

ABIERTO

Calorimetría, características fisicoquímicas y liberación de nitrógeno de urea extrusa

Noemila Debora Kozerski, Luís Carlos Vinhas Itavo[✉], 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

Nuestra hipótesis fue que la extrusión de urea asociada con maíz puede reducir la solubilización de N y aumentar la calidad nutricional de ese alimento para rumiantes. Nuestro objetivo fue caracterizar física y químicamente una mezcla de maíz y urea antes y después del proceso de extrusión. Las diferencias fueron evaluadas por medio de microscopia electrónica de barrido, solubilización de nitrógeno y pérdida de masa compuesta por termogravimetría. En la microscopia electrónica de barrido, la urea extrusa mostró estructuras aglomeradas y definidas, con cambios en la morfología de gránulos de almidón y cristales de urea, que difieren de la disposición de la mezcla de maíz y urea. La urea extrusa mantuvo un patrón de liberación constante de nitrógeno por hasta 360 min. En la termogravimetría, la urea extrusa presentó una temperatura más alta para empezar a perder masa, o sea, la desaparición del material con aumento de la temperatura, pero la pérdida de masa fue menor cuando comparada al primer evento de la mezcla de maíz y urea. Se concluye que el proceso de extrusión de urea con maíz modifica las estructuras originales de esos ingredientes y controla la liberación de nitrógeno de urea, manteniendo en su formación una fuente de energía optimizando el uso de nitrógeno por bacterias ruminales, pues cuanto más sincronizada la liberación de almidón (energía) y nitrógeno, mejor uso por microorganismos ruminales.

El uso de urea como una fuente de nitrógeno no proteico (NNP) para rumiantes es difundido y es universalmente acepto como un ingrediente barato para sustituir fuentes de proteínas veganas en las dietas ruminales¹, pues las bacterias ruminales tienen la habilidad de convertir amoníaco (NH₃) para la proteína microbiana de alto valor biológico cuando sincronizada con energía disponible². Con el creciente uso de concentrados y urea en la dieta ruminante, hubo una intensificación de estudios sobre el desarrollo de productos que controlaban la liberación de N a partir de la urea y un producto de almidón extruso fue desarrollado, cereales con urea^{3,4} y un equivalente de 45 % de proteína⁵. El proceso de extrusión consiste en la fusión de la urea con la molécula de almidón gelatinizado, por medio de exposición a la presión, temperatura y humedad por un cierto tiempo, obteniendo la urea extrusa llamada starea. La urea pasa de una estructura cristalina para una no-cristalina, la cual es encontrada en la porción gelatinizada del almidón³⁻⁵.

Esa práctica puede aumentar la velocidad de la fermentación de almidón ruminante y reducir la intensidad de la liberación de amonio por la urea, sincronizando tanto los factores para síntesis proteica microbiana⁶ y aumenta la aceptación de la urea en animales en concentrados⁷. La mejora de las técnicas de producción de urea extrusa, aumento de proteína equivalente a 200 % de los niveles de proteína bruta (PB) y utilización para propósitos productivos diversos en rumiantes tiene se ha intensificado, exigiendo pesquisas con el objetivo de caracterizar las modificaciones que el procesamiento promueve en los ingredientes usados, mientras la demanda por el uso de productos alternativos en dietas rumiantes aumenta.

