



Comparación del infrarrojo-cercano fecal con métodos convencionales para estimar consumo y digestibilidad en ovinos¹

Comparison of fecal near-infrared with conventional methods to estimate intake and digestibility in sheep

Diana Parra-Forero², Olga Mayorga Mogollón², Claudia Ariza-Nieto²

- ¹ Recepción: 4 de julio, 2022. Aceptación: 31 de octubre, 2022. El trabajo formó parte de la tesis de maestría en producción animal de la primera autora “Estimación del consumo voluntario y digestibilidad de la materia orgánica en ovinos mediante el análisis fecal por espectroscopia de reflectancia infrarroja cercana”. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Bogotá, Colombia.
- ² Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Tibaitata. Mosquera, Colombia. Teléfono +57(4)227300. dparra@agrosavia.co (autora para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0003-3734-0378>); lmayorga@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0001-7872-6109>); cariza@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0001-9965-0625>).

Resumen

Introducción. El consumo y la digestibilidad son parámetros que definen la calidad de un forraje, sin embargo, son difíciles y costosos de estimar. La tecnología espectroscopia de infrarrojo cercano aplicada a las heces (NIRSf) es una alternativa a los métodos convencionales de referencia para estimar el consumo voluntario (CVMS) y digestibilidad de materia seca (DMS) en ovinos. **Objetivo.** Comparar la tecnología NIRSf con métodos convencionales para la estimación de CVMS y DMS en ovinos en confinamiento. **Materiales y métodos.** Se realizaron seis bioensayos en el centro de investigación Tibaitata, Cundinamarca, Colombia, durante los años 2019 y 2021 con cinco ovinos (PV 58,28±11 kg) para estimar CVMS y DMS por tres métodos: gravimetría, marcadores y NIRSf. Los animales fueron alimentados con seis regímenes alimenticios contrastantes en su valor nutricional. Se colectaron muestras de forrajes y heces, las cuales se secaron y molieron para su posterior análisis químico y espectral. **Resultados.** La estimación de CVMS y DMS fue diferente ($p < 0,001$) en los seis regímenes alimenticios evaluados, donde el CVMSPM varió de 37,54 a 82,58 g/kg PV^{0,75} y la DMS varió de 36,32 a 58,81 %. En la comparación de la estimación del CVMS y DMS por el método referente (gravimétrico) con los métodos de marcadores y NIRSf, se observó que el método NIRSf presentó mejor ajuste comparado con el de marcadores, al presentar menor valor de la raíz del cuadrado medio del error (-1,53 y -1,75, respectivamente), menor error medio absoluto (-3,01 y -0,5, respectivamente) y mayor coeficiente de determinación (+0,09 y +0,28, respectivamente). **Conclusión.** La estimación del CVMS y la DMS por medio de ecuaciones NIRSf presentó mejor ajuste comparado con la metodología de marcadores; sin embargo, es necesario mejorar la precisión de las calibraciones con muestras de heces de animales bajo diferentes contextos productivos.

Palabras clave: rumiantes, forrajes, análisis espectral, heces, marcadores.



Abstract

Introduction. Intake and digestibility are parameters that define the quality of a forage; however, they are difficult and expensive to estimate. Near infrared spectroscopy technology applied to feces (NIRSf) is an alternative to conventional reference methods to estimate dry matter voluntary intake (DMVI) and digestibility (DMD) in sheep. **Objective.** To compare NIRSf technology with conventional methods for estimation of DMVI and DMD in confinement sheep. **Materials and methods.** Six bioassays were carried out at the Tibaitata research center, Cundinamarca, Colombia, during 2019 and 2021 with five sheep (LW 58.28±11 kg) to estimate DMVI and DMD by three methods: gravimetry, markers and NIRSf. The animals were fed six diets contrasting in their nutritional value. Forage and feces samples were collected, dried, and ground for subsequent chemical and spectral analysis. **Results.** The estimation of DMVI and DMD was different ($p<0.001$) in the six evaluated feeding regimens, where the DMVIMW ranged from 37.54 to 82.58 g/kg LW^{0.75}, and the DMD ranged from 36.32 to 58.81 %. In the comparison of the estimation of DMVI and DMD by the referent method (gravimetric) with marker and NIRSf methods, shows that the NIRSf method presented a better adjustment compared to the marker method, presenting less root mean square error value (-1.53 and -1.75, respectively), lower mean absolute error (-3.01 and -0.5, respectively), and higher determination coefficient (+0.09 and +0.28, respectively). **Conclusion.** The estimation of the DMVI and the DMD by means of the NIRSf equations presented a better fit compared to the marker method, however, it is necessary to improve the accuracy of the calibrations using feces samples from animals under different productive contexts.

Keywords: ruminants, forage, spectral analysis, feces, markers.

Introducción

El valor nutricional de los forrajes está en función del contenido de nutrientes, del consumo voluntario de materia seca (CVMS), su digestibilidad (DMS) y la eficiencia en la que estos pueden ser metabolizados y utilizados por los rumiantes (Detmann et al., 2014). De los criterios antes mencionados, el consumo de alimento es un parámetro que presenta dificultad para su medición, ya que corresponde a un proceso complejo, afectado por múltiples factores (Decruyenaere et al., 2015).

La digestibilidad de materia seca puede ser determinada por métodos *in vitro* e *in situ* y por medio de marcadores internos como la fibra detergente neutro indigestible (FDNi) (dos Santos Cabral et al., 2017). Una alternativa indirecta a los métodos convencionales utilizados para la determinación de digestibilidad y consumo de materia seca es la espectroscopia de reflectancia visible y del infrarrojo cercano (400-2500 nm) aplicada a las heces (NIRSf) (Jancewicz et al., 2017).

Las primeras aplicaciones conocidas con la tecnología NIRSf fueron desarrolladas por Norris et al. (1976), quienes estimaron parámetros *in vivo* como digestibilidad o consumo de forrajes. Luego se describieron los componentes presentes en las heces y discutieron las posibles relaciones entre los espectros fecales y la dieta consumida por bovinos (Lyons & Stuth, 1992; Showers et al., 2006). Estudios recientes en ovinos y bovinos para carne y leche, han generado modelos predictivos con el uso de NIRSf para determinar la composición química y botánica de la dieta (Núñez-Sánchez et al., 2016), la digestibilidad y el consumo de materia orgánica (Andueza et al., 2019; Johnson et al., 2017; Lahart et al., 2019).

El objetivo del presente trabajo fue comparar la tecnología NIRSf con métodos convencionales para la estimación de CVMS y DMS en ovinos en confinamiento.

Materiales y métodos

Ubicación

El estudio se realizó entre marzo del 2019 y enero del 2021 en la Unidad de Bioensayos de Nutrición Animal del Centro de Investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), localizado 4°41'44,0"N 74°12'19,9"O a 2550 m s. n. m., con una temperatura promedio de 14 °C en la región altoandina de Colombia.

Animales y regímenes alimenticios

Los procedimientos con los animales descritos en este estudio fueron aprobados por el comité de bioética de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, con registro CB-FMVZ-UN-012-2020.

Se realizaron seis bioensayos con cinco ovinos machos de la raza Romney Marsh en edades entre uno y cuatro años, con un peso vivo promedio de 58,3±11 kg. Los animales fueron alojados en corrales individuales de 6 m² con piso de concreto, dotados con comedero y bebedero de canal. A cada oveja se le colocó un arnés con bolsa para la colecta total de heces (CTH).

