

ABERTO

# Calorimetria, características físico-químicas e liberação de nitrogênio de ureia extrusada

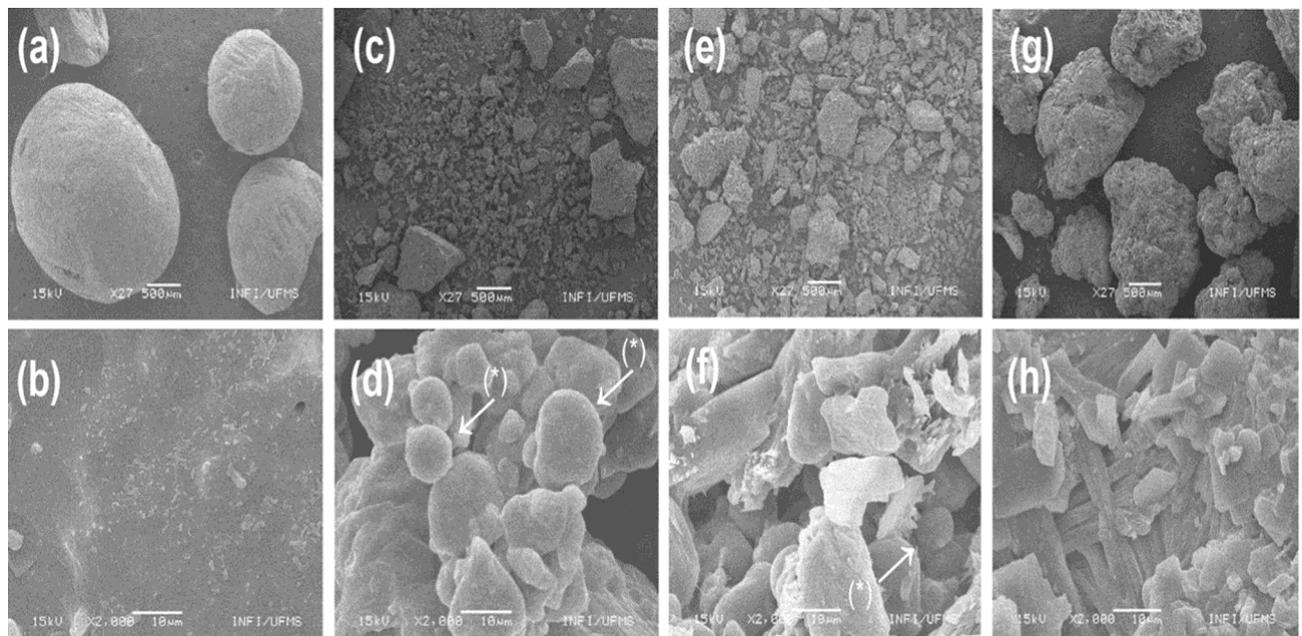
Noemila Debora Kozerski, Luís Carlos Vinhas Itavo<sup>✉</sup>, Camila Celeste Brandão Ferreira Itavo, Gelson dos Santos Difante, Alexandre Menezes Dias, Lincoln Carlos Silva de Oliveira, Elias Nogueira de Aguiar, Alexandre Guimarães Inácio, Antonio Leandro Chaves Gurgel & Geraldo Tadeu dos Santos

Nossa hipótese foi que a extrusão de ureia associada com milho pode reduzir solubilização de N e aumentar a qualidade nutricional desse alimento para ruminantes. Nosso objetivo foi caracterizar física e quimicamente uma mistura de milho e ureia antes e depois do processo de extrusão. As diferenças morfológicas foram avaliadas por meio de microscopia eletrônica de varredura, solubilização de nitrogênio e perda de massa composta por termogravimetria. Na microscopia eletrônica de varredura, a ureia extrusada mostrou estruturas aglomeradas e definidas, com mudanças na morfologia de grânulos de amido e cristais de ureia, diferindo do arranjo da mistura de milho e ureia. A área extrusada manteve um padrão de liberação constante de nitrogênio por até 360 min. Na termogravimetria, a ureia extrusada apresentou uma temperatura mais alta para começar a perder massa, ou seja, o desaparecimento do material com o aumento da temperatura, mas a perda de massa foi menor quando comparada ao primeiro evento da mistura de milho e ureia. Conclui-se que o processo de extrusão de ureia com milho modifica as estruturas originais desses ingredientes e controla a liberação de nitrogênio da ureia, mantendo na sua formação uma fonte de energia otimizando o uso de nitrogênio por bactérias ruminais, porque quanto mais sincronizada a liberação de amido (energia) e nitrogênio, melhor o uso por microrganismos ruminais.