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

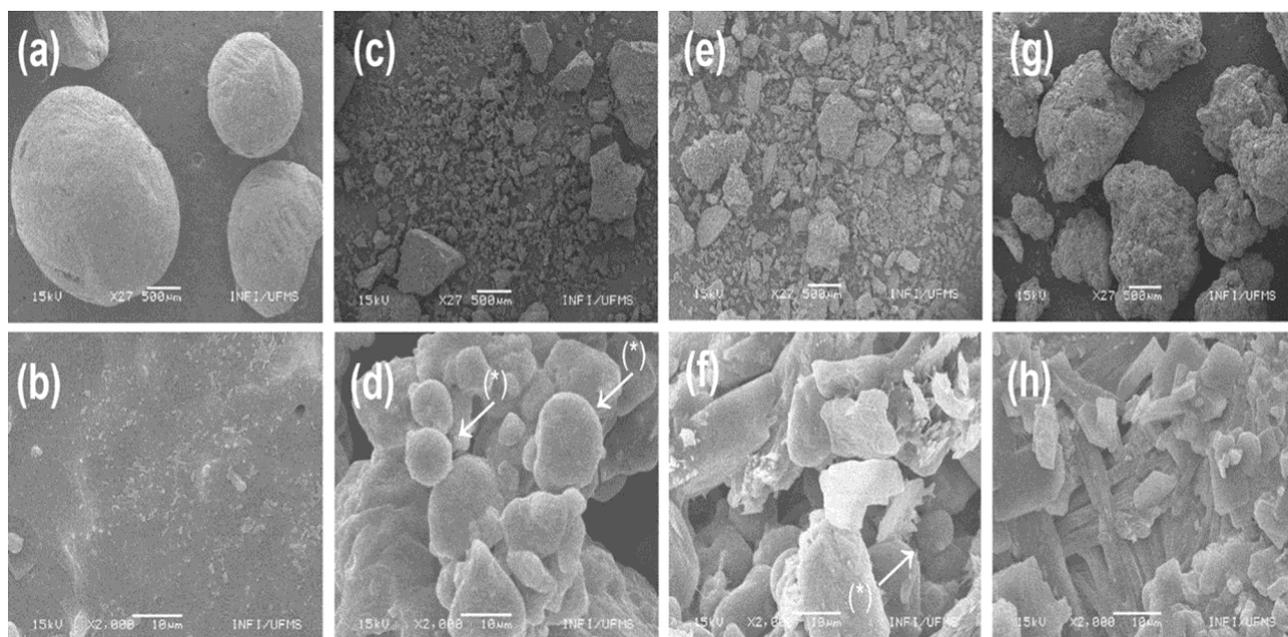


Figura 1. Microscopia electrónica de barrido en un aumento de 27 a 2000 veces en la urea (a y b), maíz molido (c y d), mezcla de maíz y urea (e y f) y urea extrusa (g y h). (*) Gránulos de almidón

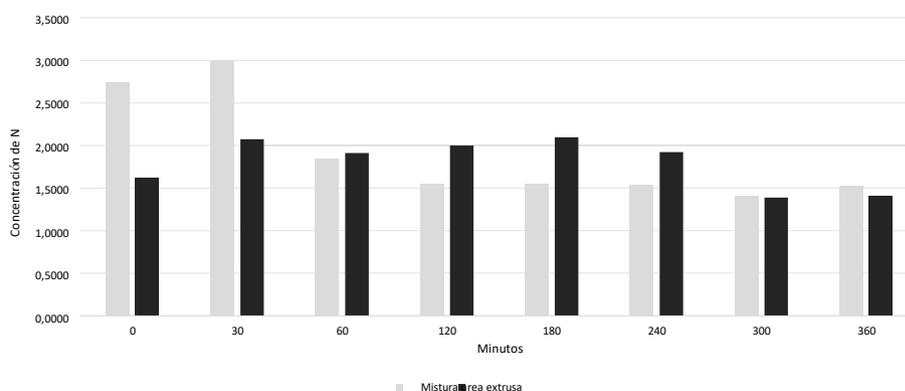


Figura 2. Solubilidad de nitrógeno (mg/dL) en agua como una función del tiempo de incubación in vitro a 39 °C.

Sin embargo, comparaciones entre urea y starea (urea extrusa) cuanto a la liberación de nitrógeno en corderos^{8,9} o en vacas lactantes¹⁰ presentó resultados diferentes, no permitiendo que se llegase a una conclusión sobre el asunto. Se sabe que, en novillos en terminación, una concentración menor de amonio ruminante es observada en el tratamiento con starea cuando comparada a una mistura de urea con sorgo grueso después de siete días de alimentación¹¹. Así, la hipótesis de ese estudio es que la urea extrusa puede reducir la solubilización de N cuando comparada a la urea mezclada con maíz. De esa forma, el objetivo del estudio fue evaluar las características de la urea extrusa y compararlas con el maíz y con la urea mezclada antes del proceso de extrusión.