El período experimental fue de dieciséis días; los primeros tres días correspondieron al período de adaptación al confinamiento, al alimento y a los arneses; en el cuarto día se inició el suministro dos veces al día en cápsulas de celulosa de 2,5 g del marcador externo Cr₂O₃ grado reactivo analítico de 98 % de pureza; en los últimos seis días se pesó y colectó dos veces al día (8:00 am y 5:00 pm) el forraje ofrecido, el forraje residual y excreción fecal (EF). Los animales se pesaron en una báscula digital portátil al inicio y al final de cada bioensayo.

Para los bioensayos se utilizaron recursos forrajeros usados en los sistemas de alimentación de rumiantes en la región altoandina de Colombia, cuya composición química se presenta en el Cuadro 1. Los recursos forrajeros fueron ofrecidos bajo seis regímenes alimenticios, los cuales fueron contrastantes en su valor nutricional: 1) kikuyo fresco (KKF), 2) ryegrass oreado (RGO), 3) kikuyo oreado+angleton heno (KKO+ANH), 4) kikuyo oreado+alfalfa heno (KKO+ALH), 5) kikuyo oreado+tilo oreado (KKO+TLO) y 6) kikuyo oreado+maíz ensilaje (KKO+EM). El forraje oreado se cosechó y secó a temperatura ambiente durante 72 h, mientras que el forraje fresco se suministró luego de ser cosechado.

A cada animal se le suministró 10 g diarios de sal mineralizada y agua fresca a voluntad. Al final de cada día se pesó el forraje que no fue consumido (residual) para calcular el consumo individual y así, determinar la proporción de estos en los regímenes alimenticios.

Cuantificación de marcadores

Las muestras colectadas de forrajes y heces se secaron en una estufa con aire forzado a 65 °C por 48 h (AOAC 2001.12), se molieron, tamizaron a 1 mm y conservaron a temperatura ambiente para su análisis químico y espectral. El contenido de FDNi en estas muestras fue determinado con el procedimiento descrito por Bender et al. (2016) e incubación durante 288 h con re-inoculación a 144 h. La cuantificación del Cr₂O₃ en las muestras de heces se hizo a través de la digestión ácida en ácido fosfórico como describió de Souza et al. (2014) y determinación por espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado (ICP-OES) a una longitud de onda de 283,54 nm. La intensidad de las señales analíticas se interpoló en una curva de calibración externa con un patrón de cromo para ICP entre 0,05 y 100 mg Cr⁶⁺/L.

Cuadro 1. Promedio de la composición química de los recursos forrajeros usados en los regímenes alimenticios evaluados. Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Table 1. Average chemical composition of the forage resources used in the evaluated feeding regimens. Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

	Kikuyo fresco (<i>Cenchrus clandestinus</i>)	Kikuyo oreado (<i>Cenchrus clandestinus</i>)	Ryegrass oreado (<i>Lolium perenne</i>)	Angleton heno (<i>Dichanthium aristatum</i>)	Alfalfa heno (<i>Medicago sativa</i>)	Tilo oreado (<i>Sambucus peruviana</i>)	Maíz ensilaje (<i>Zea mays</i>)
N	25	120	20	30	30	30	30
Materia seca (%)	14,31	68,01	30,86	88,12	81,72	51,52	29,64
Proteína (% MS)	16,21	15,97	11,76	5,12	17,56	30,44	10,09
Ceniza (% MS)	10,18	11,06	11,84	10,93	8,68	12,48	7,60
Extracto etéreo (% MS)	1,51	1,74	2,84	2,13	1,40	2,72	1,94
FDN (% MS)	60,55	59,41	57,46	71,62	54,13	36,77	51,76
FDA (% MS)	33,54	32,67	31,96	42,53	28,67	24,73	25,43
Lignina (% MS)	7,36	6,99	6,51	9,89	6,00	5,02	5,06
Almidón (% MS)	1,50	2,93	3,77	0,82	4,34	5,36	14,03
Carbohidratos solubles (%)	2,73	2,39	4,02	1,24	1,92	3,44	3,32
Fenoles totales (g kg ⁻¹ MS)	19,22	21,57	20,73	20,32	15,31	25,56	14,44

FDN: fibra en detergente neutro; FDA: fibra en detergente ácido. / FDN: neutral detergent fiber; FDA: acid detergent fiber.

Valores determinados por NIRS de acuerdo con Ariza-Nieto et al. (2018). / Values determined by NIRS according to Ariza-Nieto et al. (2018).

Estimación de digestibilidad de materia seca y consumo voluntario

La digestibilidad de materia seca (DMS) *in vivo* se calculó mediante la ecuación 1 (Church et al., 2002) y la ecuación 2 (Velásquez et al., 2018):

$$DMS (\%) = \frac{MS \text{ consumida (kg)} - \text{Excrecion fecal real (kg MS)}}{MS \text{ consumida (kg)}} * 100 \quad (1)$$

$$DMS (\%) = 100 - [100 \times (\frac{FDNi \text{ en forraje (\%)} }{FDNi \text{ en heces (\%)}})] \quad (2)$$

El consumo voluntario de materia seca por el método gravimétrico (CVMS) se calculó como el promedio de los seis días de medición (ecuación 3):

$$CVMS \text{ (kg MS/d)} = \text{forraje ofrecido (kg MS)} - \text{forraje residual (kg MS)} \quad (3)$$

La estimación del CVMS por el método de marcadores (ecuación 6), empleó la DMS calculada por FDNi (ecuación 2) y EF estimada por Cr₂O₃ (ecuación 4), esta ecuación considera la tasa de recuperación de este marcador en el tracto digestivo del animal (ecuación 5).

$$\text{Excreción fecal (kg/d)} = \frac{\text{Dosis de marcador diaria (g/d)}}{\text{Concentración del marcador en heces (g/kg DM)}} \times \text{Tasa de recuperación} \quad (4)$$

$$\text{Tasa de recuperación (\%)} = \frac{\text{Cromo en heces (g)} * 100}{\text{Cromo suministrado (g)}} \quad (5)$$

$$\text{Consumo voluntario (kg MS/d)} = (\text{Excreción fecal}/1 - \text{Digestibilidad}) * 100 \quad (6)$$

Calibración y validación de ecuaciones NIRSF

Las calibraciones se desarrollaron con el software WinISI 4.10.0.15326 (Foss and Infrasoft International, USA). Las muestras de forrajes y heces se colocaron en una copa circular de 60 mm de diámetro, para ser escaneadas en el espectrofotómetro VIS/NIR (FOSS NIR S DS2500) en el modo de reflectancia (R) difusa de la región espectral entre los 400 a 2500 nm, con resolución de 0,50 nm. Se realizaron 32 exploraciones sucesivas, de las cuales se registraron tres espectros expresados como el resultado del log (1/R) con el software ISIScan 4.8.0.1

Las calibraciones se realizaron con el promedio espectral de las heces por animal, el cual corresponde a las muestras obtenidas durante los seis días de medición del bioensayo. Se realizaron seis bioensayos (uno por cada régimen alimenticio) y en cada bioensayo se tenían cinco animales para un total de treinta espectros fecales utilizados en el conjunto de calibración. Una vez finalizados los seis días de medición se tomaron tres muestras de heces adicionales por bioensayo; los dieciocho espectros fecales se utilizaron para el conjunto de validación.

