação de Alimentos para Pequenos Ruminantes II, do Departamento de Zootecnia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizado em Recife, Pernambuco, Brasil, com latitude 8°03'15" Sul e longitude 34°52'53", a uma altitude de 7m. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo tropical úmido (Aw) (KÖPPEN; GEIGER, 1928). Os protocolos experimentais envolvendo o uso de animais foram aprovados pelo Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA) da UFRPE, sob a licença nº 5024280322.

2.2 Animais e instalações

Foram utilizados cinco ovinos machos, sem padrão racial definido, fistulados no rúmen, com peso corporal médio de $47,2 \pm 9,7$ kg. Os animais foram alojados em um galpão coberto, em baias individuais suspensas ($0,93 \times 1,54$ m), construídas com ripas de madeira, equipadas com cocho e bebedouro. Os ovinos passaram por um período de adaptação ao manejo, às instalações e aos ingredientes da dieta durante 15 dias.

2.3 Delineamento experimental

Os animais foram distribuídos em um delineamento em quadrado Latino 5×5 , com cinco períodos experimentais de 21 dias cada. Cada período consistiu em 14 dias de adaptação às dietas e 7 dias destinados à coleta de dados e amostras, totalizando 105 dias de estudo.

2.4 Dietas experimentais

As dietas foram fornecidas *ad libitum* na forma de ração total, com relação volumoso:concentrado de 80:20, permitindo-se sobras de aproximadamente 100g/kg de MS. As dietas experimentais consistiram na substituição do farelo de soja (FS) por uma mistura de milho moído e ureia-sulfato de amônio (M-USA) nos níveis de 0, 250, 500, 750 e 1.000 g/kg de MS, conforme descrito na Tabela 2.

A palma forrageira foi processada diariamente em máquina forrageira, e seu teor de matéria seca foi avaliado semanalmente para o ajuste da quantidade de ração oferecida.

A alimentação foi disponibilizada às 08h00 e às 16h00, sendo a ração pesada diariamente antes do fornecimento matinal, a fim de calcular a ingestão voluntária dos animais.

A composição químico-bromatológica dos ingredientes e a proporção dos componentes das dietas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos ingredientes

Itens	Ingredientes (g/kg ⁻¹ MS)				
	Palma Forrageira	Bagaço de cana-de-açúcar	Farelo de Soja	Fubá de Milho	Ureia
Matéria seca	83,1	927,1	881,7	887,7	965,0
Matéria orgânica	929,2	965,1	939,5	975,7	990,0
Proteína bruta	86,8	19,0	507,1	80,6	2650,2
Extrato etéreo	16,5	15,4	21,3	74,0	-
FDNcp ¹	271,9	858,5	184,4	173,0	-
Carboidratos não fibrosos	554,1	72,2	226,6	648,1	-

¹Fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteínas.

Tabela 2. Proporção dos ingredientes composição química das dietas

Ingredientes (g/kg ⁻¹ MS)	Nível de substituição (g/kg ⁻¹ MS)				
	0,0	250,0	500,0	750,0	1000,0
Palma forrageira OEM ^a	508,7	508,3	507,8	507,4	507,0
Bagaço de cana-de-açúcar	299,2	299,0	298,7	298,5	298,2
Farelo de Soja	171,9	129,3	86,5	43,4	0,0
Fubá de milho	0,0	36,5	73,2	110,1	147,3
Sal comum	5,0	5,1	5,1	5,1	5,1
Mistura mineral	15,1	15,2	15,2	15,3	15,3
Ureia: sulfato de amônia ^b	0,0	6,71	13,5	20,3	27,1
Composição química (g/kg ⁻¹ de MS)					
Matéria Seca	150,1	150,2	150,3	150,5	150,6
Matéria Orgânica	924,6	926,2	927,8	929,4	931,0
Proteína Bruta	137,0	136,1	135,2	134,3	133,4
Extrato Etéreo	16,7	18,4	20,2	22,0	23,8
FDNcp ^c	426,9	425,0	423,1	421,2	419,3
Carboidrato não fibroso	344,0	372,2	400,5	429,1	457,8
EM (Mcal/kg MS) ^d	2,26	2,39	2,56	2,52	2,60

^a Orelha de elefante mexicana; ^b9 partes de ureia e 1 parte de sulfato de amônia; ^cFibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteínas; ^dEnergia metabolizável.

2.5 Coleta de dados e amostragem

Do 15º ao 22º dia de cada período experimental, os alimentos fornecidos e as sobras foram pesados e amostrados para estimativa do consumo de matéria seca (MS) e de

nutrientes. Para estimar a digestibilidade aparente dos nutrientes, realizou-se a coleta total de fezes do 17º ao 19º dia de cada período experimental, utilizando bolsas coletoras adaptadas ao corpo dos animais. A produção fecal foi pesada após 24 horas, e 20% do total produzido foi amostrado.

No 15º dia de cada período experimental, avaliou-se o comportamento ingestivo dos animais. As atividades de alimentação, ruminação e ócio foram registradas por meio da metodologia de varredura instantânea (*scan sampling*) descrita por Martin e Bateson (2007), observando-se os animais a cada 10 minutos durante 24 horas consecutivas, com início imediatamente após o fornecimento da alimentação matinal, às 8h00.

Nos dias 20 e 22 de cada período experimental, realizou-se o esvaziamento manual do rúmen por meio da cânula ruminal para avaliação da dinâmica ruminal (ROBINSON et al., 1987). Este procedimento foi feito quatro horas após a alimentação matinal no 20º dia e imediatamente antes da alimentação no 22º dia. Após o esvaziamento ruminal, o peso total da digesta foi registrado, e a filtração em tecido de algodão foi utilizada para separar as fases sólida e líquida. Amostras representativas de ambas as fases foram coletadas e armazenadas a -20 °C para análises posteriores de MS, fibra em detergente neutro (FDN) e FDN indigestível (FDNi). Após a amostragem, as fases foram novamente misturadas e a digesta remanescente foi reintroduzida no rúmen.

2.6 Composição química

Amostras compostas dos ingredientes, sobras, fezes e fases sólida e líquida do conteúdo ruminal foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas a -20 °C. Ao final do experimento, as amostras foram secas em estufa a 55 °C por 72 horas, moídas (Marconi®, modelo MA 340, Brasil) em peneira com crivo de 1 mm, e submetidas às análises químico-bromatológicas conforme a AOAC (1990): matéria seca (MS) por gravimetria a 105 °C (código 930.04), proteína bruta (PB) pelo método Kjeldahl ($N \times 6,25$; código 984.13), extrato etéreo por extração com éter de petróleo (código 920.39) e cinzas por ignição a 600 °C (código 942.05).

Para determinação da FDNi, amostras dos alimentos, sobras e conteúdo ruminal, previamente processadas em peneiras de 2 mm, foram incubadas no rúmen de um bovino

por 288 horas, conforme Krizsan e Huhtanen (2013), com adaptação do material dos sacos de nylon para tecido não tecido (TNT), conforme sugerido por Valente et al. (2011a).

As determinações de FDN (em ingredientes, sobras, fezes e conteúdo ruminal) foram realizadas utilizando alfa-amilase termoestável, sem adição de sulfito de sódio (MERTENS, 2002), com sacos de TNT (VALENTE et al., 2011b). A FDN foi corrigida para cinzas (MERTENS et al., 2002) e para compostos nitrogenados (FDN_{Ncp}), conforme Licitra et al. (1996).

2.7 Cálculos

A composição química das dietas foi calculada com base na proporção de ingredientes e seus respectivos valores de composição química. Os teores de carboidratos não fibrosos foram calculados ($CNF = 100 - (PB + EE + MM + FDN_{Ncp})$) segundo Detmann e Valadares Filho (2010), e os carboidratos totais ($CHOT = 100 - (PB + EE + MM)$), conforme Sniffen et al. (1992). A matéria orgânica (MO) foi estimada por diferença com a fração de cinzas ($MO = 1000 \text{ g/kg MS} - \text{g de cinzas/kg MS}$). Os consumos de MS, MO, PB, FDN_{Ncp} e CNF foram estimados pela diferença entre a quantidade fornecida e a quantidade presente nas sobras.