Resultados

Microscopia electrónica de barrido (MEB). Urea, en su forma original, tiene formas esféricas (Fig. 1a y b) El maíz molido entero se configura en una estructura dispersa, siendo posible evidenciar los gránulos de almidón, definidos por formas redondeadas (Fig. 1c y d) La mistura de maíz y urea es dispersada en la banda de carbono, sin tener una forma definida, con la presencia de gránulos de almidón, definidos por formas redondeadas y estructuras cristalinas brillantes de urea (Fig. 1e y f). En la muestra de urea extrusa, estructuras con formas y aglomerados definidos son observadas, formando una estructura compleja (Fig. 1 g y h).

Solubilidad de nitrógeno in vitro. El pico de liberación de N de la muestra de maíz y urea (Fig. 2) ocurre en hasta 30 min ($Y_{\text{corn_and_urea_mixture}} = 2,8219 - 0; 2059x; R_2 = 0,6722$).

La reducción en la solubilización de nitrógeno en medio acuoso de la muestra de urea extrusa (Fig. 2) evidenció la solubilización más lenta de N comparada a la muestra de mistura de maíz y urea ($Y_{\text{extruded_urea}} = 2,0578 - 0,0565x; R_2 = 0,2313$).

Termogravimetría y termogravimetría derivada. A muestra de urea fue caracterizada en las curvas TG y DTG en cinco etapas simultáneas, o sea, la reacciones a un evento no terminan con el inicio del próximo evento. Eso es evidente en la primera y segunda etapa, las cuales inician la descomposición de urea en temperaturas entre 133,0 y 180,5 C, con pérdida de la mayor parte de la masa, estimada en 72,97% (Tabla 2). Esas etapas se caracterizaron por el pico rápido y estrecho de DTG (Fig. 4).

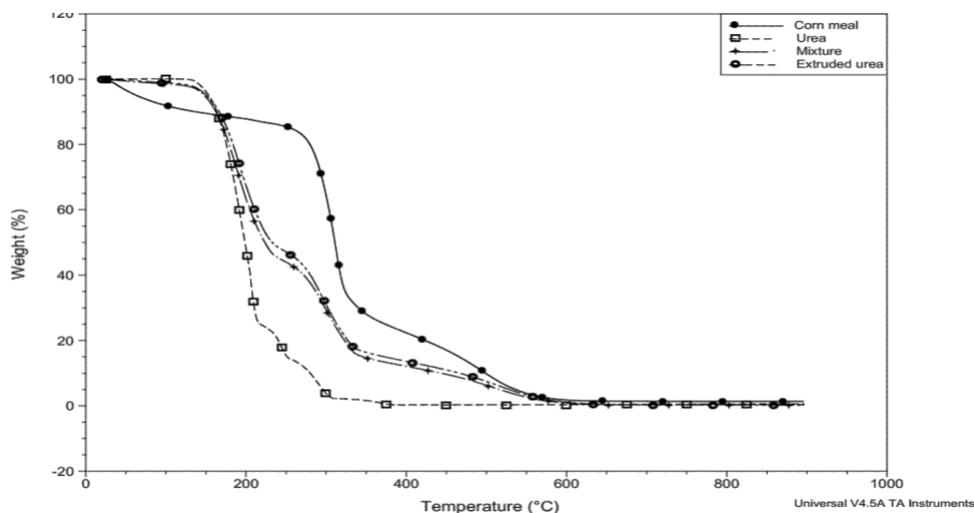


Figura 3. Superposición de curvas TG de urea, maíz molido, mistura de maíz y urea, y urea extrusa.