El método de regresión de mínimos cuadrados parciales modificados, se utilizó para obtener ecuaciones de predicción por cada parámetro, luego se realizó la validación cruzada en el conjunto de calibración para seleccionar el número óptimo de factores y evitar el sobreajuste. Para corregir la radiación dispersa se utilizó el método de variación normal y de tendencia SNV y detrend.

En la calibración se consideraron dos segmentos espectrales Visible+NIR (408-2492,2 nm) y NIR (1108-2492,2 nm). Para cada segmento se aplicó cuatro tratamientos matemáticos (1.4.4.1, 1.8.8.1, 2.4.4.1, 2.8.8.1), los cuales consistieron en una notación de cuatro dígitos, donde el primer dígito es el orden de la derivada, el segundo dígito es el segmento de derivación y el tercer y cuarto dígito corresponden al suavizado de la señal (Ozaki et al., 2006).

El rendimiento de la calibración de las ecuaciones NIRSF para la digestibilidad y el consumo voluntario de materia seca, se evaluó mediante el error estándar de validación cruzada (EEVC), el coeficiente de determinación en validación cruzada (R^2) y la desviación predictiva residual (RPD).

El mejor modelo de calibración obtenido fue sometido a una validación externa para evaluar la exactitud y precisión de las ecuaciones de calibración, mediante el error estándar de predicción corregido por el sesgo (EEPC) y el coeficiente de determinación en la predicción (r^2), el sesgo, la pendiente y RPD. Un modelo predictivo con $RPD < 1,9$ es considerado no adecuado, entre 2 y 2,9 solo se recomienda para fines de evaluación y $RPD > 3$ es considerado bueno (Williams, 2014).

Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Inst., Inc., Cary, NC). Los resultados fueron sometidos a un análisis de varianza bajo un diseño completo al azar, con el régimen alimenticio como factor de tratamiento, se utilizó el procedimiento GLM y la separación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las variables consumo voluntario de materia seca por día (CVMSD), consumo voluntario de materia seca por peso vivo (CVMSPV), consumo voluntario de materia seca por peso metabólico (CVMSPM), obtenidas por el método gravimétrico y digestibilidad de la materia seca (DMS),

y el valor nutricional de los regímenes alimenticios con base en el procedimiento CORR. A las asociaciones que mostraron coeficientes de correlación significativos ($p < 0,05$), se les realizó un análisis de regresión lineal.

Para evaluar el método con mejor ajuste a los valores observados por gravimetría, se utilizó el conjunto de validación compuesto por muestras independientes. La comparación de los métodos se realizó mediante la determinación de los estadísticos raíz del cuadrado medio del error (RMSE), el error medio absoluto (EAM) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), a partir de los residuales obtenidos en dos análisis de regresión lineal, donde se consideraron los valores del método gravimétrico como variable observada y los valores estimados por el método de marcadores y NIRSF como variable de predicción. Se cumplió con los supuestos de homogeneidad y homocedasticidad para las varianzas del error experimental de las variables evaluadas.

Resultados

Consumo voluntario y digestibilidad de la materia seca por el método gravimétrico

La composición nutricional de los regímenes alimenticios se presenta en el Cuadro 2. La MS varió entre 14,31 % y 79,59 %, debido a la presentación de los forrajes ofrecidos a los animales (fresco, oreado, henificado y ensilado). El mayor contenido de proteína con 21,23 % se presentó en KKO+TLO; seguido por los regímenes

Cuadro 2. Proporción del consumo y composición química de los regímenes alimenticios evaluados en bioensayos con ovinos en confinamiento. Unidad de bioensayos de nutrición animal del Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Table 2. Proportion of voluntary intake and chemical composition of the feeding regimens evaluated in bioassays with confinement sheep. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

	KKF	RGO	KKO+ANH	KKO+ALH	KKO+TLO	KKO+EM	Valor-P
N	25	20	60	60	60	60	
*Consumo forraje A (%)	100	100	74,42	40,46	70,51	38,88	
*Consumo forraje B (%)	0	0	25,58	59,54	29,59	61,12	
Materia seca (% MS)	14,31 ^e	30,86 ^d	79,59 ^a	77,05 ^a	60,95 ^b	42,54 ^c	<0,001
Proteína (% MS)	16,21 ^b	11,76 ^c	12,73 ^c	17,15 ^b	21,23 ^a	11,98 ^c	<0,001
Ceniza (% MS)	10,18 ^b	11,84 ^a	11,63 ^a	9,42 ^c	11,56 ^a	8,87 ^d	<0,001
Extracto etéreo (% MS)	1,51 ^d	2,84 ^a	2,10 ^b	1,47 ^d	2,01 ^b	1,82 ^c	<0,001
FDN (% MS)	60,55 ^b	57,46 ^c	63,02 ^a	56,36 ^{cd}	51,30 ^c	55,12 ^d	<0,001
FDA (% MS)	33,54 ^b	31,96 ^c	36,65 ^a	29,74 ^d	28,69 ^d	28,89 ^d	<0,001
Lignina (% MS)	7,36 ^b	6,51 ^c	7,79 ^a	6,32 ^{cd}	6,18 ^{cd}	5,96 ^d	<0,001
Almidón (% MS)	1,50 ^d	3,77 ^b	2,55 ^c	3,23 ^{bc}	3,77 ^b	9,85 ^a	<0,001
Carbohidratos solubles (% MS)	2,73 ^c	4,02 ^a	1,99 ^d	1,76 ^d	2,69 ^c	3,39 ^b	<0,001
Fenoles totales (g kg ⁻¹ MS)	19,22 ^c	20,73 ^b	21,55 ^{ab}	17,54 ^d	22,63 ^a	17,32 ^d	<0,001

KKF: kikuyo fresco, RGO: ryegrass oreado, KKO+ANH: kikuyo oreado+angleton heno, KKO+ALH: kikuyo oreado+alfalfa heno, KKO+TLO: kikuyo oreado+tilo oreado, KKO+EM: kikuyo oreado+maíz ensilaje. *Proporción calculada por diferencia porcentual de los pesos ofrecidos y residuales de los forrajes. Letras diferentes en las filas indican diferencias significativas ($p < 0,05$). / KKF: kikuyo fresh, RGO: ryegrass aired, KKO+ANH: kikuyo aired+angleton hay, KKO+ALH: kikuyo aired+alfalfa hay, KKO+TLO: kikuyo aired+tilo aired, KKO+EM: kikuyo aired+corn silage. *Proportion calculated by percentage difference of the offered and residual weights forages. Different letters in the rows indicate significant differences ($p < 0,05$).

alimenticios KKO+ALH y KKF con valores promedio 17,15 % y 16,21 %, respectivamente. Los demás regímenes alimenticios presentaron niveles de proteína por debajo de 12,70 %. La FDN varió entre 51,30 %, y 63,02 %, donde el valor más alto fue para KKO+ANH y el menor para KKO+TLO.

En los regímenes alimenticios que tenía dos especies forrajeras disponibles para el animal, la proporción de consumo voluntario varió así: en los regímenes alimenticios KKO+ALH y KKO+EM los animales consumieron menos KKO (40,46 % y 38,88 %, respectivamente), mientras que en los regímenes KKO+ANH y KKO+TLO los animales consumieron más KKO (74,42 % y 70,51 %, respectivamente).