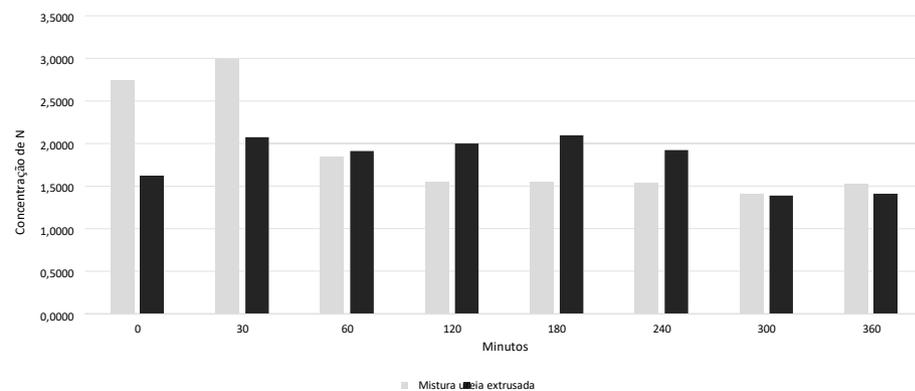
O uso de ureia como uma fonte de nitrogênio não proteico (NNP) para ruminantes é difundido e tem sido universalmente aceito como um ingrediente barato para substituir fontes de proteínas veganas nas dietas ruminais<sup>1</sup>, pois as bactérias ruminais tem a habilidade de converter amônia (NH<sub>3</sub>) para a proteína microbiana de alto valor biológico quando sincronizada com energia disponível<sup>2</sup>. Com o crescente uso de concentrados e ureia na dieta ruminante, houve uma intensificação de estudos sobre o desenvolvimento de produtos que controlavam a liberação de N a partir da ureia e um produto de amido extrudado foi desenvolvido, cereais com ureia<sup>3,4</sup> e um equivalente de 45% de proteína<sup>5</sup>. O processo de extrusão consiste na fusão da ureia com a molécula de amido gelatinizado, por meio da exposição à pressão, temperatura e umidade por um certo tempo, obtendo a ureia extrusada chamada starea. A ureia passa de uma estrutura cristalina para uma não-cristalina, a qual é encontrada na porção gelatinizada do amido<sup>3-5</sup>.

Essa prática pode aumentar a velocidade da fermentação do amido ruminante e reduzir a intensidade da liberação de amônia pela ureia, sincronizando tanto os fatores para síntese proteica microbiana<sup>6</sup> e aumenta a aceitação da ureia em animais em concentrados<sup>7</sup>. A melhora das técnicas de produção de ureia extrusada, aumento de proteína equivalente a 200% dos níveis de proteína bruta (PB) e utilização para vários propósitos produtivos em ruminantes tem se intensificado, demandando pesquisas com o objetivo de caracterizar as modificações que o processamento promove nos ingredientes usados, à medida que a demanda pelo uso de produtos alternativos em dietas ruminantes está aumentando.

Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), Av. Senador Filinto Muller, 2443. Vila Ipirang, Campo Grande, MS 79070-900, Brasil. ✉ email: luis.itavo@ufms.br



**Figura 1.** Microscopia eletrônica de varredura em um aumento de 27 e 2000 vezes na ureia (a e b), milho moído (c e d), mistura de milho e ureia (e e f) e ureia extrusada (g e h). (\*) Grânulos de amido.



**Figura 2.** Solubilidade de nitrogênio (mg/dL) em água como uma função do tempo de incubação in vitro a 39 °C.

No entanto, comparações entre ureia e starea (ureia extrusada) quanto à liberação de nitrogênio em cordeiros<sup>8,9</sup> ou em vacas lactantes<sup>10</sup> apresentou resultados diferentes, não permitindo que se chegasse a uma conclusão sobre o assunto. É sabido que, em novilhos em terminação, uma concentração menor de amônia ruminante é observada no tratamento com starea quando comparada a uma mistura de ureia com sorgo grosso depois de sete dias de alimentação<sup>11</sup>. Assim, a hipótese desse estudo é que a ureia extrusada pode reduzir a solubilização de N quando comparada à ureia misturada com milho. Dessa forma, o objetivo foi avaliar as características da ureia extrusada e as comparar com o milho e com a ureia misturada antes do processo de extrusão.