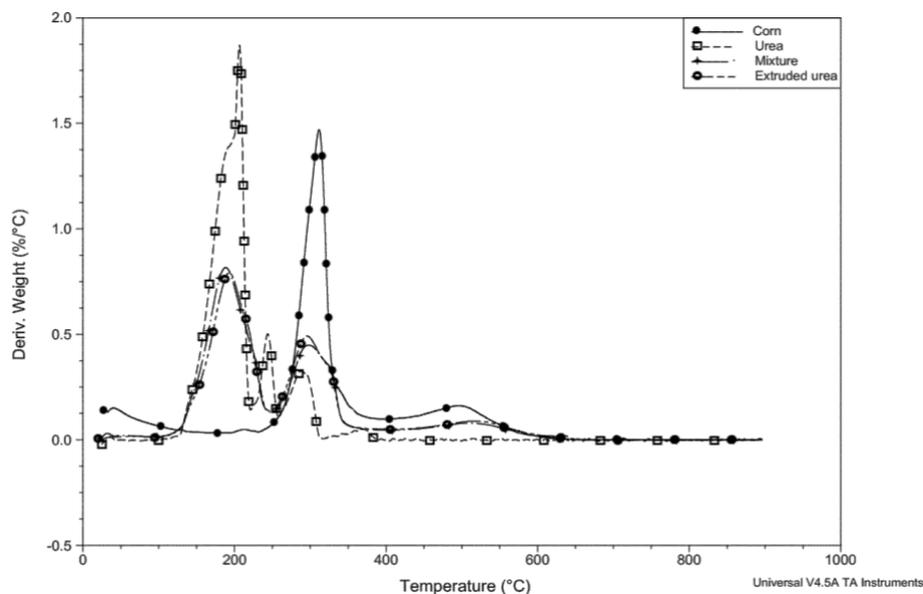


Figura 4. Superposición de curvas DTG de urea, maíz molido, mezcla de maíz y urea, y urea extrusa.

Las etapas tres y cuatro (Tabla 2), caracterizado por picos de DTG, mantuvieron la competencia con menor pérdida de masa que la primera y la segunda etapas. La quinta etapa presentó un pico de DTG más ancho (Fig. 4), lo que caracteriza el fin de la descomposición de urea.

La muestra de maíz entero molido no mostró estabilidad (Tabla 2). La segunda etapa se caracterizó por una pérdida rápida de masa dejando compuestos matriciales, demostrada por un pico estrecho y rápido (Fig. 4). En ese evento, la temperatura del pico DTG indicó que la reacción ocurrió rápidamente en 310,86 °C (Tabla 2). El primero evento se caracterizó por una lenta reacción de pico de amplia derivada correspondiente a las interacciones físicas o química con la matriz de la muestra (Fig. 3).

La muestra de mistura de maíz y urea, y la urea extrusa, presentaron tres etapas (Tabla 2 y Fig. 3). Ninguna de las muestras presentó estabilidad constante, indicando la pérdida de agua causada por la presencia de maíz, incluida en la misma proporción en ambas las muestras (26,8 %).

En la muestra compuesta de maíz y urea, la descomposición empezó a aproximadamente 103,5 °C y en la urea extrusa a 136,2 °C, con pérdida de masa registrada en las dos muestras en la proporción de 54,9 % y 50,5 %, respectivamente (Tabla 2).

Comportamiento semejante fue observado en la segunda etapa en la curva DTG (Fig. 4) de muestras de mezcla de maíz y urea, y urea extrusa (Fig. 3), pero la temperatura para empezar la variación de masa (Tabla 2) fue más alta para la urea extrusa (231,7 °C) que para la muestra de mistura de maíz y urea (228,3 °C).

Componentes (g/kg DM)	Mistura	Urea extrusa
Materia seca (g/kg)	961,4	961,0
Materia orgánica	995,4	995,7
Proteína bruta (n-total x 6,25)	2040,4	2029,7
NPN (Fracción A)	292,3	298,1
CP de NNP (Fracción A)	1826,7	1863,3
N soluble (Fracción B1)	17,1	13,3
CP de N (Fracción B1)	106,9	83,2
N-Proteína verdadera (Fracción B2)	8,83	5,22
CP de N (Fracción B2)	55,2	32,7
N-Proteína verdadera (Fracción B3)	2,2	2,4
CP de N (Fracción B3)	13,7	15,0
N detergente insoluble neutro	7,9	7,8
N detergente insoluble ácido (Fracción C)	6,1	5,7
CP de N (Fracción C)	37,9	35,6
Extracto etéreo	32,5	31,6
Carbohidratos totales	271,1	278,4
Carbohidratos no-fibrosos	194,5	218,0
Fibra en detergente neutro	52,0	32,5
Fibra en detergente ácido	21,6	18,3

Tabla 1. Caracterización nutricional de la mistura de maíz molido y urea, y urea extrusa.