A digestibilidade aparente da MS e de seus constituintes foi calculada pela diferença entre o consumo e a excreção fecal, dividida pela quantidade de nutriente consumido (SIQUEIRA et al., 2021). O consumo de nutrientes digestíveis totais ($NDT \% MS = CNF_{dig} + FDN_{Ncp,dig} + PB_{dig} + (2.25 \times EE_{dig})$) foi determinado conforme Sniffen et al. (1992), convertido em energia digestível ($1 \text{ kg NDT} = 4,4 \text{ Mcal ED}$), e posteriormente em energia metabolizável (EM), utilizando o fator de conversão $ED \times 0,82$, segundo NRC (2007).

As eficiências de alimentação (MS e FDN_{Ncp}) e de ruminação (MS e FDN_{Ncp}) foram calculadas pela razão entre o consumo de nutrientes e o respectivo tempo de alimentação e ruminação, conforme descrito por Bürger et al. (2000).

Com base nas análises químicas dos conteúdos ruminais, foram estimados os *pools* de MS, FDN e FDN_i no rúmen, sendo este último utilizado como marcador interno

(TAMMINGA et al., 1989). As taxas de ingestão (Ki), passagem (Kp) e degradação (Kd) da MS e FDN, bem como a taxa de passagem da FDNi (Kpi), foram estimadas segundo a metodologia descrita por Oba e Allen (2003).

2.8 Análises estatísticas

O experimento foi conduzido em delineamento em quadrado latino 5×5 . Os dados foram analisados utilizando o procedimento PROC MIXED do software SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, 2012, versão 9.4; SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA). O modelo matemático utilizado foi:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + P_j + A_k + E_{ijk},$$

em que Y_{ijk} é a variável dependente, μ é a média geral, T_i é o efeito fixo do tratamento (nível de substituição), P_j é o efeito aleatório do período, A_k é o efeito aleatório do animal, e E_{ijk} é o erro residual.

As médias dos diferentes níveis de substituição foram comparadas por meio do desdobramento da soma dos quadrados dos tratamentos em contrastes polinomiais, com ajustes de equações de regressão. Os efeitos lineares e quadráticos foram considerados significativos quando $P < 0,05$.

3 RESULTADOS

O consumo de MS e nutrientes, a digestibilidade e o comportamento ingestivo não foram influenciados pela substituição ($P > 0,05$) (Tabela 3). Houve aumento linear ($P=0,02$) no consumo de CNF (Tabela 3).

Os pools ruminais de MS, FDNcp, FDNi e taxas ingestão, degradação e de passagem não foram influenciados pela substituição ($P>0,05$) (Tabela 3).

Tabela 3. Consumo de nutrientes, digestibilidade e comportamento ingestivo em função da substituição de FS por M-USA na dieta para ovinos.

Parâmetros	Nível de substituição (g/kg ⁻¹ MS)					⁵ EPM	Valor de P ²	
	0,0	250,0	500,0	750,0	1000,0		⁶ L	⁷ Q
Consumo de matéria seca e nutrientes (g/dia)								
Matéria seca	1621	1635	1643	1556	1525	15,38	0,436	0,648
Matéria seca %PC ¹	3,59	3,78	3,70	3,39	3,14	43,94	0,056	0,138
Proteína bruta	238	239	234	223	215	23,78	0,222	0,700

FDNcp ²	629	649	631	609	597	71,78	0,455	0,671
CNF ³	497	542	603	605	641	58,79	0,020 ³	0,643
ME (Mcal/dia) ⁴	3,67	3,90	4,21	3,92	3,96	10,10	0,353	0,209
Digestibilidade da matéria seca e nutrientes (g/kg)								
Matéria seca	701	719	743	715	718	25,41	0,678	0,369
Proteína bruta	789	821	845	819	823	16,27	0,178	0,071
FDNcp	415	464	486	448	457	53,18	0,679	0,477
CNF	885	897	918	906	911	14,59	0,138	0,328
Comportamento ingestivo (min/d ⁻¹)								
Alimentação	228	224	236	208	202	24,55	0,360	0,614
Ruminação	552	492	552	504	480	34,2	0,246	0,783
Ócio	660	724	652	726	758	36,17	0,080	0,516
Eficiência de alimentação e ruminação (g/h ⁻¹)								
Alimentação - MS	427	438	418	449	453	64,46	0,979	0,495
Alimentação - FDNcp	166	174	160	176	177	26,02	0,996	0,498
Ruminação - MS	176	199	179	185	191	20,94	0,941	0,953
Ruminação - FDNcp	68	79	69	73	75	93,70	0,949	0,993

¹Peso corporal; ²Fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteína; ³ Carboidratos não fibrosos; ⁴ Energia metabolizável; ⁵Erro padrão da média; ⁶efeito linear; ⁷Efeito quadrático.

Tabela 4. Dinâmica ruminal em função da substituição de FS por USA em dietas para ovinos.

Parâmetros	Nível de substituição (g kg ⁻¹ MS)					¹ EPM	Valor de P ²	
	0,0	250,0	500,0	750,0	1000,0		² L	³ Q
Pool Ruminal (g)								
MS ⁴	684	653	665	667	650	73,89	0,114	0,166
FDNcp ⁵	422	426	418	426	401	49,93	0,122	0,168
FDNi ⁶	309	263	276	267	295	34,53	0,126	0,607
Matéria seca (h ⁻¹)								
Ki ⁷	0,098	0,108	0,106	0,101	0,097	0,01	0,168	0,293
Kp ⁸	0,030	0,038	0,034	0,032	0,029	0,00	0,312	0,845
Kd ⁹	0,068	0,070	0,072	0,069	0,069	0,01	0,130	0,132
Fibra em detergente neutro (h ⁻¹)								
Ki	0,061	0,066	0,064	0,065	0,061	0,00	0,176	0,267
Kp	0,019	0,025	0,022	0,023	0,019	0,01	0,246	0,963
Kd	0,042	0,040	0,042	0,043	0,042	0,01	0,147	0,111
Fibra em detergente neutro indigestível (h ⁻¹)								
Kpi	0,037	0,047	0,038	0,037	0,032	0,01	0,434	0,585

¹Erro padrão da média; ²Efeito linear; ³Efeito quadrático; ⁴Matéria seca; ⁵Fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteínas; ⁶ Fibra em detergente neutro indigestível; ⁷Taxa de ingestão; ⁸Taxa de passagem; ⁹Taxa de degradação

4 DISCUSSÃO

A substituição total do farelo de soja (FS) por mistura de ureia e sulfato de amônio (M-USA) resultou em uma ingestão média diária de 41 g/animal de M-USA (sendo 37 g de ureia e 4 g de sulfato de amônio), o que corresponde a uma ingestão de ureia de 79 g/100 kg de peso corporal, valor consideravelmente superior aos 50 g/100 kg de peso corporal

recomendados por Guimarães Júnior (2016). Segundo Kertz (2010), esse nível elevado pode reduzir a ingestão de matéria seca (MS) devido à menor palatabilidade, além de aumentar o risco de toxicidade por amônia.

Ensaio realizado por Word et al. (1969) e Bartley et al. (1981), com o objetivo de determinar a toxicidade da amônia a partir de altas ingestões de ureia, demonstraram sinais de toxicidade quando os animais foram alimentados com 44–50 g de ureia/100 kg de peso corporal.

Apesar da alta ingestão de ureia neste experimento, a ingestão de MS, e consequentemente de nutrientes, não foi afetada, e nenhum sinal de toxicidade por amônia foi observado. KERTZ (2010) indicou que, sob determinadas condições nutricionais, é possível exceder com segurança os níveis de 44–50 g de ureia/100 kg de peso corporal.

Neste estudo, nenhum efeito prejudicial foi observado na ingestão de MS em razão da alta ingestão de M-USA, possivelmente em virtude da elevada inclusão de palma forrageira na dieta (500 g/kg de MS) e dos níveis crescentes de milho moído, que aumentaram o teor de carboidratos não fibrosos (CNF) na dieta (Tabela 2), favorecendo a utilização do nitrogênio no rúmen (MORA-LUNA et al., 2022).

KERTZ (2010) recomendou que até 30% da exigência total de proteína da dieta poderia ser suprida por fontes de nitrogênio não proteico (NNP) adicionadas, dependendo de outras condições nutricionais.

Contrariando parte da literatura, a inclusão máxima de ureia neste estudo (27 g/kg de MS) resultou em uma substituição aproximada de 53% da proteína total da dieta, sendo que 82,4% do nitrogênio proteico do FS foi substituído por NNP.