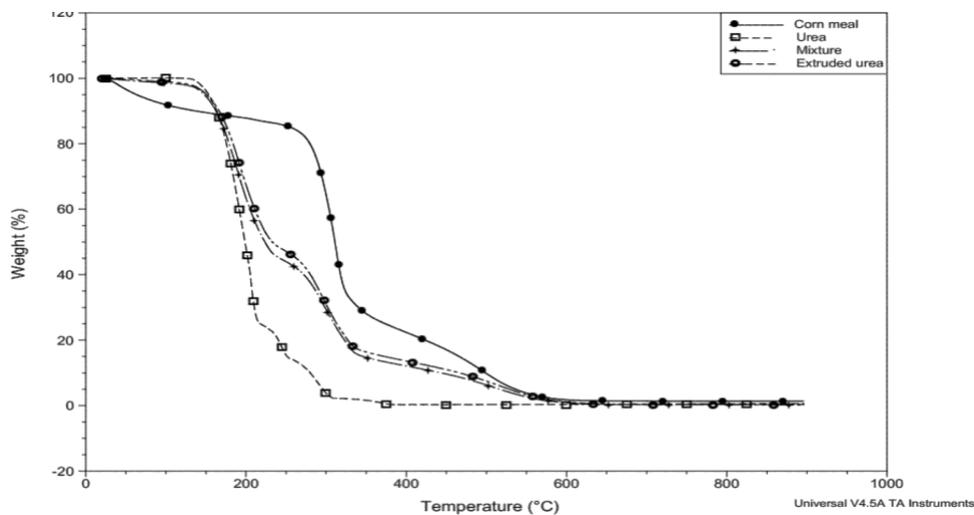
## Resultados

**Microscopia eletrônica de varredura (MEV).** Ureia, em sua forma original, tem formas esféricas (Fig. 1a e b). O milho moído inteiro se configura em uma estrutura dispersa, sendo possível evidenciar os grânulos de amido, definidos por formas arredondadas (Fig. 1c e d). A mistura de milho e ureia é dispersada na faixa de carbono, sem ter uma forma definida, com a presença de grânulos de amido, definidos por formas arredondadas e estruturas cristalinas brilhantes de ureia (Fig. 1e e f). Na amostra de ureia extrusada, estruturas com formas e aglomerados definidos são observadas, formando uma estrutura complexa (Fig. 1g e h).

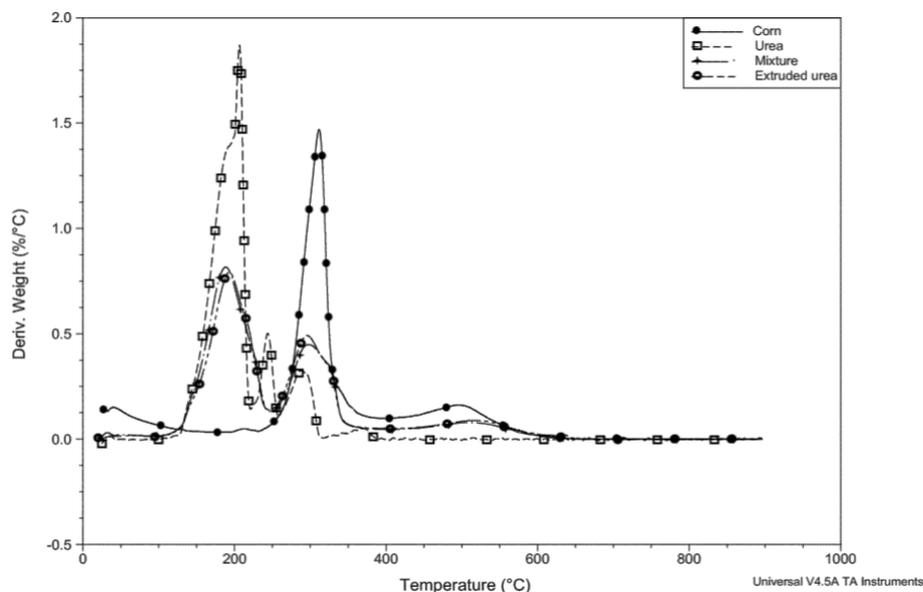
**Solubilidade de nitrogênio in vitro.** O pico da liberação de N da amostra de milho e ureia (Fig. 2) ocorre em até 30 min ( $Y_{\text{com\_and\_urea\_mixture}} = 2,8219 - 0; 2059x; R_2 = 0,6722$ ).

A redução na taxa de solubilização de nitrogênio em meio aquoso da amostra de ureia extrusada (Fig. 2) evidenciou a solubilização mais lenta de N comparada à amostra de mistura de milho e ureia ( $Y_{\text{extruded\_urea}} = 2,0578 - 0,0565x; R_2 = 0,2313$ ).

**Termogravimetria e termogravimetria derivada.** A amostra de ureia foi caracterizada nas curvas TG e DTG em cinco estágios simultâneos, ou seja, as reações a um evento não terminam com o início do próximo evento. Isso é evidente no primeiro e segundo estágios, os quais iniciam a decomposição de ureia em temperaturas entre 133,0 e 180,5 C, com perda da maior parte da massa, estimada em 72,97% (Tabela 2). Esses estágios se caracterizaram pelo pico rápido e estreito de DTG (Fig. 4).