Muestra	Etapas	T _a (°C) ₁	T _b (°C) ₂	Pérdida de peso (%)	Residuo (%)
Urea	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	
Grano de maíz molido	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 maíz y urea*	1	103,5	188,7	54,9	0,32
	2	228,3	296,2	31,07	
	3	335,7	513,9	15,62	
Urea extrusa*	1	136,2	194,5	50,57	0,34
	2	231,7	294,9	34,32	
	3	336,2	524,5	14,65	

Tabla 2. Caracterización de los pasos, temperatura de inicio de la pérdida de masa, temperatura de la mayor tasa de reacción, pérdida de masa y residuo de urea, maíz molido, mezcla de urea y maíz molido y urea extrusa en atmósfera de ar con tasa de calentamiento de 10 °C por minuto⁻¹. ¹Temperatura obtenida por el método de la temperatura de la pérdida de peso. ²Temperatura de pico DTG. *200 % equivalente proteico (700 g/kg de urea, 268 g/kg de maíz entero molido y 32 g/kg de flor de azufre).

La tercera etapa mostró similitudes en la descomposición de masa (Tabla 2) en la muestra de mistura de maíz y urea, y urea extrusa (15,6 y 14,6 %, respectivamente) y, en DTG (Fig. 4), el pico derivado fue más extenso cuando comparado a las primeras etapas.

Discusión

Usando las imágenes de la MEB, es posible diferenciar morfológicamente que el proceso de extrusión altera las estructuras originales de la urea (Fig. 1a y b) y maíz (Fig. 1c y d), atribuido a la forma espesada y a las modificaciones como la desaparición de gránulos de almidón (Fig. 1h), que fue posiblemente causado por la alta presión, temperatura y humedad. La extrusión gelatinizó el almidón y envolvió la estructura no-cristalina de la urea, la cual formó una estructura compleja. Esas características de la urea extrusa hacen la liberación de N más lenta y gradual (Fig. 2), lo que puede mejorar la utilización por las bacterias ruminales² y, asociada a una fuente de energía del almidón de maíz, puede aumentar la síntesis de las proteínas microbianas en los animales ruminantes.

La rápida solubilización de N de la muestra de maíz y urea es evidenciada por la manutención de las formas originales obtenidas por las imágenes MEB (Fig. 1e y f) y cerca de 90 % de la muestra de nitrógeno es representada por la fracción A, la cual es el nitrógeno soluble no-proteico de la urea (Tabla 1). Ese comportamiento indica que el carbohidrato debe ser rápidamente soluble en cantidad suficiente para sincronizar con el NH₃ y promover la síntesis de proteínas microbianas. La constancia de la liberación de N en otros tiempos son contribuciones de fracciones B1, B2 y B3 de maíz N (Tabla 1), que son fracciones más degradadas.

La reducción en la solubilización de nitrógeno en medio acuoso de la muestra de urea extrusa (Fig. 2), con la fracción uniforme A representando 90 % del nitrógeno presente en la muestra (Tabla 1), puede ser evidenciada en el agrupamiento de estructuras observado en la Fig. 1 (g y h), lo cual configura el cambio estructural del almidón y urea después del proceso de extrusión. La mayor parte de N presente en las muestras pertenecientes a la fracción A de la proteína también justifica el pico de liberación de N alrededor de 30 minutos. El patrón constante de liberación de N, observado hasta 360 min, permitiría que el amoníaco libre del rumen fuese usado por microorganismos del rumen junto a carbohidratos degradables en el rumen en velocidades diferentes para sintetizar la proteína microbiana y prevenir la pérdida de NH₃.

La tasa de liberación de N debe ser dependiente de la tasa de degradación de la fuente de carbohidrato, donde la producción del amoníaco en sinergia con el metabolismo energético del contenido ruminal es un factor decisivo en la formación de proteína ruminal⁶.