Em contraste, SANTOS et al. (2020) relataram que a inclusão de 31 g/kg de MS de M-USA em dietas de ovinos alimentados com palma forrageira (380 g/kg de MS) reduziu a ingestão em 20%. De forma semelhante, WANG et al. (2016) observaram redução na ingestão de MS quando a ureia representou 2,5% da dieta.

O aumento na ingestão de CNF era esperado, uma vez que o milho moído apresenta maior teor de CNF em comparação ao farelo de soja (FS), o que resultou em

elevação no teor de CNF da dieta após a substituição. A digestibilidade da matéria seca (MS) e de seus constituintes não foi afetada, provavelmente devido à substituição do FS por milho moído, pois esses ingredientes apresentam teores semelhantes de nutrientes digestíveis totais (NDT) (VALADARES FILHO et al., 2020). Embora fosse esperado um aumento na digestibilidade da proteína, em virtude do maior fornecimento de proteína degradável no rúmen pela ureia, a digestibilidade da proteína não foi influenciada pela substituição do FS por M-USA.

A similaridade no tempo gasto em alimentação entre os níveis de substituição do FS, mesmo com o elevado teor de ureia e sulfato de amônio (USA) na maior inclusão de M-USA, pode ser atribuída à presença da palma forrageira, que foi processada em máquina forrageira, expondo sua mucilagem. Essa mucilagem permitiu a adesão de componentes menos palatáveis da ração, como o USA e o bagaço de cana (SIQUEIRA et al., 2021), mascarando o sabor do USA e facilitando níveis elevados de consumo sem rejeição pelos animais.

O tempo gasto em ruminação está intimamente relacionado ao tamanho das partículas e ao teor de fibra em detergente neutro (FDN) da dieta (BEAUCHEMIN, 1991). Neste estudo, o teor de FDN foi semelhante entre as dietas (420 g/kg de MS; Tabela 2), o que pode explicar a similaridade observada no tempo de ruminação. Também não foram observadas mudanças no tempo gasto em outras atividades (ócio) após a substituição do FS (Tabela 3), o que é coerente com a ausência de efeitos sobre os tempos de alimentação e ruminação.

As eficiências de alimentação e ruminação foram calculadas com base na ingestão de MS e FDN. Como não houve efeito significativo sobre essas duas variáveis, a similaridade nas eficiências era esperada.

Segundo Gregorini et al. (2018), o conteúdo de MS (FDN e fração solúvel) e o teor de água da ração contribuem para formar um *match ruminal*. Além disso, os autores indicam que o padrão de ingestão, mastigação e salivação influencia significativamente os tempos de retenção ruminal e, conseqüentemente, a digestibilidade da dieta. Dessa forma, a ausência de resposta nos *pools* ruminais (MS, FDN e FDN indigestível – FDNi), bem

como nas taxas de passagem e degradação da MS e FDN, em decorrência da substituição do FS por M-USA, provavelmente se deve à similaridade entre os tratamentos quanto ao teor de MS (150 g de MS/kg de peso corporal) e às frações fibrosas das dietas (médias de FDN e FDNi de 423 e 203 g/kg de MS, respectivamente; Tabela 2).

Adicionalmente, devido à semelhança no tempo de ruminação — que envolve mastigação e salivação — entre os níveis de substituição do FS, não houve alteração no tamanho das partículas, o que, por sua vez, não levou a um aumento nas taxas de passagem.

4 CONCLUSÃO

A substituição total de farelo de soja (172 g/kg MS) por uma mistura de milho muído, ureia e sulfato de amônia (5,4:1) pode ser realizada em ovinos alimentados com dietas ricas em palma forrageira (500 g/kg MS), uma vez que não altera a ingestão de nutrientes, a digestibilidade, o comportamento ingestivo ou a dinâmica ruminal.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOAC INTERNATIONAL. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. 17. ed. Gaithersburg, MD: AOAC, 2000.

BARTLEY, E. E. et al. Ammonia toxicity in cattle. V. Ammonia concentration of lymph and portal, carotid and jugular blood after the ingestion of urea. *Journal of Animal Science*, v. 53, n. 2, p. 494–498, 1981.

BATISTA, A. M. et al. Effects of variety on chemical composition, in situ nutrient disappearance and in vitro gas production of spineless cacti. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 83, n. 6, p. 440–445, 2003.

BEAUCHEMIN, K. A. Ingestion and mastication of feed by dairy cattle. *The Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, v. 7, n. 3, p. 439–463, 1991.

BÜRGER, P. J. et al. Ingestive behavior in Holstein calves fed diets with different concentrate levels. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 29, n. 9, p. 236, 2000.

DETMANN, E.; VALADARES FILHO, S. C. On the estimation of non-fibrous carbohydrates in feeds and diets. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e*

Zootecnia, v. 62, n. 12, p. 980–984, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0102-09352010000400030>.

GREGORINI, P. et al. Dynamics of forage ingestion, oral processing and digesta outflow from the rumen: a development in a mechanistic model of a grazing ruminant, MINDY. *Journal of Agricultural Science*, v. 156, n. 1, p. 980–995, 2018.

GUIMARÃES JÚNIOR, R. et al. Informações gerais. *Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia*, 2016.

HADDAD, C. M. Urea in dietary supplements. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS, 1984, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: FEALQ, 1984. p. 119–141.

KARLSSON, J. O. et al. Halting European Union soybean feed imports favors ruminants over pigs and poultry. *Nature Food*, v. 2, n. 1, p. 38–46, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00203-7>.

KERTZ, A. F. Review: Urea feeding to dairy cattle: a historical perspective and review. *The Professional Animal Scientist*, v. 26, n. 7, p. 257–272, 2010.

KREHBIEL, C. R. et al. Nitrogen and protein utilization in ruminants. *Journal of Animal Science*, Champaign, v. 76, suppl. 1, p. 19–30, 1998. DOI: https://doi.org/10.2527/1998.761suppl_119x.

KRIZSAN, S. J.; HUHTANEN, P. Effect of diet composition and incubation time on feed indigestible neutral detergent fiber concentration in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, v. 96, n. 6, p. 1715–1726, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5752>.

LAZZARINI, I. et al. Intake and digestibility in cattle fed low-quality tropical forage and supplemented with nitrogenous compounds. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, n. 2, p. 2021–2030, 2009.

LICITRA, G.; HERNANDEZ, T. M.; VAN SOEST, P. J. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, v. 57, n. 3, p. 347–358, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(95\)00837-3](https://doi.org/10.1016/0377-8401(95)00837-3).

MARTIN, P.; BATESON, P. *Measuring behaviour: an introductory guide*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

MELO, T. T. et al. Effect of replacing soybean meal by a blend of ground corn and urea-ammonium sulphate on milk production and composition, digestibility and N balance of dairy Murrah buffaloes. *Journal of Dairy Research*, v. 89, n. 2, p. 134–140, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/S002202992200036X>.

MERTENS, D. R. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beakers or crucibles: collaborative study. *Journal of AOAC International*, v. 85, n. 8, p. 1217–1240, 2002.

MORA-LUNA, R. E. et al. Spineless cactus plus urea and Tifton-85 Hay: maximizing the digestible organic matter intake, ruminal fermentation, and nitrogen utilization of wethers in semi-arid regions. *Animals*, v. 12, n. 3, p. 401, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12030401>.

NICHOLS, K. et al. Review: Unlocking the limitations of urea supply in ruminant diets by considering the natural mechanism of endogenous urea secretion. *Animal*, v. 16, n. 1, p. 100537, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100537>.

NRC – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Nutrient requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids, and New World camelids*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2007.

OBA, M.; ALLEN, M. S. Effects of corn grain conservation method on ruminal digestion kinetics for lactating dairy cows at two dietary starch concentrations. *Journal of Dairy Science*, v. 86, n. 1, p. 184–194, 2003. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-02\(03\)73599-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-02(03)73599-1).

ROBINSON, P. H.; TAMMINGA, S.; VAN VUUREN, A. M. Influence of declining level of feed intake and varying the proportion of starch in the concentrate on milk production and whole tract digestibility in dairy cows. *Livestock Production Science*, v. 17, n. 6, p. 37–62, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(87\)90050-9](https://doi.org/10.1016/0301-6226(87)90050-9).