**Figura 3.** Sobreposição de curvas TG de ureia, milho moído, mistura de milho e ureia e ureia extrusada



**Figura 4.** Sobreposição de curvas DTG de ureia, milho moído, mistura de milho e ureia e ureia extrusada.

Os estágios três e quatro (Tabela 2), caracterizados por picos de DTG, mantiveram a concorrência com menor perda de massa do que o primeiro e segundo estágios. O quinto estágio apresentou um pico de DTG mais largo (Fig. 4), o que caracteriza o fim da decomposição de ureia.

A amostra de milho inteiro moído não mostrou estabilidade (Tabela 2). O segundo estágio se caracterizou por uma perda rápida de massa deixando compostos matriciais, demonstrada por um pico estreito e rápido (Fig. 4). Nesse evento, a temperatura do pico DTG indicou que a reação ocorreu rapidamente em 310,86 °C (Tabela 2). O terceiro evento se caracterizou por uma lenta reação de pico de ampla derivada correspondendo às interações físicas ou químicas com a matriz da amostra (Fig. 3).

A amostra de mistura de milho e ureia, e a ureia extrusada, apresentaram três estágios (Tabela 2 e Fig. 3). Nenhuma das amostras apresentou estabilidade constante, indicando a perda de água causada pela presença de milho, incluída na mesma proporção em ambas as amostras (26,8%).

Na amostra composta de milho e ureia, a decomposição começou a aproximadamente 103,5 °C e a ureia extrusada a 136,2 °C, com a perda de massa registrada nas duas amostras na proporção de 54,9% e 50,5%, respectivamente (Tabela 2).

Comportamento semelhante foi observado no segundo estágio na curva DTG (Fig. 4) de amostras de mistura de milho e ureia e ureia extrusada (Fig. 3), mas a temperatura no começo da variação de massa (Tabela 2) foi mais alta para a ureia extrusada (231,7 °C) que para a amostra de mistura de milho e ureia (228,3 °C).

Componentes (g/kg DM)	Mistura	Ureia extrusada
Matéria seca (g/kg)	961,4	961,0
Matéria orgânica	995,4	995,7
Proteína bruta (n-total x 6,25)	2040,4	2029,7
NPN (Fração A)	292,3	298,1
CP de NNP (Fração A)	1826,7	1863,3
N solúvel (Fração B1)	17,1	13,3
CP de N (Fração B1)	106,9	83,2
N-Proteína verdadeira (Fração B2)	8,83	5,22
CP de N (Fração B2)	55,2	32,7
N-Proteína verdadeira (Fração B3)	2,2	2,4
CP de N (Fração B3)	13,7	15,0
Detergente insolúvel neutro N	7,9	7,8
Detergente insolúvel ácido N (Fração C)	6,1	5,7
CP de N (Fração C)	37,9	35,6
Extrato etéreo	32,5	31,6
Carboidratos totais	271,1	278,4
Carboidratos não-fibrosos	194,5	218,0
fibra em detergente neutro	52,0	32,5
fibra em detergente ácido	21,6	18,3

**Tabela 1.** Caracterização nutricional da mistura de milho moído e ureia e ureia extrusada.

Amostra	Estágo	T <sub>a</sub> (°C) <sub>1</sub>	T <sub>b</sub> (°C) <sub>2</sub>	Perda de peso (%)	Resíduo (%)
Ureia	1	133,0	190,4	0,2	0,47
	2	180,5	206,0	72,9	
	3	213,9	243,1	13,4	
	4	257,0	288,3	11,8	
	5	305,1	369,2	1,9	
Grão de milho moído	1	37,2	212,6	12,3	1,3
	2	225,6	310,8	61,2	
	3	372,5	496,6	23,6	
Mistura de milho e ureia*	1	103,5	188,7	54,9	0,32
	2	228,3	296,2	31,07	
	3	335,7	513,9	15,62	
Ureia extrusada*	1	136,2	194,5	50,57	0,34
	2	231,7	294,9	34,32	
	3	336,2	524,5	14,65	

**Tabela 2.** Caracterização dos passos, temperatura de início da perda de massa, temperatura da maior taxa de reação, perda de massa e resíduo de ureia, milho moído, mistura de ureia e milho moído e ureia extrusada em atmosfera de ar com taxa de aquecimento de 10 °C por minuto<sup>-1</sup>. 1Temperatura obtida pelo método da temperatura da perda de peso. 2Temperatura de pico DTG. \*200% equivalente proteico (700 g/kg de ureia, 268 g/kg de milho inteiro moído e 32 g/kg de flor de enxofre).

O terceiro estágio mostrou similaridades na decomposição de massa (Tabela 2) na amostra de mistura de milho e ureia, e ureia extrusada (15,6 e 14,6%, respectivamente) e, no DTG (Fig. 4), o pico derivado foi mais extenso quando comparado aos primeiros passos.