El exceso de N debido a la alta solubilidad de urea (Fig. 2) puede, además de causar toxicidad, constituir un desperdicio de energía, pues requiere energía para eliminar el amoníaco en exceso en la sangre, impactando negativamente el ambiente, con implicaciones económicas y de salud¹².

La eficiencia de utilización de proteínas en ruminantes puede ser mejorada manteniendo cantidades adecuadas de NNP y manejo alimentar con el uso de urea extrusa en la dieta de bovinos. Hasta el nivel de 80 g/100 kg de peso corporal de complementación de urea extrusa (starea con proteína equivalente a 200 % PB) no hay influencias negativas sobre el ambiente ruminal¹³.

La industria mejoró para facilitar el uso de NNP en dietas de ruminantes, como el proceso de extrusión de urea, para prevenir envenenamiento por amoníaco y aumentar la disponibilidad de nitrógeno para síntesis microbiana¹⁴. La muestra de urea mostró que la estabilidad térmica para su punto de fusión en 133,0°C¹⁵.

Cuanto menor la pérdida de masa en la muestra de urea, en las etapas tres y cuatro (Tabla 2), eso demuestra que las reacciones complejas de polimerización y despolimerización de compuestos de alta masa molecular ocurrieron y continuaron¹⁶.

Los productos gaseosos generados por la pirólisis de urea son entre temperaturas de 132 a 190 °C. Resultados experimentales muestran que, de 132,5 a 160 °C, urea solo estaba envuelta en reacciones de consumo. Reacciones de formación de biureto y ácido cianúrico, en vez de la descomposición de urea, ocupan la mayor parte del consumo de urea. Arriba de 160 °C, la reacción dominante pasa para la formación de descomposición de cianato, mientras el punto de temperatura de conversión del biuret es 170 °C. La producción de NH₃ fluctúa entre 132,5-170 °C, pero continua a subir entre 170 y 190°C¹⁷. En atmósferas con 5 % o 10 % de O₂, la producción más alta de NH₃ fue alcanzada en 200°C¹⁵. La inestabilidad de muestra de maíz entero molido fue caracterizada por la pérdida de agua, posiblemente por la hidrólisis del almidón (Tabla 2). La segunda etapa fue caracterizada por una pérdida de masa de compuestos de matriz que salen rápidamente (Fig. 4), posiblemente por la descomposición de carbonos de cadena larga y hubo pocas interacciones físicas o químicas entre el compuesto que sale y la matriz de la muestra¹⁶.

La presencia de agua influyó la estabilidad térmica de la muestra de maíz y urea, pues actúa como un plastificante en los cristales de almidón, lo que puede disminuir la temperatura de transición del vidrio y, consecuentemente, la temperatura de fusión de los cristales¹⁸, como evidenciado en la muestra de maíz. 3).

El atraso en el comienzo de la descomposición de la urea extrusa y disminución de la pérdida de masa se da posiblemente por la gelatinización del almidón, lo que, después de ese proceso, pierde la organización original de su estructura, enlaces de hidrógeno se rompen con fusión cristalina³, siendo el grado de gelatinización mayor para alimentos extrusos, pues las temperaturas usadas en el proceso son más altas, hasta 250 °C en comparación con 60–95°C¹⁹. Además, la harina de maíz producida por el proceso de molienda en seco del grano del maíz tiene, en su composición, una proporción más grande de almidón, entre 50 y 55 %, 10 % proteína y 1 % lípido²⁰.

En la segunda etapa de la curva DTG (Fig. 4), la temperatura del comienzo de la variación de masa (Tabla 2) fue más alta para la urea extrusa, lo que indica que el proceso de extrusión atrasa la pérdida de masa.

La caracterización de urea extrusa proporciona un comportamiento detallado del producto durante el uso, lo que permite su inclusión de acuerdo con las características del animal y diferentes manejos nutricionales.