SANTOS, F. A. P. et al. Metabolismo do nitrogênio em ruminantes e eficiência de sua utilização. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Viçosa, v. 39, supl. especial, p. 246–256, 2010.

SANTOS, K. C. et al. Can urea associated with alternative carbohydrate sources replace conventional concentrate for lambs? *Livestock Science*, v. 239, 104172, 2020.

SILVA, C. S. et al. Full-fat corn germ improves the performance and milk fat yield of Girolando cows fed sugarcane bagasse and cactus cladodes as forage sources. *Tropical Animal Health and Production*, v. 56, n. 2, p. 104, 2024.

SIQUEIRA, M. et al. Nutritive value, in vitro fermentation, and methane production of cactus cladodes, sugarcane bagasse, and crea. *Animals*, v. 11, n. 5, p. 1266, 2021.

SIQUEIRA, M. C. B. et al. Cactus cladodes *Opuntia* or *Nopalea* and by-product of low nutritional value as solutions to forage shortages in semiarid areas. *Animals*, v. 12, n. 22, p. 3182, 2022.

SNIFFEN, C. J. et al. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, v. 70, n. 11, p. 3562–3577, 1992.

TAMMINGA, S. et al. Rumen ingesta kinetics of cell wall components in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, v. 25, n. 1–2, p. 89–98, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(89\)90110-7](https://doi.org/10.1016/0377-8401(89)90110-7).

VALADARES FILHO, S. C. et al. *Tabelas brasileiras de composição de alimentos para bovinos (BR-CORTE): composição de alimentos, exigências nutricionais e desempenho de bovinos de corte*. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2020. 267 p.

VALENTE, T. N. P. et al. In situ estimation of indigestible compounds contents in cattle feed and feces using bags made from different textiles. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, n. 3, p. 666–675, 2011a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000300027>.

VALENTE, T. N. P. et al. In situ estimation of indigestible compounds contents in cattle feed and feces using bags made from different textiles. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, p. 666–675, 2011b. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1516-35982011000300027>.

VÉRAS, R. M. L. et al. Suplementação com fontes de nitrogênio não-proteico em dietas para ruminantes. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, Salvador, v. 9, n. 1, p. 16–26, 2008.

WANG, B. L. et al. Effect of urea supplementation on performance and safety in diets of Dorper crossbred sheep. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, v. 100, n. 5, p. 902–910, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpn.12417>.

WORD, J. D. et al. Urea toxicity studies in the bovine. *Journal of Animal Science*, v. 29, n. 1, p. 786–791, 1969.

CAPÍTULO III

O farelo de soja pode ser substituído por uma mistura de milho moído, ureia e sulfato de amônia para ovinos alimentadas com dietas ricas em palma forrageira?

RESUMO

Objetivou-se avaliar o efeito da substituição (0, 250, 500, 750 e 1.000 g kg⁻¹) do farelo de soja (FS) por uma mistura de milho moído e ureia-sulfato de amônia (M-USA) em dietas com alta proporção de palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), sobre o consumo de MS e nutrientes, balanço de nitrogênio, pH ruminal e nitrogênio amoniacal (N-NH₃). Cinco ovinos mestiços, não castrados, fistulados e canulados no rúmen, com peso corporal médio de 47,2 ± 9,7 kg, foram distribuídos em quadrado latino 5×5. Não houve efeito da substituição sobre consumo de nitrogênio (36,96g/dia) e nutrientes digestíveis totais (1087g/dia). O nitrogênio (N) consumido (36,39g/dia), N urinário (14,4g/dia), N absorvido (30,4g/dia), balanço de N (16,7g/dia), bem como o nitrogênio ureico no plasma (NUP;16,61mg/dL) e nitrogênio ureico urinário (NUU;10,29 g/dia) não foram alterados com a substituição. O N fecal diminuiu linearmente com a substituição. O pH ruminal não foi alterado com a substituição do FS por M-USA. No entanto, em função dos horários de coleta, o pH ruminal apresentou comportamento quadrático, com pH mínimo de 6,34 no tempo de 5h:29min. Houve interação para o N-NH₃ entre os níveis de substituição e horários de coleta. Na 0h, a maior concentração de N-NH₃ (24,03mg/dL) foi observado para o nível 0g/kgMS de substituição. Após as 2h do fornecimento da dieta, a maior concentração de N-NH₃ (42,88mg/dL), foi observada para o nível 750g/kgMS. As 4h e 6h, após o fornecimento da dieta, as maiores concentrações de N- NH₃ (21,43 e 19,83mg/dL) foram observadas para o nível na dieta de 1000 g/KgMS. Às 8h, após o fornecimento da dieta, a maior concentração de N-NH₃ (9,67mg/dL) foi observada para nível de 500g/kgMS. Conclui-se que o FS pode ser totalmente substituído por M-USA, acima dos níveis recomendados na literatura, sem afetar o consumo de N e NDT, o balanço de nitrogênio, o pH ruminal e os níveis de amônia dentro dos limites preconizados para ovinos.

Palavras-chave: Cactáceas. Concentrado. Semiárido. Eficiência N. Nitrogênio não proteico. *Opuntia sp.*

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of replacing soybean meal (SM) with urea plus corn (UPC) at levels of 0.0, 250.0, 500.0, 750.0, and 1000.0 g/kg of dry matter (DM) in diets containing a high proportion of cactus (*Opuntia stricta* [Haw.] Haw) on dry matter and nutrient intake, nitrogen balance, ruminal pH, and ammonia nitrogen (NH₃-N). Five rumen-fistulated, crossbred, non-castrated sheep with an average body weight of 47.2 ± 9.7 kg were assigned to a 5×5 Latin square design. No significant effect of SM replacement with UPC was observed on the intake of DM (1596 g/day), organic matter (OM: 1470 g/day), or crude protein (CP: 230 g/day). Nitrogen intake (36.39 g/day), urinary nitrogen excretion (14.4 g/day), absorbed nitrogen (30.4 g/day), retained nitrogen (16.7 g/day), nitrogen retention (45.5% of intake), plasma urea nitrogen (PUN: 16.61 mg/dL), and urinary urea nitrogen (UUN: 10.29 g/day) were also not affected. However, fecal nitrogen excretion decreased linearly with increasing levels of replacement. Ruminal pH was not affected by the replacement of SM with UPC (mean pH: 6.6), although it exhibited a quadratic pattern over time, reaching a minimum value (6.34) at 5 hours and 29 minutes post-feeding. There was a significant interaction between SM replacement levels and sampling times for NH₃-N concentration. At time 0, the highest NH₃-N concentration (24.03 mg/dL) was observed at the 0.0 g/kg DM replacement level. Two hours post-feeding, all replacement levels showed increased NH₃-N concentrations, with the highest value (42.88 mg/dL) at the 750.0 g/kg DM level. At 4 and 6 hours post-feeding, the highest NH₃-N concentrations were observed with the 1000.0 g/kg DM diet (21.43 and 19.83 mg/dL, respectively). At 8 hours, the highest concentration (9.67 mg/dL) was observed in animals fed the 500.0 g/kg DM diet. It is recommended that SM be fully replaced by UPC in sheep diets, as it does not negatively affect DM or nutrient intake.

Keywords: Cactaceae. Concentrated. Semiarid. N-efficiency. Non-protein nitrogen. *Opuntia sp.*

1. INTRODUÇÃO

O farelo de soja (FS) é amplamente utilizado na alimentação animal devido à sua proteína de alto valor biológico. No entanto, está sujeito a oscilações de preços e à demanda do mercado internacional, tornando sua incorporação economicamente desafiadora na dieta de ruminantes (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2019). Além disso, surgem preocupações éticas e ambientais diante da intensa exploração das culturas de soja em áreas de floresta tropical e da competição com o abastecimento alimentar humano.

Diante desses desafios e das crescentes preocupações com as mudanças climáticas em escala global, a utilização de ingredientes não comestíveis na alimentação de ruminantes representa uma estratégia fundamental para promover a sustentabilidade na produção de alimentos. Essa abordagem reduz a competição entre alimentos destinados ao consumo humano e à alimentação animal, favorecendo o aproveitamento de resíduos e subprodutos agroindustriais, como cascas e fontes alternativas de nitrogênio.