## Discussão

Usando as imagens obtidas da MEV, é possível diferenciar morfológicamente que o processo de extrusão altera as estruturas originais da ureia (Fig. 1a e b) e milho (Fig. 1c e d), atribuído à forma espessada e às modificações como o desaparecimento de grânulos de amido. (Fig. 1h), que foi possivelmente causado pela alta pressão, temperatura e umidade. A extrusão gelatinizou o amido e envolveu a estrutura não-cristalina da ureia, a qual formou uma estrutura complexa. Essas características da ureia extrusada tornam a liberação de N mais lenta e gradual (Fig. 2), o que pode melhorar a utilização pelas bactérias ruminais<sup>2</sup> e, associada com a fonte de energia do amido de milho, pode aumentar a síntese das proteínas microbiais nos animais ruminantes.

A rápida solubilização de N da amostra de milho e ureia é evidenciada pela manutenção das formas originais obtidas pelas imagem MEV (Fig. 1e e f) e cerca de 90% da amostra de nitrogênio é representada pela fração A, a qual é o nitrogênio solúvel não-proteico da ureia (Tabela 1). Esse comportamento indica que o carboidrato deve ser rapidamente solúvel em quantidade suficiente para sincronizar com o NH<sub>3</sub> e promover a síntese de proteínas microbianas. A constância da liberação de N em outros tempos são contribuições de frações B1, B2 e B3 de milho N (Tabela 1), que são frações mais degradadas.

A redução na taxas de solubilização de nitrogênio no meio aquoso da amostra de ureia extrusada (Fig. 2), com a fração uniforme A representando 90% do nitrogênio presente na amostra (Tabela 1), pode ser evidenciada no agrupamento de estruturas observado na Fig. 1 (g e h), o qual configura a mudança estrutural de amido e ureia depois do processo de extrusão. A maior parte de N presente nas amostras pertencentes à fração A da proteína também justifica o pico de liberação de N por volta de 30 min. O padrão constante de liberação de N, observado até 360 min, permitiria que a amônia livre do rúmen fosse usada por microrganismos do rúmen junto com carboidratos degradáveis no rúmen em velocidades diferentes para sintetizar a proteína microbiana e prevenir a perda de NH<sub>3</sub>.

A taxa de liberação de N deve ser dependente da taxa de degradação da fonte de carboidrato, onde a produção de amônia em sinergia com o metabolismo energético do conteúdo ruminal é um fator decisivo na formação de proteína ruminal<sup>6</sup>.

O excesso de N devido à alta solubilidade de ureia (Fig. 2) pode, além de causar toxicidade, constituir um desperdício de energia, pois requer energia para eliminar a amônia em excesso no sangue, impactando negativamente o ambiente, com implicações econômicas e de saúde<sup>12</sup>.

A eficiência de utilização de proteínas em ruminantes pode ser melhorada mantendo quantidades adequadas de NNP e manejo alimentar com o uso de ureia extrusada na dieta de bovinos. Até o nível de 80 g/100 kg de peso corporal de suplementação de ureia extrusada (starea com proteína equivalente a 200% PB) não há influências negativas sobre o ambiente ruminal<sup>13</sup>.

A indústria melhorou para facilitar o uso de NNP em dietas de ruminantes, como o processo de extrusão de ureia, para prevenir envenenamento por amônia e aumentar a disponibilidade de nitrogênio para síntese microbiana<sup>14</sup>. A amostra de ureia mostrou que a estabilidade térmica para seu ponto de fusão em 133,0°C<sup>15</sup>.

Quanto menor a perda de massa na amostra de ureia, nos estágios três e quatro (Tabela 2), isso demonstra que as reações complexas de polimerização e despolimerização de compostos de alta massa molecular ocorreram e continuaram<sup>16</sup>.

Os produtos gasosos gerados pela pirólise de ureia são entre temperaturas de 132 a 190 °C. Resultados experimentais mostram que, de 132,5 a 160 °C, ureia só estava envolvida em reações de consumo. Reações de formação de biureto e ácido cianúrico, ao invés da decomposição de ureia, ocupam a maior parte do consumo de ureia. Acima de 160 °C, a reação dominante passa para a formação de decomposição de cianeto, enquanto o ponto de temperatura de conversão do biureto é 170 °C. A produção de NH<sub>3</sub> flutua entre 132,5-170 °C, mas continua a subir entre 170 e 190°C<sup>17</sup>. Em atmosferas com 5% ou 10% de O<sub>2</sub>, a produção mais alta de NH<sub>3</sub> foi atingida em 200°C<sup>15</sup>. A instabilidade da amostra de milho inteiro moído foi caracterizada pela perda de água, possivelmente pela hidrólise de amido (Tabela 2). O segundo estágio foi caracterizado por uma perda de massa de compostos de matriz que saem rapidamente (Fig. 4), possivelmente pela decomposição de carbonos de cadeia larga e houve poucas interações físicas ou químicas entre o composto que sai e a matriz da amostra<sup>16</sup>.