El consumo voluntario y la digestibilidad de materia seca estimados por el método de referencia, se presentan en el Cuadro 3. Los resultados muestran que la estimación de estas variables por el método gravimétrico (referente) fueron diferentes ($p < 0,001$) en los regímenes alimenticios evaluados. El CVMSPM varió en un rango de 37,54 a 82,58 g kg⁻¹ PV^{0,75}, observándose que en los regímenes alimenticios basados en un único forraje el consumo fue diferente ($p < 0,05$). Los animales del grupo RGO superaron en 31,25 g kg⁻¹ PV^{0,75} a los animales del grupo KKF. El mayor consumo lo presentaron los ovinos que consumieron KKO+EM ($p < 0,05$). La DMS varió en un rango de 36,32 % a 58,81 %, el grupo de animales que consumieron KKO+ANH presentaron una disminución en la digestibilidad de la materia seca en 22,52 % frente a KKO+TLO.

Cuadro 3. Consumo voluntario y digestibilidad de diferentes regímenes alimenticios suministrados a ovinos confinados determinados por método gravimétrico. Unidad de bioensayos de nutrición animal del Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Table 3. Voluntary intake and digestibility of different feeding regimens supplied to confinement sheep determined by the gravimetric method. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Régimen alimenticio	N	CVMSD (kg /d)	CVMSPV (% PV)	CVMSPM (g /kg PV ^{0,75})	DMS(%)
KKF	25	0,79 ^c ±0,1	1,37 ^c ±0,3	37,54 ^c ±5,9	51,01 ^b ±4,2
RGO	20	1,32 ^{ab} ±0,2	2,57 ^{ab} ±0,2	68,79 ^b ±5,5	55,19 ^{ab} ±2,5
KKO+ANH	30	1,27 ^b ±0,1	2,09 ^b ±0,4	58,35 ^b ±7,4	36,32 ^c ±1,9
KKO+ALH	30	1,33 ^{ab} ±0,1	2,26 ^b ±0,3	62,39 ^b ±6,8	52,44 ^{ab} ±5,2
KKO+TLO	30	1,41 ^{ab} ±0,2	2,52 ^{ab} ±0,3	68,28 ^b ±5,6	58,81 ^a ±3,2
KKO+EM	30	1,70 ^a ±0,3	3,03 ^a ±0,3	82,58 ^a ±7,5	55,28 ^{ab} ±2,9
Valor p		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

KKF: kikuyo fresco, RGO: ryegrass oreado, KKO+ANH: kikuyo oreado+angleton heno, KKO+ALH: kikuyo oreado+alfalfa heno, KKO+TLO: kikuyo oreado+tilo oreado, KKO+EM: kikuyo oreado+maíz ensilaje. Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0,05$). / KKF: kikuyo fresh, RGO: ryegrass aired, KKO+ANH: kikuyo aired+angleton hay, KKO+ALH: kikuyo aired+alfalfa hay, KKO+TLO: kikuyo aired+tilo aired, KKO+EM: kikuyo aired+corn silage. Different letters in columns indicate significant differences ($p < 0,05$).

El consumo voluntario puede ser afectado por la calidad de los forrajes consumidos por los ovinos, es así como se observó que el CVMSPM mostró una asociación positiva con el contenido de almidón ($r=0,83$; $p=0,040$), lo que significó el aumento de una unidad porcentual de almidón en el régimen alimenticio, lo que hizo que el consumo aumentara en 0,16 g kg⁻¹ de peso metabólico (Figura 1).

La digestibilidad de la materia seca también se vio afectada por la calidad de los forrajes, mostró una asociación negativa con el contenido de FDN ($r=-0,89$; $p=0,014$), observándose que por cada unidad porcentual de aumento en el FDN en el régimen alimenticio, la digestibilidad de la materia seca disminuyó en 0,46 % (Figura 2).

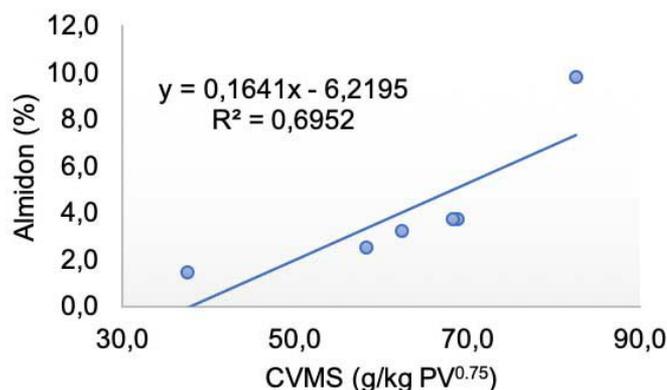


Figura 1. Relación del consumo voluntario de materia seca (CVMS) ajustado por el peso metabólico en ovinos con el contenido de almidón de los regímenes alimenticios evaluados. Unidad de bioensayos de nutrición animal del Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Figure 1. Dry matter voluntary intake relationship (CVMS) adjusted by metabolic weight in sheep with starch content of evaluated feeding regimens. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

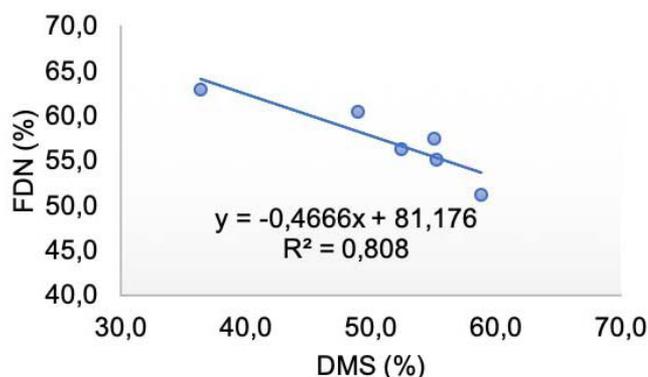


Figura 2. Relación de la digestibilidad de la materia seca (DMS) con el contenido de fibra en detergente neutro (FDN) de los regímenes alimenticios evaluados en ovinos. Unidad de bioensayos de nutrición animal del Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Figure 2. Dry matter digestibility relationship (DMD) with neutral detergent fiber (NDF) content of evaluated feeding regimens in sheep. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Estimación del consumo voluntario y la digestibilidad de materia seca por el método de marcadores

El consumo voluntario y la digestibilidad de materia seca, estimados por el método de marcadores se presenta en el Cuadro 4. El régimen alimenticio de KKO+ANH presentó un mayor ($p < 0,05$) contenido de FDNi tanto en el forraje ofrecido como en el residual. En los regímenes alimenticios KKO+EM, RGO y KKF, se observaron valores intermedios de FDNi, los cuales fueron similares entre sí ($p > 0,05$), mientras que el régimen que presentó menor valor fue KKO+TLO ($p < 0,05$). El FDNi en las heces fue más alto para KKO+ALH y KKO+EM, diferente ($p > 0,05$) de RGO y KKO+ANH con valores intermedios pero similares entre sí ($p > 0,05$) y de los regímenes alimenticios KKF y KKO+TLO con los valores más bajos.