Nesse contexto, destaca-se o uso da ureia como uma fonte eficiente de nitrogênio não proteico (NNP), amplamente disponível e de baixo custo, que pode substituir parcial ou totalmente fontes proteicas convencionais, como o farelo de soja, sem comprometer o desempenho animal quando associada a uma fonte de energia de liberação rápida. Além de melhorar a eficiência da dieta, a ureia contribui para a redução dos impactos ambientais da pecuária, ao diminuir a necessidade de cultivo de grãos proteicos e, consequentemente, o uso de áreas agrícolas e emissões associadas (VAN SOEST, 1994; GERBER et al., 2013; PIRES et al., 2010; MOTTET et al., 2017).

Além disso, a substituição de proteínas verdadeiras por NNP, como a ureia, pode trazer benefícios sustentáveis à produção pecuária. A ureia, prontamente disponível como NNP, estimula o crescimento microbiano no rúmen, sendo convertida em proteína de alto valor biológico (GERASSEV et al., 2013). No ambiente ruminal, a principal fonte de nitrogênio para as bactérias celulolíticas é a amônia (NH_3), enquanto para as bactérias fermentadoras de carboidratos não fibrosos (CNF), as principais fontes são a amônia (NH_3), os peptídeos e os aminoácidos.

Dessa forma, dietas que fornecem NNP no rúmen podem melhorar a nutrição dos diferentes grupos de microrganismos, maximizando a síntese de proteína microbiana

(Nmic). Para que ocorra essa síntese e o aproveitamento do N-NH₃, é necessário haver disponibilidade de energia em sincronia com a degradação da proteína no rúmen (VAN SOEST, 1994). O excesso de NH₃ em dietas com baixo fornecimento de energia fermentável pode resultar em elevadas perdas de nitrogênio na urina, além de representar riscos de intoxicação por acúmulo de amônia no organismo (BAKER et al., 1995).

Nesse sentido, o uso de ureia como fonte de NNP exige especial atenção ao balanceamento entre o fornecimento de nitrogênio e de carboidratos de rápida fermentação no rúmen. A sincronia entre a liberação de nitrogênio e energia é fundamental para maximizar a síntese de proteína microbiana e minimizar perdas de nitrogênio no ambiente (SINCLAIR et al., 1993; RUSSELL et al., 1992). Dietas bem equilibradas aumentam a eficiência de utilização do nitrogênio pelos microrganismos ruminais, promovem melhor desempenho animal e reduzem a excreção de nitrogênio pela urina, principal via de perda de N e de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x e N₂O) na pecuária (HUHTANEN et al., 2008; TEDESCHI et al., 2007).

Os níveis ideais de inclusão de ureia nas dietas de ruminantes têm sido debatidos na literatura, com recomendações conservadoras sugerindo cerca de 1 % a 2 % de inclusão com base na matéria seca total (HADDAD, 1984; VELLOSO, 1984). No entanto, observou-se que níveis de até 2,5 % de ureia, combinados com palma forrageira, não afetaram negativamente os parâmetros ruminais. Pelo contrário, melhoraram a síntese de proteína microbiana e a eficiência do uso do nitrogênio nas dietas de novilhos (CONCEIÇÃO et al., 2018).

Assim, hipotetizou-se que a alimentação de ovinos com altos níveis de ureia excedendo as recomendações da literatura, combinada com dieta à base de milho moído e alta proporção de palma forrageira, não impactaria negativamente os parâmetros ruminais do metabolismo do nitrogênio. Objetivou-se avaliar o impacto da substituição do farelo de soja por ureia e milho moído em dietas com altas proporções de palma forrageira sobre o consumo de nutrientes digestíveis totais, o balanço de nitrogênio, os teores de nitrogênio plasmático e ureico, o pH ruminal e os níveis ruminais de NH₃-N.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local e licença para condução do estudo

O experimento foi conduzido no Laboratório de Avaliação de Alimentos para Pequenos Ruminantes II, do Departamento de Zootecnia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em Recife, Brasil, localizado na latitude -8,05428, longitude -34,8813, 8° 3' 15" Sul, 34° 52' 53" Oeste, e a uma altitude de 7 m. De acordo com a classificação de Köppen, o clima do município é tropical úmido (Aw) (KÖPPEN; GEIGER, 1928). Os protocolos experimentais para o uso de animais foram aprovados pelo Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA) da UFRPE, sob licença nº 5024280322.

2.2. Animais e instalações

Foram utilizados cinco ovinos machos, sem padrão racial definido, fistulados no rúmen, com peso corporal médio de 47,2 kg ($\pm$ 9,7 kg). Os animais foram alojados em um galpão coberto, em baias individuais suspensas ($0,93 \times 1,54$ m), construídas com ripas de madeira, providas de comedouros e bebedouros. Os animais passaram por um período de adaptação de 15 dias ao manejo, às instalações e aos ingredientes das dietas.

2.3. Delineamento experimental

Os animais foram distribuídos em um delineamento em quadrado latino 5×5 , com cinco períodos experimentais de 21 dias, sendo 14 dias destinados à adaptação às dietas e 7 dias à coleta de dados e amostras, totalizando 105 dias de estudo.

2.4. Dietas experimentais

As dietas foram fornecidas ad libitum, na forma de ração total, com relação volumoso:concentrado de 80:20, permitindo sobras de aproximadamente 100,0 g kg⁻¹ de matéria seca (MS). As dietas experimentais consistiram na substituição de 0,0; 250,0; 500,0; 750,0 e 1.000,0 g kg⁻¹ de MS do farelo de soja por uma mistura de ureia e fubá de milho, com base na MS (Tabela 2). A palma forrageira foi processada diariamente em máquina forrageira, e seu teor de MS foi avaliado semanalmente para ajuste da quantidade de ração fornecida aos animais.

A alimentação foi oferecida às 08h00 e às 16h00, sendo as dietas pesadas diariamente antes do fornecimento matutino, com o objetivo de calcular a ingestão de alimentos pelos animais. A composição químico-bromatológica e a proporção dos ingredientes estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos ingredientes

Itens	Ingredientes (g kg ⁻¹ MS)				
	Palma Forrageira	Bagaço de cana-de-açúcar	Farelo de Soja	Fubá de Milho	Ureia
Matéria seca	83,1	927,1	881,7	887,7	965,0
Matéria orgânica	929,2	965,1	939,5	975,7	990,0
Proteína bruta	86,8	19,0	507,1	80,6	2650,2
Extrato etéreo	16,5	15,4	21,3	74,0	-
FDNcp ^a	271,9	858,5	184,4	173,0	-
Carboidratos não fibrosos	554,1	72,2	226,6	648,1	-

^a Fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteínas

Tabela 2. Proporções dos ingredientes e composição química das dietas

Ingredientes (g kg ⁻¹ MS)	Nível de substituição (g kg ⁻¹ MS)				
	0,0	250,0	500,0	750,0	1000,0
Palma forrageira OEM	508,7	508,3	507,8	507,4	507,0
Bagaço de cana-de-açúcar	299,2	299,0	298,7	298,5	298,2
Farelo de Soja	171,9	129,3	86,5	43,4	0,0
Fubá de milho	0,0	36,5	73,2	110,1	147,3
Sal comum	5,0	5,1	5,1	5,1	5,1
Mistura mineral	15,1	15,2	15,2	15,3	15,3
Ureia: sulfato de amônia ^a	0,0	6,71	13,5	20,3	27,1
Composição química (g kg ⁻¹ de MS)					
Matéria Seca	150,1	150,2	150,3	150,5	150,6
Matéria Orgânica	924,6	926,2	927,8	929,4	931,0
Proteína Bruta	137,0	136,1	135,2	134,3	133,4
Extrato Etéreo	16,7	18,4	20,2	22,0	23,8
FDNcp ^b	426,9	425,0	423,1	421,2	419,3
Carboidrato não fibroso	344,0	372,2	400,5	429,1	457,8
NDT ^c	518,5	549,8	581,3	612,9	644,8

^a9 partes de ureia e 1 parte de sulfato de amônia; ^b Fibra em detergente neutro corrigida para cinzas; proteínas,

^cNutrientes digestíveis totais

2.5. Consumo de nutrientes e balanço de nitrogênio

O consumo de nutrientes foi estimado pela diferença entre as quantidades de ração fornecida e de sobras ao longo do período experimental. Do 16º ao 18º dia de cada período experimental, foi realizada a coleta total de fezes, utilizando bolsas coletoras fixadas ao corpo dos animais, para estimar o nitrogênio excretado. O consumo de NDT foi calculado de acordo com Sniffen et al. (1992). O balanço de nitrogênio foi obtido por meio da diferença entre o nitrogênio consumido e o excretado nas fezes e urina, de acordo com a equação: Balanço de N (g/d) = N consumido (g/d) - [N excretado nas fezes (g/d) + N excretado na urina (g/d)].