A presença de água influenciou a estabilidade térmica da amostra de mistura de milho e ureia, pois age como um plastificante nos cristais de amido, o que pode diminuir a temperatura transição do vidro e, conseqüentemente, a temperatura de derretimento dos cristais<sup>18</sup>, como evidenciado na amostra inteira de milho (Fig. 3).

O atraso no início da decomposição da ureia extrusada e diminuição da perda de massa se dá possivelmente pela gelatinização do amido, o que, depois desse processo, perde a organização original de sua estrutura, ligações de hidrogênio são quebradas, com fusão cristalina<sup>3</sup>, sendo o grau de gelatinização maior para alimentos extrusados, pois as temperaturas usadas no processo são mais altas, até 250 °C em comparação com 60–95°C<sup>19</sup>. Além disso, a farinha de milho produzida pelo processo de moagem a seco do grão do milho tem, em sua composição, uma proporção maior de amido, entre 50 e 55%, 10% proteína e 1% lipídio<sup>20</sup>.

No segundo estágio da curva DTG (Fig. 4), a temperatura do início da variação de massa (Tabela 2) foi mais alta para a ureia extrusada, o que indica que o processo de extrusão atrasa a perda de massa.

A caracterização da ureia extrusada fornece um comportamento detalhado do produto durante o uso, o que permite sua inclusão de acordo com as características do animal e diferentes manejos nutricionais.

## Conclusões

Nós recomendamos o processo de extrusão para reduzir a solubilização de N de produtos de nitrogênio e aumentar a qualidade nutricional do produto final. O processo de extrusão da ureia e milho para obter a ureia extrusada (starea) modifica a estrutura, aumenta a qualidade pela gelatinização do amido e complexação com os cristais de ureia, prevenindo a rápida solubilização do nitrogênio.

## Materiais e métodos

**Amostras e caracterização nutricional** Amostras de dois produtos, chamada de mistura de milho e ureia, foram usadas, correspondendo à mistura de ingredientes antes da extrusão e ureia extrusada—Starea (Amiréia Pajoara 2005). O processo de produção de ureia extrusada consiste na complexação da ureia com uma molécula gelatinizada de amido, usando pressão, temperatura e umidade, obtendo assim o starea. As duas amostras, com uma proteína equivalente a 200%, foram compostas de ureia de gado, grão de milho moído e flor de enxofre nas proporções de 70%,26,8% e 3,2%, respectivamente<sup>3</sup>.

Os dois ingredientes foram mandados para análise química no tamanho original da partícula para testar o efeito de processamento. A matéria seca (DM; Tabela 1) foi determinada pela secagem em um forno a 105 °C durante a noite (método 930,15<sup>21</sup>). O conteúdo total de nitrogênio foi qualificado pelo método Kjeldahl usando o destilador TE-036/1 (Tecnal, Piracicaba, Brasil) (método 976.05<sup>21</sup>). A determinação do extrato etéreo foi feita em um extrator Ankom XT 10 (Ankon Technology, NY, USA). O conteúdo de cinzas foi determinado com um incinerador muffle (método 942,05<sup>21</sup>) e o conteúdo de matéria orgânica (OM) foi calculado pela diferença entre 100 e a porcentagem de cinzas. Para determinar o conteúdo de fibra em detergente neutro (NDF)<sup>22</sup>,  $\alpha$ -amilase termoestável (Termamyl 120 L Sigma-Aldrich, 3050 Spruce Street, Saint Louis, MO, USA) e os resultados foram expressos em cinzas residuais. A porcentagem dos carboidratos totais (TC)<sup>23</sup> e dos carboidratos não-fibrosos (NFC)<sup>24</sup> foi determinada.

Frações de proteína foram determinadas de acordo com a metodologia<sup>25</sup> descrita com a fração A correspondendo a NPN, B1 correspondendo a proteína solúvel verdadeira, B2 o N à proteína verdadeira insolúvel no rúmen, mas não ligada à NDF, B3 correspondendo à fibra potencialmente disponível N-ligada (nitrogênio insolúvel em detergente neutro) e, C, a porção indisponível, ligada à lenhina (nitrogênio insolúvel em detergente ácido).

**Observações da microscopia eletrônica de varredura (MEV).** O estudo da morfologia amostral (Fig. 1) foi feito pelas medições de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento JEOL modelo JSM 6380LV no Instituto de Física da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (INFI/UFMS).

Amostras na forma original de ureia, grão de milho moído, mistura de milho e ureia, e ureia extrusada foram dispersados em uma fita de carbono de dois lados para fixação ao topo de um toco de cobre. O conjunto foi levado para a câmara de pulverização catódica (modelo Denton Vacuum, Desk III) para a disposição de uma fina camada de ouro na superfície das partículas de poeira para obter uma melhor resolução de imagem MEV e aumentar a condutividade da amostra para evitar os efeitos do carregamento eletrônico que atrapalham a resolução da imagem. Para a análise, uma voltagem de 15 kV, distância de trabalho (WD) de 12 mm e ponto de tamanho 20 foram usados. Leituras foram feitas e imagens foram gravadas em aumentos de 27 e 2000 vezes para fins de comparação morfológica.