Cuadro 4. Consumo voluntario y digestibilidad de la materia seca de ovinos en confinamiento, estimados mediante el método de marcadores. Unidad de bioensayos de nutrición animal del Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Table 4. Voluntary intake and digestibility of dry matter in confinement sheep, estimated by the marker method. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Régimen alimenticio	N	FDNi FO (% FDN)	FDNi FR (% FDN)	FDNi heces (% MS)	EF CTH (kg MS/d)	EF Cromo (kg MS/d)	CVMSD (kg /d)	CVM-SPV (% PV)	CVMSPM (g /kg PV ^{0.75})	DMS (%)
KKF	25	12,59 ^c ±0,3	13,22 ^c ±0,8	24,07 ^c ±0,9	0,40 ^d ±0,03	0,44 ^c ±0,1	0,86 ^d ±0,1	1,50 ^c ±0,4	41,16 ^c ±7,9	48,26 ^c ±2,2
RGO	20	12,99 ^c ±0,1	12,93 ^c ±0,3	28,09 ^b ±0,7	0,62 ^{bc} ±0,1	0,53 ^c ±0,1	1,14 ^{cd} ±0,1	2,25 ^{bc} ±0,2	59,71 ^{bc} ±4,2	53,12 ^{ab} ±1,5
KKO+ANH	30	16,89 ^a ±0,3	19,90 ^a ±0,3	27,00 ^b ±1,1	0,81 ^a ±0,1	0,85 ^a ±0,03	1,61 ^b ±0,1	2,66 ^{ab} ±0,5	72,28 ^b ±10,6	46,82 ^c ±2,7
KKO+ALH	30	15,74 ^b ±0,3	15,48 ^b ±0,3	32,47 ^a ±1,7	0,62 ^{bc} ±0,02	0,64 ^{ab} ±0,04	1,31 ^c ±0,1	2,25 ^{bc} ±0,4	62,15 ^{bc} ±9,1	50,68 ^{bc} ±2,5
KKO+TLO	30	10,12 ^d ±0,2	9,63 ^d ±0,8	22,36 ^c ±0,4	0,57 ^c ±0,04	0,53 ^c ±0,1	1,20 ^c ±0,2	2,19 ^{bc} ±0,6	60,62 ^{bc} ±12,4	54,69 ^{ab} ±2,5
KKO+EM	30	13,20 ^c ±0,3	13,46 ^c ±0,2	31,01 ^a ±1,3	0,75 ^{ab} ±0,1	0,83 ^a ±0,1	1,97 ^a ±0,2	3,59 ^a ±0,1	97,68 ^a ±16,2	57,74 ^a ±1,8
Valor p		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

KKF: kikuyo fresco, RGO: ryegrass oreado, KKO+ANH: kikuyo oreado+angleton heno, KKO+ALH: kikuyo oreado+alfalfa heno, KKO+TLO: kikuyo oreado+tilo oreado, KKO+EM: kikuyo oreado+maíz ensilaje, FDNi FO: fibra en detergente neutro indigestible en forraje ofrecido, FDNi FR: FDNi en forraje residual, EF: excreción fecal, CTH: colecta total de heces. Letras diferentes en las columnas indican diferencias significativas entre los regímenes alimenticios evaluados ($p < 0,05$). / KKF: kikuyo fresh, RGO: ryegrass aired, KKO+ANH: kikuyo aired+angleton hay, KKO+ALH: kikuyo aired+alfalfa hay, KKO+TLO: kikuyo aired+Tilo aired, KKO+EM: kikuyo aired+corn silage, FDNi OF: Indigestible neutral detergent fiber in offered forage, FDNi RF: iNDF in residual forage, FO: fecal output, TFC: Total fecal collection. Different letters in the columns indicate significant differences between the evaluated diets ($p < 0.05$).

La estimación de la excreción fecal por medio del marcador externo Cr_2O_3 , mostró correlación positiva ($r=0,89$; $p < 0,001$) con la medida por la colecta total de heces. La excreción fecal medida a través de la colecta total de heces mostró que el menor valor ($p < 0,05$) lo obtuvieron los ovinos del régimen alimenticio KKF, mientras que cuando se usó el Cr_2O_3 como marcador externo los regímenes alimenticios de KKF, RGO y KKO+TLO registraron los valores más bajos ($p < 0,05$).

Los ovinos del régimen alimenticio KKO+EM presentaron el mayor CVMSPM ($p < 0,05$) comparado con los demás regímenes alimenticios evaluados, mientras que el menor consumo ($p < 0,05$) lo presentó el régimen KKF, tendencia similar a la observada con el método gravimétrico. La digestibilidad de la materia seca estimada por el método de marcadores fue mayor para KKO+EM comparado con los regímenes alimenticios KKF y KKO+ANH que presentaron las digestibilidades más bajas ($p < 0,05$), mientras que los regímenes KKO+ALH, RGO y KKO+TLO fueron similares entre sí ($p > 0,05$) con digestibilidades intermedias.

Calibración y validación de ecuaciones NIRSF

En el análisis de las características del espectro visible e infrarrojo cercano de heces de ovinos, se observaron cambios en la banda de absorción localizada en la longitud de onda 1930 nm que varía entre 0,23 y 0,38 unidades de absorbancia, esta región está relacionada con la concentración de agua (Jarque-Bascuñana et al., 2021), lo que muestra la variabilidad de humedad de los regímenes alimenticios ofrecidos (Figura 3).

En el análisis de componentes principales, los tres primeros componentes explicaron el 95,69 % de la variación de la información espectral obtenida en las heces (Figura 4). En el análisis discriminante de los espectros se observó que las heces provenientes de los animales alimentados con los regímenes alimenticios KKF y RGO

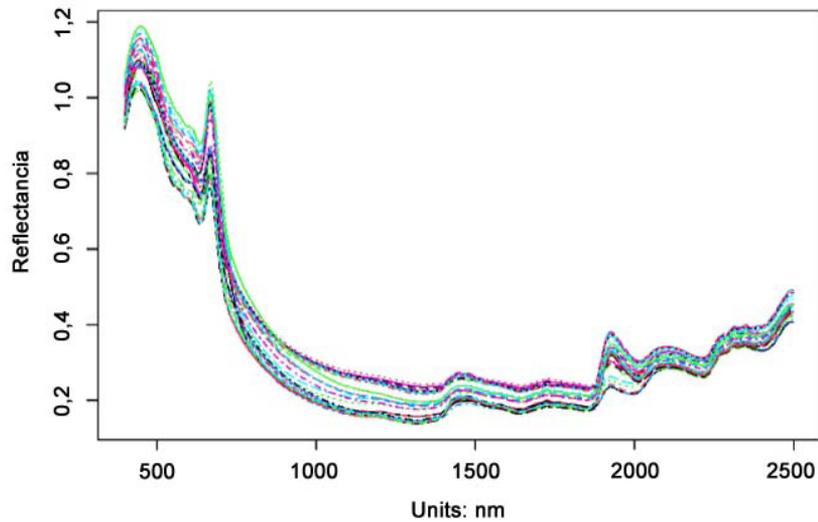


Figura 3. Espectros sin procesar de las heces de ovinos alimentados con diferentes regímenes alimenticios. Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Figure 3. Raw spectra of the feces of sheep fed different feeding regimens. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

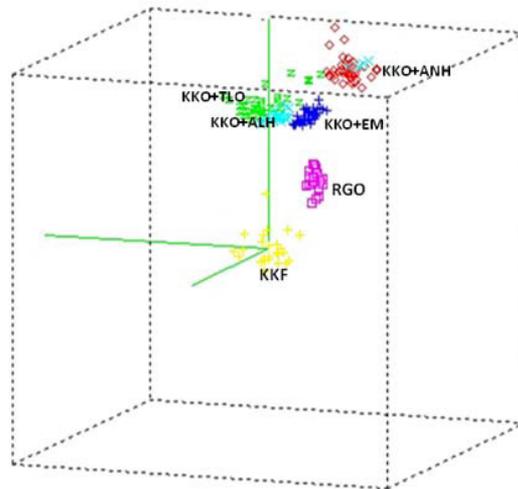


Figura 4. Distribución de los tres primeros componentes principales de las heces de ovinos alimentados con diferentes regímenes alimenticios. Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Figure 4. Distribution of the first three main components of the feces of sheep fed different feeding regimens. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

fueron diferentes a nivel espectral por su contenido de humedad (85,72 % vs 69,14 %). Además, los regímenes alimenticios conformados por dos forrajes fueron más cercanos a nivel espectral, excepto el régimen KKO+ANH, lo que pudo estar asociado al menor contenido de humedad (20,45 %).