Conclusiones

Nosotros recomendamos el proceso de extrusión para reducir la solubilización de N de productos de nitrógeno y aumentar la calidad nutricional del producto final. El proceso de extrusión de urea y maíz para obtener la urea extrusa (starea) cambia la estructura, aumenta la calidad por la gelatinización del almidón y complejación con los cristales de urea, previniendo la rápida solubilización del nitrógeno.

Materiales y métodos

Muestras y caracterización nutricional Muestras de dos productos, llamada de mezcla de maíz y urea, fueron usadas, correspondiendo a la mezcla de ingredientes antes de extrusión y urea extrusa - Starea (Amiréia Pajoara 2005). El proceso de producción de urea extrusa consiste en la complejación de urea con una molécula gelatinizada de almidón, empleando presión, temperatura y humedad, obteniendo así el starea. Las dos muestras, con una proteína equivalente a 200 %, fueron compuestos de urea de ganadería, grano de maíz molido y flor de azufre en las proporciones de 70 %, 26,8 % y 3,2 %, respectivamente³.

Los dos ingredientes fueron mandados para análisis químico en el tamaño original de la partícula para probar el efecto de procesamiento. La materia seca (DM; Tabla 1) fue determinada por el secado en un horno a 105 °C durante la noche (método 930,15²¹). El contenido total de nitrógeno fue calificado por el método Kjeldahl usando el destilador TE-036/1 (Tecnal, Piracicaba, Brasil) (método 976.05²¹). La determinación del extracto etéreo fue hecha en un extractor Ankom XT 10 (Ankom Technology, NY, EE. UU.). El contenido de ceniza fue determinado con un incinerador muffle (método 942,05²¹) y el contenido de materia orgánica (OM) fue calculado por la diferencia entre 100 y el porcentaje de ceniza. Para determinar el contenido de fibra en detergente neutro (NDF)²², α -amilasa termoestable (Termamyl 120 L Sigma-Aldrich, 3050 Spruce Street, Saint Louis, MO, USA) y los resultados fueron expuestos en ceniza residual. Se determinó el porcentaje de los carbohidratos totales (TC)²³ y de los carbohidratos no-fibrosos (NFC)²⁴.

Se determinó fracciones de proteína de acuerdo con la metodología escrita con la fracción A correspondiendo a la NPN, B1 correspondiendo a proteína soluble verdadera, B2 o N a la proteína insoluble verdadera en el rumen, pero sin enlace con la NDF, B3 correspondiendo a la fibra potencialmente disponible N-ligada (nitrógeno insoluble en detergente neutro) y C, la porción indisponible, ligada a la lignina (nitrógeno insoluble en detergente ácido).

Observaciones de la microscopía electrónica de barrido (MEB). El estudio de la morfología muestral (Fig. 1) fue hecho por las mediciones de microscopía electrónica de barrido (MEB) en el equipamiento JEOL modelo JSM 6380LV en el Instituto de Física de la Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (INFI/UFMS).

Muestras en la forma original de urea, grano de maíz molido, mistura de maíz y urea, y urea extrusa fueron dispersados en una cinta de carbono de dos lados para fijación al topo de una colilla de cobre. El conjunto fue llevado para la cámara de pulverización catódica (modelo Denton Vacuum, Desk III) para la disposición de una fina camada de oro en la superficie de las partículas de polvo para obtener una mejor resolución de imagen MEB y aumentar la conductividad de la muestra para evitar los efectos de la carga electrónica que obstaculiza la resolución de la imagen. Para el análisis, un voltaje de 15 kV, distancia de trabajo (WD) de 12 mm y punto de tamaño 20 fueron usados. Lecturas fueron hechas e imágenes fueron grabadas en aumentos de 27 y 2000 veces para fines de comparación morfológica.

Solubilidad de nitrógeno in vitro. Para estimar la liberación de nitrógeno (N) en diferentes productos, el método Kjeldahl fue empleado para determinar el nitrógeno total, con modificaciones¹⁷.