**Solubilidade de nitrogênio in vitro.** Para estimar a liberação de nitrogênio (N) em diferentes produtos, o método Kjeldahl foi usado para determinar o nitrogênio total, com modificações<sup>17</sup>.

Inicialmente, 2 g da amostra composta por milho moído e ureia e ureia extrusada (starea) foram embalados em vidros de 500 mL de capacidade. Então 200 mL de água destilada foram adicionados e as amostras foram levadas ao banho-maria (39,5 °C). O tempo total de análise foi de 360 min, e uma alíquota de 2 mL (em triplicado) foi removida do sobrenadante nos tempos 0, 30, 60, 120, 180, 240, 300 e 360 min, de acordo com a metodologia descrita para Ítavo et al.<sup>6</sup>.

Essas alíquotas foram embaladas em tubos digestivos contendo 5 mL de 2 N de hidróxido de potássio (KOH) e 13 mL de água destilada. Na sequência, os tubos digestivos foram levados para o destilador de nitrogênio (TECNAL — TE-036/1). No mesmo equipamento, um Erlenmeyer contendo 10 mL de ácido bórico 2% foi acoplado e, então, a destilação ocorreu até obter 75 mL de solução.

Finalmente, titulações das soluções recuperadas foram feitas no destilador, com 0,005 N de ácido clorídrico (HCl) usado até o ponto de mutação das soluções ser obtido. Com a destilação, titulação também foi feita em triplicado para cada produto e para cada tempo de análise. Também foi realizado um ensaio em branco (somente água destilada) no começo de cada tempo de análise para verificar contaminação do aparelho.

Os dados obtidos com as titulações foram submetidos à seguinte equação: Concentração de N (g/dL) = volume de HCl usado x fator de correção de HCl x 0,005 x 0,014 x 100/2.

**Mensurações de termogravimetria e termogravimetria derivada.** As curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) das amostras de ureia original, milho inteiro moído e mistura de milho e ureia, e ureia extrusada foram determinadas com um análise termogravimétrica TGA Q50 V20.13, Build 39 (New Castle, EUA), no Instituto Químico da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Cerca de 6,0 mg de cada amostra foi pesado numa célula de platina e os testes foram realizados em uma atmosfera de ar sintético, com uma taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, a partir de uma temperatura ambiente até 900 °C. As temperaturas nas quais a taxa de decomposição da amostra foi máxima (Td) foram obtidas pelas curvas DTG. Os dados foram analisados usando o programa Advantage/ Universal Analyzes v5.5.24 da TA Instruments.

**Declaração de Ética.** Todos os estudos e amostragens das plantas foram realizados de acordo com as diretrizes institucionais, nacionais ou internacionais relevantes. Nós usamos grão de milho (*Zea mays*) comercial.

Recebido: 22 de março de 2021; Aceito: 20 de agosto de 2021  
Published online: 15 September 2021