La estadística descriptiva para CVMSD, CVMSPV, CVMSPM y DMS de ovinos en confinamiento se presenta en el Cuadro 5, para el conjunto de calibración y validación de ecuaciones NIRSf. Se observó que todos los parámetros mostraron una alta variabilidad porque los regímenes alimenticios fueron diseñados con diferente composición nutricional. La digestibilidad de la materia seca varió en 32,78 %, el consumo voluntario de materia seca en 1,55 kg/d, 2,81 % PV y en 71,07 g/kg PV^{0,75}. Para todos los parámetros la desviación estándar del conjunto de muestras fue menor a la media aritmética.

Cuadro 5. Estadística descriptiva del consumo voluntario y digestibilidad de materia seca de ovinos en confinamiento a partir de muestras fecales para el proceso de calibración y validación de ecuaciones NIRSf. Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Table 5. Descriptive statistics of parameters of dry matter voluntary intake and digestibility of confinement sheep from fecal samples for NIRSf equations calibration and validation. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Parámetro	Conjunto de calibración					Conjunto de validación externa				
	n	Media	DE	Mínimo	Máximo	N	Media	DE	Mínimo	Máximo
CVMSD (kg/d)	29	1,30	0,32	0,64	2,20	18	1,29	0,37	0,55	2,10
CVMSPV (% PV)	29	2,29	0,59	1,02	3,50	18	2,23	0,73	1,02	3,80
CVMSPM (g/kg PV ^{0,75})	29	62,7	15,2	28,7	92,2	18	61,2	18,5	28,6	99,7
DMS (%)	29	51,5	8,31	34,6	61,0	18	49,9	9,70	32,4	65,2

DMS: digestibilidad de la materia seca, CVMSD: consumo voluntario de materia seca por día, CVMSPV: consumo voluntario de materia seca por peso vivo, CVMSPM: consumo voluntario de materia seca por peso metabólico. / DMD: dry matter digestibility, DMVID: voluntary intake of dry matter per day, DMVILW: voluntary intake of dry matter by live weight, DMVIMW: voluntary intake of dry matter by metabolic weight.

Los resultados estadísticos de las ecuaciones de calibración de NIRSf para el consumo voluntario y la digestibilidad de materia seca se muestran en el Cuadro 6. Los modelos predictivos obtenidos para la predicción de consumo voluntario de materia seca expresado en porcentaje del peso vivo y en peso metabólico, presentó un mejor ajuste con el segmento NIR al aplicar la segunda derivada y tratamiento matemático 2.8.8.1, mientras que para la digestibilidad de la materia seca y para el consumo voluntario de materia seca en kilogramos por día presentaron mejores resultados cuando se usó el segmento Vis+NIR, primera derivada y tratamiento matemático 1.4.4.1.

Los parámetros estadísticos de la validación externa de las ecuaciones seleccionadas para CVMSD, CVMSPV, CVMSPM y DMS en ovinos se muestra en el Cuadro 7. Para la predicción del consumo voluntario de materia seca la calibración que presentó mejor resultado fue cuando este se ajustó por el peso metabólico (r^2 de 0,77 y valor de RPD de 2,04). El modelo seleccionado para la predicción de la digestibilidad de la materia seca presentó un valor intermedio de r^2 de 0,60 y valor de RPD de 1,46.

Comparación de métodos para la estimación de digestibilidad y el consumo de materia seca

Los resultados de la comparación de la estimación del consumo voluntario y digestibilidad de materia seca por el método gravimétrico con los métodos de marcadores y NIRSf, mostraron que los valores predichos con las ecuaciones NIRSf presentaron un mejor ajuste al compararlo con el de marcadores, debido a un menor valor de la raíz del cuadrado medio del error (-1,53 y -1,75, respectivamente), error medio absoluto (-3,01, -0,5, respectivamente) y mayor valor del coeficiente de determinación (+0,09, +0,28, respectivamente) (Cuadro 8).

Cuadro 6. Estadísticas de las ecuaciones NIRSf generadas para CVMS y DMS en ovinos. Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Table 6. Statistics of NIRSf equations for DMVI and DMD in sheep. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Parámetro	Tratamiento matemático	Segmento	T	N	DE	Calibración			Validación cruzada		
						EEC	R ²	RPD	EECV	R ^{2*}	RPD
CVMSD (kg/d)	1.4.4.1	Vis+NIR	3	29	0,32	0,17	0,72	1,89	0,21	0,58	1,57
		NIR	6	29	0,32	0,15	0,79	2,18	0,25	0,40	1,31
CVMSPV (% PV)	2.8.8.1	Vis+NIR	2	29	0,59	0,29	0,75	2,01	0,35	0,64	1,71
		NIR	4	29	0,59	0,26	0,81	2,28	0,32	0,69	1,83
CVMSPM (g/kg PV ^{0.75})	2.8.8.1	Vis+NIR	3	29	15,3	6,30	0,83	2,42	7,57	0,74	2,01
		NIR	4	29	15,3	5,75	0,86	2,65	7,22	0,77	2,11
DMS (%)	1.4.4.1	Vis+NIR	3	29	8,12	3,97	0,76	1,91	4,92	0,62	1,65
		NIR	3	29	8,11	4,51	0,69	1,75	5,66	0,49	1,37

T: número de términos PLS, n: número de muestras, DE: desviación estándar, EEC: error estándar de calibración, R²: coeficiente de determinación de la calibración, EECV: error estándar de validación cruzada, R^{2*}: coeficiente de determinación en la validación cruzada, RPD: desviación predictiva residual. / T: number of PLS terms, n: number of samples, DE: standard deviation, EEC: calibration standard error, R²: calibration coefficient of determination, EECV: cross-validation standard error, R^{2*}: cross-validation coefficient of determination, RPD: residual predictive deviation.

Cuadro 7. Parámetros estadísticos de la validación externa de las ecuaciones seleccionadas para la predicción de consumo voluntario y digestibilidad de materia seca de ovinos. Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Table 7. Statistical parameters of the external validation of the selected equations for the prediction of dry matter intake and digestibility of sheep. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitatá Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Parámetro	Tratamiento matemático	Segmento	Validación externa						
			n	EEP	EEPc	r ²	Sesgo	Pendiente	RPD
CVMSD (kg/d)	1.4.4.1	Vis+NIR	18	0,18	0,18	0,73	-0,01	1,169	1,94
CVMSPV (% PV)	2.8.8.1	NIR	18	0,40	0,41	0,68	-0,03	1,042	1,78
CVMSPM (g/kg PV ^{0.75})	2.8.8.1	NIR	18	7,69	7,69	0,77	-0,47	1,076	2,04
DMS (%)	1.4.4.1	Vis+NIR	18	5,55	5,50	0,60	-1,27	0,956	1,46

n: número de muestras usadas, EEP: error estándar de predicción, EEPc: error estándar de predicción corregido por el sesgo, r²: coeficiente de determinación de la predicción. / n: number of samples used, EEP: standard error of prediction, EEPc: standard error of prediction corrected for bias, r²: prediction coefficient of determination.