Inicialmente, 2 g de la muestra compuesta de maíz molido y urea, y urea extrusa (starea) fueron envasados en vidrios de 500 mL de capacidad. Entonces, 200 mL de agua destilada fueron añadidos y las muestras fueron llevadas a baño maría (39,5 °C). El tiempo total de análisis fue de 360 min, y una alícuota de 2 mL (en triplicado) fue removida del sobrenadante en los tiempos 0, 30, 60, 120, 180, 240, 300 y 360 min, de acuerdo con la metodología descrita para Itavo et al.⁶.

Esas alícuotas fueron envasadas en tubos digestivos conteniendo 5 mL de 2N de hidróxido de potasio (KOH) y 13 mL de agua destilada. En la secuencia, los tubos digestivos fueron llevados para el destilador de nitrógeno (TECNAL— TE-036/1). En el mismo equipo, un Erlenmeyer conteniendo 10 mL de ácido bórico 2 % fue acoplado y, entonces, la destilación ocurrió hasta obtener 75 mL de solución.

Por fin, titulaciones de las soluciones recuperadas fueron hechas en el destilador, con 0,005 N de ácido clorhídrico (HCl) usado hasta el punto de mutación de las soluciones ser obtenido. Con la destilación, una titulación también fue hecha en triplicado para cada producto y para cada tiempo de análisis. También fue realizado un ensayo en blanco (solamente agua destilada) en el comienzo de cada tiempo de análisis para verificar contaminaciones del equipo.

Los datos obtenidos con las titulaciones fueron sometidos a la siguiente ecuación: Concentración de N (g/dL) = volumen de HCl usado x factor de corrección de HCl x 0,005 x 0,014 x 100/2.

Mediciones de termogravimetría y termogravimetría derivada. Las curvas de termogravimetría (TG) y termogravimetría derivada (DTG) de las muestras de urea original, maíz entero molido y mistura maíz y urea, y urea extrusa fueron determinadas con un análisis termogravimétrico TGA Q50 V20.13, Build 39 (New Castle, EUA), en el Instituto Químico de la Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Alrededor de 6,0 mg de cada muestra fue pesada en una célula de platino y los testes fueron realizados en una atmósfera de aire sintético, con una tasa de calentamiento de 10 °C min⁻¹, a partir de una temperatura ambiente hasta 900 °C. Las temperaturas en las cuales la tasa de descomposición de la muestra fue máxima (Td) fueron obtenidas por las curvas DTG. Los datos fueron analizados usando el programa Advantage/ Universal Analyzes v5.5.24 de la TA Instruments.

Declaración de Ética. Todos los estudios y muestras de las plantas fueron realizados de acuerdo con las directrices institucionales, nacionales o internacionales relevantes. Nosotros usamos grano de maíz (*Zea mays*) comercial.

Recibido: 22 de marzo de 2021; Acepto: 20 de agosto de 2021

Published online: 15 September 2021

Referencias

1. Patra, A. K. & Aschenbach, J. R. Ureases 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. Sjö, 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).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Federal del Mato Grosso do Sul (UFMS), el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq), la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES, Código de Financiación 001), Fundación de Apoyo al Desarrollo de la Enseñanza, Ciencia y Tecnología del Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) y la Amiréia Pajoara Indústria e Comércio.

Contribuciones autorales

N.D.K., L.C.V.I. diseñaron el proyecto. N.D.K., A.G.I. prepararon el material. N.D.K., L.C.S.O., E.N.A. metodología. N.D.K., L.C.V.I. escribieron el borrador original. C.C.B.F.I., G.S.D., A.M.D., A.L.C.G., G.T.S. revisión de la escrita y edición.

Conflicto de interés

Los autores no declaran conflicto de interés.

Información adicional

Correo y pedido de material deben ser dirigidos a L.C.V.Í.

Información sobre re-ediciones y permisos está disponible en www.nature.com/reprints.

Nota del Editor Springer Nature permanece neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en mapas publicados y afiliaciones institucionales.



Acceso Público Este artículo está licenciado bajo una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0, que permite el uso, uso compartido, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o

formato, siempre que dé el crédito apropiado al autor original y a la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizan cambios. Las imágenes o material de terceros en este artículo están incluidos en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito al material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons y su uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, es necesario obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor. Para ver una copia de esa licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© Lo(s) Autor(es) 2021