2.6. Coleta e processamento de urina e sangue

Nesse mesmo período (16º ao 18º dia), a urina total foi coletada conforme o método descrito por Chen e Gomes (1992). No 19º dia de cada período experimental, quatro horas após a alimentação matinal, foram coletadas amostras de sangue por punção da veia jugular, utilizando agulhas descartáveis (21 mm × 1 mm) (Vacurette®, Greiner Bio-One, Áustria) e tubos Vacurette® com anticoagulante (heparina). Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 15 minutos para obtenção do plasma, que foi armazenado em tubos Eppendorf, devidamente identificados e congelados a -20 °C até a análise. As concentrações de nitrogênio ureico plasmático e urinário foram determinadas com kits comerciais LABTEST®, conforme as instruções do fabricante.

2.7. Parâmetros ruminais

No 19º dia de cada período experimental, às 0, 2, 4 e 6 horas após a alimentação matinal, foram coletadas amostras do conteúdo ruminal, por meio de cânula ruminal, para determinação do pH e da concentração de N-NH₃. O pH foi medido com potenciômetro (Kasavi, Modelo K39-0014 P, Taiwan). As análises de N-NH₃ foram realizadas conforme o método descrito por Detmann et al. (2012).

2.8. Coleta de amostras, composição química e cálculos

Durante os dias de coleta, amostras de forragem, concentrado, sobras e fezes foram armazenadas em sacos plásticos a -20 °C. Ao final do experimento, as amostras foram secas em estufa a 55 °C por 72 horas e moídas para passarem por peneira de 1 mm,

sendo então utilizadas nas análises químicas. As análises de matéria seca (MS), cinzas, proteína bruta (PB) e extrato etéreo foram realizadas conforme AOAC (2012). A fibra em detergente neutro (FDN) foi determinada segundo Van Soest et al. (1991). A FDN corrigida para cinzas e proteína (FDNcp) foi obtida conforme Mertens (2002) e Licitra et al. (1996). Os carboidratos não fibrosos (CNF) foram estimados pela equação proposta por Hall (2000).

2.9. Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento em quadrado latino 5×5 . Os dados foram analisados por meio do procedimento MIXED do software SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, 2012 – Versão 9.4; SAS Inst., Inc., NC, EUA). O modelo estatístico utilizado foi:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + P_j + A_k + E_{ijk},$$

Em que Y_{ijk} é a variável dependente, μ é a média geral, T_i é o efeito fixo da dieta i , P_j é o efeito aleatório do período j , A_k é o efeito aleatório do animal k , e E_{ijk} representa o erro residual.

As médias dos diferentes níveis de substituição foram comparadas por meio do desdobramento da soma dos quadrados dos tratamentos em contrastes polinomiais e ajustes de equações de regressão. Efeitos lineares e quadráticos foram considerados significativos quando $P < 0,05$.

3. RESULTADOS

O consumo de NDT (kg/dia), de nitrogênio (N), o N absorvido, o N retido, o N urinário, o balanço de nitrogênio, o nitrogênio ureico plasmático (NUP) e o nitrogênio ureico urinário (UUN) não foram alterados pela substituição do farelo de soja (FS) por ureia mais milho (M-USA) ($P > 0,05$) (Tabela 3).

Tabela 3. Consumo de NDT, nitrogênio e balanço de nitrogênio em função da substituição do farelo de soja por ureia mais milho na dieta de ovinos.

Parâmetros	Níveis de substituição (g/kg MS)					EPM ²	Valor de P ¹	
	0,0	250,0	500,0	750,0	1000,0		L	Q
Consumo e Balanço de Nitrogênio (g/dia)								
CNDT	1016	1078	1163	1085	1095	0,10	0,353	0,209
N consumido	38,1	38,3	37,4	35,7	35,3	3,69	0,312	0,845
N fecal	8,30	6,89	5,78	6,32	5,39	0,91	0,026 ⁴	0,396
N urinário	16,2	12,4	14,0	14,0	15,4	1,79	0,975	0,169
N absorvido	29,8	31,4	31,6	29,3	29,9	3,08	0,763	0,560
N balanço	15,3	19,1	18,0	16,6	14,5	2,31	0,538	0,124
N balanço (%CON) ⁵	41,9	49,0	48,4	48,0	40,4	5,42	0,820	0,163
Eficiência de compostos nitrogenados (g/dia)								
NUP	16,2	17,1	17,2	15,6	16,9	1,66	0,976	0,883
NUU	11,4	10,5	8,4	10,1	11,0	2,67	0,831	0,325

¹L: Efeito linear; Q: Efeito quadrática; ²EPM: Erro padrão da média; ³y:0,5074+0,0014x⁴y: 7,817-0,0256x⁵ CNDT: Consumo de nutrientes digestíveis total;

O pH ruminal não alterou com a substituição, entretanto, em relação aos horários de coleta, o pH apresentou resposta quadrática (P < 0,05), com pH mínimo de 6,34 às 5,29 h após a alimentação matinal (Tabela 4).

Tabela 4. pH ruminal e concentração de N-NH₃ (mg/dL) em função da substituição do farelo de soja por ureia mais milho na dieta de ovinos.

Parâmetros	Níveis de substituição (g kg ⁻¹ MS)					EPM ²	Valor de P ¹		
	0	250	500	750	1000		L	Q	R ³ x T ⁴
pH	6,55	6,47	6,52	6,63	6,58	0,093	0,333	0,704	0,859
N-NH ₃	13,2	14,8	18,8	19,7	20,2	1,31	<0,001	0,289	<0,001
Efeito do tempo (horas)									
	0	2	4	6	8				
pH	6,95	6,52	6,48	6,26	6,53	0,084	<0,001	<0,001 ⁵	-
N-NH ₃	16,8	31,0	18,3	13,6	6,96	1,087	<0,001	<0,001 ⁶	-

¹L: efeito linear; Q: efeito quadrática; ²EPM: erro padrão da média; ³R: Efeito da substituição; ⁴T: Efeito do tempo; ⁵y=6,9414-0,2264x+0,0214x²; ⁶y=19,953+2,9732x-0,6036x²

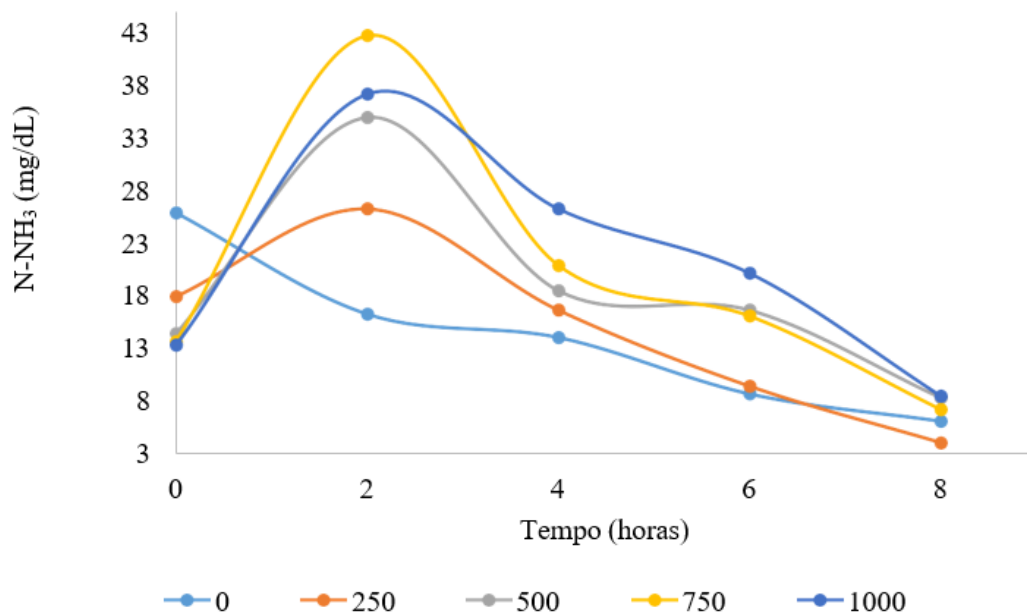


Figure 1. Efeito da interação nível de substituição × hora sobre a concentração de N-NH₃ em ovinos alimentados com substituição do FS em 0,0; 250,0; 500,0; 750,0 e 1000,0g/kg MS por M-USA.