Cuadro 8. Parámetros estadísticos de comparación de la tecnología NIRSf y marcadores con el método gravimétrico para la estimación de consumo voluntario y digestibilidad de materia seca en ovinos. Centro de investigación Tibaitata, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

Table 8. Statistical parameters to compare NIRSf technology and markers with the gravimetric method for the estimation of dry matter voluntary intake and digestibility in sheep. Animal nutrition bioassay unit of Tibaitata Research Center, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cundinamarca, Colombia. 2019-2021.

	CVMS (g/kg PV ^{0.75})		DMS (%)	
	Marcadores	NIRSf	Marcadores	NIRSf
RCME	11,32	9,79	8,58	6,83
EMA	10,52	7,51	5,96	5,46
R² ajustado	0,63	0,72	0,22	0,50

NIRSf: predicción con ecuaciones seleccionadas. RCME: raíz del cuadrado medio del error, EMA: error medio absoluto, R² ajustado: coeficiente de determinación ajustado. / NIRSf: Prediction with selected NIRSf equations. RMSE: Root mean square error, MAE: Mean absolute error, Adjusted R²: Adjusted coefficient of determination.

Discusión

Uno de los factores que afecta el consumo voluntario de materia seca es el llenado ruminal. Se demostró que el consumo fue afectado por el contenido de materia seca del pasto kikuyo, atribuido al mayor contenido de agua en el rumen que genera un efecto de saciedad y, por consiguiente, una disminución en el consumo voluntario (Mejía-Díaz et al., 2017). En este estudio, a los animales que se les ofreció Kikuyo fresco (14,31 % MS, DMS 51,01%) consumieron 20,67 gMS/kg PV^{0.75} menos que los animales que estuvieron en el régimen alimenticio KKO+ANH (79,59 % MS, DMS 36,32 %).

La asociación negativa entre el valor de FDN del régimen alimenticio y la digestibilidad de la materia seca encontrada en este estudio, concuerda con lo reportado por Mertens y Ely (1979), quienes la atribuyeron a la proporción del FDN que es de digestión lenta. También se encontró una relación entre el contenido de almidón y el consumo, resultado similar a los reportados por de Oliveira Franco et al. (2017) y Lunesu et al. (2021), asociado a una mayor tasa de pasaje en dietas ricas en almidón.

Reportes en la literatura muestran ecuaciones NIRSf con 1020 muestras para digestibilidad de la materia orgánica (DMO) con EEPc = 2,3 % y r² = 0,85 y para consumo voluntario de materia orgánica (CVMO) con EEPc = 8,13 g/kg PV^{0.75} y r² = 0,48 (Andueza et al., 2017). En el presente trabajo se obtuvieron calibraciones para DMS (EEPc = 5,55 % y r² = 0,60 y RPD = 1,46) y CVMSPM (EEPc = 7,69 g/kg PV^{0.75} y r² = 0,77 y RPD = 2,04), con veintinueve muestras fecales, donde se demuestra que a pesar de la limitada cantidad de muestras usadas en la generación de ecuaciones NIRSf, se representa una amplia variación tanto de la DMS como del CVMS, debido a la diversidad en la calidad nutricional de los regímenes alimenticios evaluados.

Se han reportado calibraciones para DMO con una precisión de EEVC = 0,02 %, R² = 0,94 y RPD = 3,8 y para la predicción del CVMO con una eficiencia de EEVC=4,1 g/kg PV^{0.75}, R² = 0,86 y RPD = 2,52, con 951 muestras fecales (Decruyenaere et al., 2009). La variación de estos resultados puede estar asociada a la cantidad de muestras de referencia usadas en el conjunto de calibración, a las distintas condiciones de manejo de los bioensayos, a la diversidad de los recursos forrajeros, a las especies y etapas de crecimiento de los animales (Decruyenaere et al., 2015).

En esta investigación la DMS estimada por los tres métodos gravimétrico, marcadores y NIRSF (49,89, 51,38 % y 50,54 %, respectivamente), fueron similares a los obtenidos por dos Santos Cabral et al. (2017), quienes observaron que el método de marcadores fue preciso para determinar la DMS en forrajes cuando se comparó con el gravimétrico (51,03 % vs 51,28 %).

En lo relacionado con consumo voluntario en ovinos, Decruyenaere et al. (2003) no encontraron diferencias significativas entre los valores medidos por gravimétrico y los predichos por NIRSF (56,9 vs 56,6 g/kg PV^{0,75}, respectivamente), resultados inferiores a los obtenidos en el presente estudio cuando se compararon los métodos gravimétricos, de marcadores y NIRSF en ovinos en confinamiento (61,23, 61,47 y 61,70 g/kg PV^{0,75}, respectivamente). En un estudio con vacas lecheras se encontró que el uso de Cr₂O₃ como marcador externo sobreestimó el CVMS al compararlo con la gravimetría (28,10 vs 24,08 kg/d) (Velásquez et al., 2018). El uso de marcador interno FDNI permitió estimaciones similares de la DMS con el método de gravimetría (72,85 % vs 71,07 %).

El método de gravimetría ha sido considerado como método de referencia confiable para la determinación de CVMS y DMS, sin embargo, es laborioso y el uso de los arneses para la CTH requiere de una adaptación que podría alterar el comportamiento ingestivo de los animales y limitar el uso de hembras en los ensayos. El método de marcadores facilita el manejo de los animales sin necesidad de la CTH, debido a que solo se requiere de muestras representativas del forraje consumido y de las heces excretadas, pero las estimaciones pueden verse afectadas en cuanto a la variación en la tasa de recuperación en las heces (Decruyenaere et al., 2009). Por este motivo, la tecnología NIRS fecal ofrece múltiples ventajas una vez se desarrollen ecuaciones robustas en cuanto a la rapidez y facilidad para obtener resultados confiables de forma rutinaria, sin embargo, puede estar limitada si en los modelos generados no hay suficientes muestras que representen la variación tanto de la DMS como del CVMS de los diferentes sistemas de producción.

Conclusión

La estimación del CVMS y la DMS por medio de ecuaciones NIRSF presentó mejor ajuste comparado con la metodología de marcadores, sin embargo, es necesario mejorar la precisión de las calibraciones adicionando muestras de heces de animales bajo diferentes contextos productivos con el fin de mejorar la robustez de las calibraciones.

Agradecimientos

Las autoras agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia y a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) por el financiamiento del proyecto macro de investigación con ID 0001459: “Uso integral de estrategias tecnológicas para el fortalecimiento y sostenibilidad de la ganadería colombiana desde la cría”.