## Referências

1. Patra, A. K. & Aschenbach, J. R. Ureas in the gastrointestinal tracts of ruminant and monogastric animals and their implication in urea-N/ammonia metabolism: A review. *J. Adv. Res.* **13**, 39–50 (2018).
2. National Research Council (NRC). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. (7th ed., National Academy Press, Washington, 2001).
3. Helmer, L. G., Bartley, E. E., Deyoe, C. W., Meyer, R. M. & Pfost, H. B. Feed processing. V. Effect of an expansion-processed mixture of grain and urea (Starea) on nitrogen utilization in vitro. *J. Dairy Sci.* **53**, 330–335 (1970).
4. Helmer, L. G., Bartley, E. E. & Deyoe, C. W. Feed processing. VI. Comparison of Starea, urea and soybean meal as protein sources for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* **53**, 883–887 (1970).
5. Bartley, E. E. & Deyoe, C. W. Starea as a protein replacer for ruminants—review of 10 years of research. *Feedstuffs* **47**, 42–51 (1975).
6. Ítavo, L. C. V. *et al.* Combinações de fontes de nitrogênio não proteico em suplementos para novilhos Nelore em pastejo. *Rev Bras Saúde Prod Anim.* **17**, 448–460 (2016).
7. Pires, A. V. *et al.* Total replacement of soybean meal by urea or starea in high grain diets for beef cattle. *Pesq. Agrop. Bras.* **39**, 937–942 (2004).
8. Silva, J. F. C. *et al.* Valor nutritivo da palha de arroz suplementada com amiréia, fubá+ureia e farelo de soja. *Pesq. Agrop. Bras.* **29**, 1475 Salman, A. K. D. *et al.* Estudo do balanço nitrogenado e da digestibilidade da matéria seca e proteína de rações, para ovinos, suplementadas com amiréia, ureia ou farelo de algodão. *Rev. Bras. Zootecn.* **26**, 179–185 (1997).
9. Teller, E. & Godeau, J. M. Some attempts to improve the nutritive value of urea for dairy cows. 3. Its adjunction to fermentable carbohydrates: Starea. *Arch. Anim. Nutr.* **36**, 541–550 (1986).
10. Stiles, D. A. *et al.* Starea, soybean-meal, and urea as nitrogen-sources for lactating cows. *J. Dairy Sci.* **58**, 777–778 (1975).
11. Hynes, D. N., Stergiadis, S., Gordon, A. & Yan, T. Effects of crude protein level in concentrate supplements on animal performance and nitrogen utilization of lactating dairy cows fed fresh-cut perennial grass. *J. Dairy Sci.* **99**, 8111–8120 (2016).
12. Moraes, G. J. *et al.* Extruded urea could reduce true protein source in beef cattle diets. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutri.* **103**, 1283–1294 (2019).
13. Tedeschi, L. O., Baker, M. J., Ketchen, D. J. & Fox, D. G. Performance of growing and finishing cattle supplemented with a slow-release urea product and urea. *Can. J. Anim. Sci.* **82**, 567–573 (2002).
14. Wang, D., Hui, S. & Liu, C. Mass loss and evolved gas analysis in thermal decomposition of solid urea. *Fuel* **207**, 268–273 (2017).
15. Ionashiro M. *Giolito: Fundamentos da termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial*. (Giz Editorial, São Paulo, 2004).
16. Wang, D., Dong, N., Hui, S. & Niu, Y. Analysis of urea pyrolysis in 132.5–190 °C. *Fuel* **242**, 62–67 (2019).
17. Sjöö, M. & Nilsson, L. *Starch in Food: Structure, Function and Applications* 2nd edn. (Woodhead Publishing, 2018).
18. Gómez, L. M., Posada, S. L. & Olivera, M. Starch in ruminant diets: A review. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu.* **29**, 77–90 (2016).
19. Mothé, C. G., Damico, A. & Machado, M. G. S. Thermoanalytical study, HPLC and physical and chemical cracking from corn industry co-product. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* **25**, 1–7 (2005).
20. Association of Official Analytical Chemistry (AOAC). *Official Methods of Analysis*, (17th ed. Gaithersburg, MD, 2000).
21. Mertens, D. R. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beaker or crucibles: Collaborative study. *J. AOAC Int.* **85**, 1217–1240 (2002).
22. Sniffen, C. J., O'Connor, J. D., Van Soest, P. J., Fox, D. G. & Russell, J. B. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets II Carbohydrate and protein availability. *J. Anim. Sci.* **70**, 3562–3577 (1992).
23. Hall, M.B. Neutral Detergent-Soluble Carbohydrates. *Nutritional Relevance and Analysis. A Laboratory Manual*. (Gainesville: University of Florida 2000).
24. Licitra, G., Hernandez, T. M. & Van Soest, P. J. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. *Anim. Feed Sci. Technol.* **57**, 347–358 (1996).
25. –14881 (1994).

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001), Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) e a Amiréia Pajoara Indústria e Comércio.

### Contribuições autorais

N.D.K., L.C.V.I. desenvolveram o projeto. N.D.K., A.G.I. prepararam o material. N.D.K., L.C.S.O., E.N.A. metodologia. N.D.K., L.C.V.I. escreveram o rascunho original. C.C.B.F.I., G.S.D., A.M.D., A.L.C.G., G.T.S. revisão da escrita e edição.

### Conflito de interesse

Os autores não declaram conflitos de interesse.

### Informação adicional

**Correspondência** e pedidos de material devem ser endereçadas a L.C.V.Í.

**Informação sobre reedições e permissões** está disponível em [www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints).

**Nota do Editor** Springer Nature permanece neutro no que diz respeito a reivindicações jurisdicionais em mapas publicados e afiliações institucionais.



**Acesso Público** Este artigo é licenciado sob uma Licença Internacional Creative Commons Attribution 4.0, que permite o uso, compartilhamento, adaptação, distribuição e reprodução em qualquer meio ou

Formato, desde que você dê o crédito apropriado ao autor original e à fonte, forneça um link para a licença Creative Commons e indique se mudanças forem feitas. As imagens ou material de terceiros nesse artigo estão inclusos na licença Creative Commons do artigo, a menos que indicado em contrário numa linha de crédito ao material. Se o material não estiver incluso na licença Creative Commons e seu uso pretendido não for permitido pela regulamentação legal ou exceder o uso permitido, é necessário obter permissão diretamente do detentor dos direitos autorais. Para ver uma cópia dessa licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© O(s) Autor(es) 2021