A concentração de N-NH₃ apresentou interação significativa entre os níveis de substituição e os tempos de coleta ($P < 0,05$; Tabela 4). No tempo 0 (Figura 1), a maior concentração de N-NH₃ (24,03 mg/dL) foi observada no nível de substituição de 0 g/kg de MS, enquanto a menor (12,49 mg/dL) ocorreu no nível de 1000 g/kg de MS. Duas horas após a alimentação, todos os níveis de substituição apresentaram aumento na concentração de N-NH₃, sendo a maior (42,88 mg/dL) verificada no nível de 750 g/kg de MS. Nas 4 e 6 horas após a alimentação, as maiores concentrações de N-NH₃ (21,43 e 19,83 mg/dL, respectivamente) foram observadas no nível de 1000 g/kg de MS, e as menores (12,89 e 6,70 mg/dL, respectivamente) no nível de 0 g/kg de MS. Já às 8 horas, a maior concentração (9,67 mg/dL) foi observada no nível de 500 g/kg de MS, e a menor (3,90 mg/dL) no nível de 250 g/kg de MS.

4.DISCUSSÃO

Os consumos de NDT e de nitrogênio (Tabela 3) não foram alterados, possivelmente em razão das proporções de palma forrageira e bagaço de cana-de-açúcar

(500 e 300 g/dia, respectivamente), que promoveram fermentação adequada e mantiveram a saúde ruminal. A composição químico-bromatológica semelhante das dietas (Tabela 1) e a elevada proporção de palma (50%), ingrediente de alta aceitabilidade, também contribuíram para a estabilidade do consumo. Como as dietas foram fornecidas na forma de ração total, quaisquer efeitos negativos potenciais da ureia sobre a ingestão foram minimizados. Além disso, não se observou efeito sobre o consumo de nitrogênio, provavelmente porque as dietas eram isonitrogenadas (Tabela 2) e não houve alteração no consumo de matéria seca (MS).

A concentração de ureia plasmática está intimamente relacionada à ingestão de nitrogênio, pois reflete tanto a geração de amônia no rúmen quanto sua conversão em ureia no fígado (KOZLOSKI, 2019). Santos et al. (2011), Khattab et al. (2013) e Saro et al. (2019), ao substituírem farelo de soja por milho e ureia em dietas com diferentes volumosos, observaram aumento de nitrogênio ureico plasmático (NUP) e urinário (UUN). Wahyono et al. (2022), em meta-análise, constataram que a absorção de nitrogênio aumentou com o uso crescente de ureia. No presente estudo, no entanto, o nitrogênio absorvido e o NUP não foram afetados, o que pode estar relacionado à presença da palma forrageira, que permitiu maior inclusão de ureia sem impacto negativo.

Harmeyer e Martens (1980) demonstraram que a excreção urinária de nitrogênio depende principalmente da concentração plasmática de ureia. Como nesse trabalho não houve alteração nas concentrações plasmáticas de nitrogênio, não se observou efeito sobre o N ureico urinário. A alta proporção de palma forrageira utilizada pode ter sido determinante para essa estabilidade, uma vez que a rápida fermentação da pectina favorece a produção de energia para os microrganismos ruminais, o que contribui para uma melhor eficiência na síntese de nitrogênio microbiana, especialmente quando sincronizada com fontes de nitrogênio de liberação compatível, como a ureia (HALL et al., 2010; SOUZA et al., 2017).

A redução na excreção fecal de nitrogênio (Tabela 3) pode ser explicada pelo maior aproveitamento do N amoniacal pelos microrganismos (Nocek & Russell, 1988), uma vez que a energia liberada pela fermentação de carboidratos não fibrosos foi suficiente para assimilar o nitrogênio prontamente disponível (NNP) no rúmen. Já que, a palma

forrageira apresenta um perfil de carboidratos caracterizado por alta concentração de carboidratos solúveis de rápida fermentação, como a pectina, o que favorece a disponibilidade imediata de energia para os microrganismos ruminais (FERREIRA et al., 2009; LIRA et al., 2020). Esse perfil fermentativo torna a palma uma aliada estratégica no uso de fontes de nitrogênio não proteico, como a ureia, pois contribui para a sincronia entre a liberação de energia e nitrogênio no rúmen, fator essencial para promover a sincronia e favorecer o aproveitamento do nitrogênio, reduzindo perdas e aumentando a eficiência ruminal (ARAÚJO et al., 2020).

O balanço de nitrogênio (BN) acompanhou os resultados de excreção: quanto menor a perda de nitrogênio nas fezes e na urina, maior a retenção no organismo. O pH ruminal não se alterou (Tabela 4), graças ao tamponamento salivar e à proporção volumoso:concentrado mantida (VAN SOEST, 1994). Bactérias ruminais proliferam melhor em pH entre 5,5 e 7,0 (HOOVER & STOKES, 1991), com atividade máxima de celulolíticas entre 6,0 e 6,8 (SMITH et al., 1972).

O padrão de pH encontrado nesse trabalho se deve também a presença da pectina da palma forrageira que tem fermentação rápida e eficiente e que, confere à palma um elevado valor energético, com a vantagem de não promover queda significativa no pH ruminal, como ocorre com fontes ricas em amido (MEDEIROS et al., 2018). Isso contribui para a manutenção da estabilidade do ambiente ruminal e da atividade celulolítica (VALADARES FILHO et al., 2016). Pereira et al. (2020), ao incluírem 2,4% de ureia em dietas com 45% de palma, não observaram alteração no pH ruminal, atribuindo isso à alta proporção de palma, o que corrobora com os resultados deste estudo.

Ao contrário das fibras estruturais menos digestíveis, a pectina da palma forrageira é rapidamente fermentada no rúmen por bactérias fibroalíticas e amilolíticas, liberando ácidos graxos voláteis (AGVs), principalmente ácido acético, seguido de ácido propiônico e butírico (VAN SOEST, 1994; NRC, 2001). A queda gradual do pH após a alimentação, atingindo mínimo de 6,34 às 5h29, é normal devido à produção desses ácidos graxos voláteis; o posterior aumento deve-se à absorção desses ácidos pelo epitélio ruminal. Vale ressaltar que a fermentação da pectina ocorre sem formação significativa de

lactato, o que reduz o risco de acidose subclínica em dietas com alta inclusão de palma forrageira (BEZERRA et al., 2014).

A maior concentração de N-NH₃ ocorreu no nível de substituição de 750 g/kg de MS duas horas após a alimentação (Figura 1). Na substituição total (1000 g/kg MS), as concentrações permaneceram elevadas por mais tempo (4, 6 e 8 horas). Isso reflete a rápida degradação do NNP em comparação com as proteínas verdadeiras, cujas ligações peptídicas retardam a liberação de NH₃ (BARBOSA et al., 2012).

As maiores reduções de N-NH₃ nos níveis de 0 e 250 g/kg MS devem-se à menor solubilidade da proteína do FS. No entanto, às 0 h, a dieta com 0 g/kg MS (sem ureia) apresentou a maior concentração de NH₃, indicando que a proteína do FS demora mais para degradar e liberar amônia.

Em dietas com alto teor de ureia, a N-NH₃ inicial foi menor devido à alta solubilidade da ureia. Após o pico às 2 h, o aumento do pH favoreceu a forma ionizada NH₄⁺ (> 99% abaixo de pH 6,4), cuja captação bacteriana é facilitada, reduzindo o N-NH₃ (LU et al., 2014).

Contrariando recomendações, a inclusão máxima de 2,7% de ureia na MS substituiu aproximadamente 53% da PB total da dieta (recomendado até 35%) e 82,4% do N do FS por NNP. No concentrado, essa ureia correspondeu a 13,6% da MS, acima do limite de 5% sugerido por VELLOSO (1984), sem, contudo, afetar o consumo de MS.

O uso de ureia mostra-se alternativa rentável e sustentável, reduzindo a excreção de nitrogênio e, conseqüentemente, a contaminação do solo e as emissões de N₂O.