Referencias

- Andueza, D., Noziere, P., Herremans, S., de La Torre Capitan, A., Froidmont, E., Picard, F., Pourrat, J. Constant, I., Martin, C., & Cantalapiedra-Hijar, G. (2019, August). *Faecal-NIRS for predicting digestibility and intake in cattle: efficacy of two calibration strategy* [Conference presentation]. 70 Annual meeting of the European Association for Animal Production (EAAP), Ghent, Belgium. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02383603>
- Andueza, D., Picard, F., Dozias, D., & Aufrère, J. (2017). Faecal near-infrared reflectance spectroscopy prediction of the feed value of temperate forages for ruminants and some parameters of the chemical composition of feces: Efficiency of four calibration strategies. *Applied Spectroscopy*, 71(9), 2164–2176. <https://doi.org/10.1177/0003702817712740>

- Ariza-Nieto, C., Mayorga, O. L., Mojica, B., Parra, D., & Afanador-Tellez, G. (2018). Use of LOCAL algorithm with near infrared spectroscopy in forage resources for grazing systems in Colombia. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 26(1), 44–52. <https://doi.org/10.1177/0967033517746900>
- Bender, R. W., Cook, D. E., & Combs, D. K. (2016). Comparison of *in situ* versus *in vitro* methods of fiber digestion at 120 and 288 hours to quantify the indigestible neutral detergent fiber fraction of corn silage samples. *Journal of Dairy Science*, 99(7), 5394–5400. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10258>
- Church, D. C., Pond, W. G., & Pond, K. R. (2002). *Fundamentos de nutrición y alimentación de animales* (2ª ed.). Limusa Wiley.
- de Oliveira Franco, M., Detmann, E., de Campos Valadares Filho, S., Darlison Batista, E., de Almeida Rufino, L. M., Barbosa, M. M., & Lopes, A. R. (2017). Intake, digestibility, and rumen and metabolic characteristics of cattle fed low-quality tropical forage and supplemented with nitrogen and different levels of starch. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30(6), 797–803. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0629>
- de Souza, J., Batistel, F., Welter, K. C., Mendes Silva, M., Fleury Costa, D., & Portela Santos, F. A. (2014). Evaluation of external markers to estimate fecal excretion, intake, and digestibility in dairy cows. *Tropical Animal Health and Production*, 47, 265–268. <https://doi.org/10.1007/s11250-014-0674-6>
- Decruyenaere, V., Lecomte, P., Demarquilly, C., Aufrere, J., Dardenne, P., Stilmant, D., & Buldgen, A. (2009). Evaluation of green forage intake and digestibility in ruminants using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): Developing a global calibration. *Animal Feed Science and Technology*, 148(2–4), 138–156. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.03.007>
- Decruyenaere, V., Peters, M., Stilmant, D., Lecomte, P. H., & Dardenne, P. (2003). Near infrared reflectance spectroscopy applied to faeces to predict dry matter intake of sheep under grazing, comparison with n-alkanes and direct biomass measurement methods. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 3, 471–475.
- Decruyenaere, V., Planchon, V., Dardenne, P., & Stilmant, D. (2015). Prediction error and repeatability of near infrared reflectance spectroscopy applied to faeces samples in order to predict voluntary intake and digestibility of forages by ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 205, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.04.011>
- Detmann, E., Gionbelli, M. P., & Huhtanen, P. (2014). A meta-analytical evaluation of the regulation of voluntary intake in cattle fed tropical forage-based diets. *Journal Animal Science*, 92(10), 4632–4641. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7717>
- dos Santos Cabral, Í., Gomes Azevêdo, J. A., dos Santos Pina, D., Ribeiro Pereira, L. G., Moreira de Almeida, F., Lins Souza, L., & de Lima, R. F. (2017). Evaluation of internal markers as determinants of fecal dry matter output and digestibility in feedlot sheep. *Semina: Ciências Agrárias*, 38(5), 3331–3340. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n5p3331>
- Jancewicz, L. J., Swift, M. L., Penner, G. B., Beauchemin, K. A., Koenig, K. M., Chibisa, G. E., He, M. I., McKinnon, J. J., Yang W. -Z., & McAllister, T. A. (2017). Development of near-infrared spectroscopy calibrations to estimate fecal composition and nutrient digestibility in beef cattle. *Canadian Journal of Animal Science*, 97(1), 51–64. <https://doi.org/10.1139/cjas-2016-0107>
- Jarque-Bascuñana, L., Bartolomé, J., Serrano, E., Espunyes, J., Garel, M., Calleja Alarcón, J. A., López-Olvera, J. R., & Albanell, E. (2021). Near infrared reflectance spectroscopy analysis to predict diet composition of a mountain ungulate species. *Animals*, 11(5), Article 1449. <https://doi.org/10.3390/ani11051449>
- Johnson, J. R., Carstens, G. E., Prince, S. D., Ominski, K. H., Wittenberg, K. M., Undi, M., Forbes, T. D. A., Hafsa, A. N., Tolleson, D. R., & Basarab, J. A. (2017). Application of fecal near-infrared reflectance spectroscopy profiling for the

- prediction of diet nutritional characteristics and voluntary intake in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 95(1), 447–454. <https://doi.org/10.2527/jas2016.0845>
- Lahart, B., McParland, S., Kennedy, E., Boland, T. M., Condon, T., Williams, M., Galvin, N., McCarthy, B., & Buckley, F. (2019). Predicting the dry matter intake of grazing dairy cows using infrared reflectance spectroscopy analysis. *Journal of Dairy Science*, 102(10), 8907–8918. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16363>
- Lunesu, M. F., Decandia, M., Molle, G., Atzori, A. S., Bomboi, G. C., & Cannas, A. (2021). Dietary starch concentration affects dairy sheep and goat performances differently during mid-lactation. *Animals*, 11(5), Article 1222. <https://doi.org/10.3390/ani11051222>
- Lyons, R. K., & Stuth, J. W. (1992). Fecal NIRS equations for predicting diet quality of free-ranging cattle. *Journal of Range Management*, 45(3), 238–244. <https://doi.org/10.2307/4002970>
- Mejía-Díaz, E., Mahecha-Ledesma, L., & Angulo-Arizala, J. (2017). Consumo de materia seca en un sistema silvopastoril de *Tithonia diversifolia* en trópico alto. *Agronomía Mesoamericana*, 28(2), 389–403. <https://doi.org/10.15517/ma.v28i2.23561>
- Mertens, D. R., & Ely, L. O. (1979). A dynamic model of fiber digestion and passage in the ruminant for evaluating forage quality. *Journal of Animal Science*, 49(4), 1085–1095. <https://doi.org/10.2527/jas1979.4941085x>
- Norris, K. H., Barnes, R. F., Moore, J. E., & Shenk, J. S. (1976). Predicting forage quality by Near Infrared Reflectance spectroscopy. *Journal Animal Science*, 43(4), 889–897. <https://doi.org/10.2527/jas1976.434889x>
- Núñez-Sánchez, N., Carrion, D., Peña Blanco, F., Domenech García, V., Garzón Sigler, A., & Martínez-Marín, A. L. (2016). Evaluation of botanical and chemical composition of sheep diet by using faecal near infrared spectroscopy. *Animal Feed Science and Technology*, 222, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.09.010>
- Ozaki, Y., McClure, W. F., & Christy, A. A. (Eds.). (2006). *Near-infrared spectroscopy in food science and technology*. John Wiley & Sons.
- Showers, S. E., Tolleson, D. R., Stuth, J. W., Kroll, J. C., & Koerth, B. H. (2006). Predicting diet quality of white-tailed deer via NIRS fecal profiling. *Rangeland Ecology & Management*, 59(3), 300–307. <https://doi.org/10.2111/04-069.1>
- Velásquez, A. V., da Silva, G. G., Sousa, D. O., Oliveira, C. A., Martins, C. M. M. R., dos Santos, P. P. M., Balieiro, J. C. C., Rennó, F. P., & Fukushima, R. S. (2018). Evaluating internal and external markers versus fecal sampling procedure interactions when estimating intake in dairy cows consuming a corn silage-based diet. *Journal of Dairy Science*, 101(7), 5890–5901. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13283>
- Williams, P. (2014). The RPD statistic: A tutorial note. *NIR News*, 25(1), 22–26. <https://doi.org/10.1255/nim.1419>