5.CONCLUSÃO

Conclui-se que o farelo de soja pode ser totalmente substituído por ureia mais milho, permitindo inclusão de até 2,7% de ureia na MS em dietas com alta proporção de palma forrageira, sem afetar o consumo de MS e nitrogênio, o balanço de nitrogênio, o pH ruminal ou as concentrações de amônia dentro dos limites aceitáveis para ovinos.

6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC. *Animal feed*. In: HELRICH, K. (Ed.). *Official methods of analysis*. 15th ed. Arlington, VA: Association of Official Analytical Chemists, 1990. p. 69-90.
- ARAÚJO, G. G. L. et al. Palma forrageira no Brasil: avanços na utilização e desafios futuros. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, Salvador, v. 21, p. 1–16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-99402020000100001>.
- BAKER, L.; FERGUSON, J. D.; CHALUPA, W. Responses in urea and true protein of milk to different protein feeding schemes for dairy cows. *Journal of Dairy Science*, v. 78, n. 11, p. 2424-2434, 1995. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76871-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76871-0).
- BARBOSA, J. G. et al. Use of different urea levels in the feeding of Alpine goats. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 41, p. 1713-1719, 2012.
- BEZERRA, L. R. et al. Fermentative characteristics and nutritional value of cactus pear silage associated with different roughage sources. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 43, n. 4, p. 204–210, 2014.
- CHEN, X. B. Estimation of microbial protein supply to sheep and cattle based on urinary excretion of purine derivatives: An overview of the technical details. Aberdeen: International Feed Resources Unit, Rowett Research Institute, 1992. v. 21.
- CHEN, X. B. et al. The effect of feed intake and body weight on purine derivative excretion and microbial protein supply in sheep. *Journal of Animal Science*, v. 70, n. 5, p. 1534–1542, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2527/1992.7051534x>.
- CONCEIÇÃO, M. G. et al. Can cactus (*Opuntia stricta* [Haw.] Haw) cladodes plus urea replace wheat bran in steers' diet? *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, v. 31, n. 6, p. 1627-1634, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0927>.
- DETMANN, E. et al. *Métodos para análise de alimentos*. Visconde do Rio Branco: Suprema; Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Ciência Animal, 2012.
- FERREIRA, M. A. et al. Características químicas e fermentativas de dietas à base de palma forrageira. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, Belo Horizonte, v. 61, n. 4, p. 948–956, 2009.
- GERASSEV, L. C. et al. Economic feasibility of using waste banana crop in the feeding of lambs. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, v. 14, n. 1, p. 734-744, 2013.
- GERBER, P. J. et al. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome: FAO, 2013. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

- HADDAD, C. M. Ureia em suplementos alimentares. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS - UREIA PARA RUMINANTES, 2., 1984, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, 1984. p. 119-141.
- HALL, M. B. Challenges with nonfiber carbohydrate methods. *Journal of Animal Science*, v. 81, n. 12, p. 3226-3232, 2000.
- HARMEYER, J.; MARTENS, H. Aspects of urea metabolism in ruminants with reference to the goat. *Journal of Dairy Science*, v. 63, n. 10, p. 1707-1728, 1991.
- HOOVER, W. H.; STOKES, S. R. Balancing carbohydrates and proteins for optimum rumen microbial yield. *Journal of Dairy Science*, v. 74, n. 5, p. 3630-3644, 1991. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78553-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78553-6).
- HUHTANEN, P. et al. Quantification of urinary nitrogen losses in cattle. *Livestock Science*, Amsterdam, v. 113, n. 2-3, p. 122-132, 2008.
- KHATTAB, I. M. et al. Effects of urea supplementation on nutrient digestibility, nitrogen utilisation and rumen fermentation in sheep fed diets containing dates. *Livestock Science*, v. 155, n. 2-3, p. 223-229, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.024>.
- KOZLOSKI, G. V. *Bioquímica dos ruminantes*. 2. reimp. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.
- LICITRA, G.; HERNANDEZ, T. M.; VAN SOEST, P. J. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, v. 57, p. 347-358, 1996.
- LIRA, M. A. et al. A palma forrageira como estratégia alimentar para o semiárido brasileiro. *Pesquisas Agropecuárias Brasileiras*, v. 55, p. e01487, 2020.
- LIRA, M. A. et al. *Palma forrageira: cultivo, uso atual e perspectivas futuras no semiárido brasileiro*. Documentos Embrapa, n. 126, Recife: Embrapa Semiárido, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1129830>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- LU, Z. et al. Modulation of sheep ruminal urea transport by ammonia and pH. *American Journal of Physiology - Regulatory*, v. 307, n. 5, p. R558-R570, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00107.2014>.
- MEDEIROS, H. R. et al. Fermentative characteristics of diets containing cactus pear in dairy cow feeding. *Revista Ciência Agronômica*, v. 49, n. 1, p. 104-111, 2018.
- MERTENS, D. R. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beakers or crucibles: Collaborative study. *Journal of AOAC International*, v. 85, n. 6, p. 1217-1240, 2002.

MOTTET, A. et al. Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, [S.l.], v. 14, p. 1–8, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Nutrient requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids, and new world camelids*. Washington, D.C.: National Academy Press, 2007.

NOCEK, J. E.; RUSSELL, J. B. Protein and energy as an integrated system: Relationship of ruminal protein and carbohydrate availability to microbial synthesis and milk production. *Journal of Dairy Science*, v. 71, n. 8, p. 2070–2107, 1988. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79782-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79782-9).

NÓIA JÚNIOR, R. S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. *Agricultural Systems*, v. 173, p. 254–267, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.012>.

PEREIRA, G. F. C. et al. Urea can replace soybean meal in sheep diet without alter intake, digestibility and ruminal parameters. *International Journal of Development Research*, v. 10, n. 11, p. 42092–42097, 2020. DOI: <https://doi.org/10.37118/ijdr.20338.11.2020>.

PIRES, A. V. et al. Utilização da ureia na alimentação de ruminantes. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, Salvador, v. 11, n. 2, p. 472–481, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-99402010000200037>.

RUSSELL, J. B. et al. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminal fermentation. *Journal of Animal Science*, v. 70, n. 11, p. 3551–3561, 1992.

SANTOS, F. A. P. et al. Metabolismo de proteínas. In: BERCHIELLI, T. T.; PIRES, A. V.; OLIVEIRA, S. G. (org.). *Nutrição de ruminantes*. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2011. cap. 9, p. 265–297.

SARO, C. et al. Replacing soybean meal with urea in diets for heavy fattening lambs: Effects on growth, metabolic profile and meat quality. *Animals*, v. 9, n. 11, p. 974, 2019.

SINCLAIR, L. A. et al. Effects of synchronizing the availability of dietary energy and nitrogen on rumen fermentation and microbial protein synthesis in sheep. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, v. 120, n. 3, p. 251–263, 1993.

SMITH, L. W.; ULRICH, P. N.; REID, J. T. Influence of pH on cellulose digestion in vitro. *Journal of Dairy Science*, v. 55, n. 5, p. 554–556, 1972.

SNIFFEN, C. J. et al. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, v. 70, n. 1, p. 3562–3577, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2527/1992.70113562x>.

SOUZA, R. A. et al. Synchronization between energy and nitrogen in the rumen of sheep fed diets containing cactus pear. *Small Ruminant Research*, v. 149, p. 125–131, 2017.

TEDESCHI, L. O.; FOX, D. G.; RUSSELL, J. B. Accounting for the effects of a ruminal nitrogen deficiency within the structure of the Cornell Net Carbohydrate and Protein System. *Journal of Animal Science*, v. 85, n. 5, p. 1407–1421, 2007.

VALADARES FILHO, S. C. et al. *Tabela brasileira de composição de alimentos para bovinos (BR-CORTE)*. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2016.

VAN SOEST, P. J. *Nutritional ecology of the ruminant*. Ithaca: Cornell University Press, 1994.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, v. 74, n. 10, p. 3583–3597, 1991.

VELLOSO, L. Ureia em rações de engorda de bovinos. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS - UREIA PARA RUMINANTES, 2., 1984, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1984. p. 174-199.

WAHYONO, T. et al. Effects of urea supplementation on ruminal fermentation characteristics, nutrient intake, digestibility, and performance in sheep: A meta-analysis. *Veterinary World*, v. 15, n. 2, p. 331, 2022.