

Predicción de la composición química de las heces y digesta ileal de cerdos mediante espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS)

Ricardo Ramos Cruz ^a

Ricardo Basurto Gutiérrez ^b

Ericka Ramírez Rodríguez ^b

Tércia Cesária Reis de Souza ^c

Gerardo Mariscal Landín ^{b*}

^a Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, México.

^b Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CENID-Fisiología y Mejoramiento Animal, Km 1 Carretera a Colón, 76280 Ajuchitlán, Querétaro, México.

^c Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ciencias Naturales, Querétaro, México.

*Autor de correspondencia: mariscal.gerardo@inifap.gob.mx

Resumen:

La espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) permite estimar la composición química de diversas muestras, (ingredientes, productos de origen animal, etc.); sin embargo, existe poca información de su uso con muestras de digesta ileal (DI) o heces (H) de cerdo; por lo que el objetivo fue desarrollar ecuaciones de predicción basadas en el método de cuadrados mínimos parciales para predecir la composición química de DI y H a través de un NIRS. Se utilizaron 110 muestras de DI y 202 de H de experimentos de digestibilidad, obteniéndose su espectro y mediante un modelo multivariado se desarrolló el método de predicción. Las variables analizadas en la DI fueron: proteína cruda (PC), Leucina (Leu), lisina (Lys) y treonina (Thr) y en las H: materia seca (MS), PC y energía (E). Los valores en DI fueron: PC: R^2 0.98, error estándar de calibración (SEC) 0.330, error estándar

de predicción (SEP) 0.640; Leu: R^2 0.95, SEC 0.040, SEP 0.102; Lys: R^2 0.93, SEC 0.077, SEP 0.143; Thr: R^2 0.67, SEC 0.209, SEP 0.187. En H fueron PC: R^2 0.98, SEC 0.95, SEP 1.19; E (kcal/kg): R^2 0.94, SEC 60.8, SEP 95.3; MS: R^2 0.87, SEC 0.83, SEP 1.15. Los resultados muestran que la robustez de la calibración (DE/SEP) fue buena para PC, 3.34, Leu 2.07 y Lys 2.48 y regular para Thr 1.94, la predicción (RPD) fue buena para PC 2.11 en la DI. En H las R^2 fueron altas para PC 0.98 y E 0.94. La mayor robustez fue para PC 5.59 y su predicción fue excelente 4.16 y buena para E 2.53. Se concluye que el NIRS puede predecir la PC en la DI y la PC y E en H. Para mejorar la estimación de aminoácidos en DI deben explorarse las causas que afectan la robustez de las calibraciones.

Palabras clave: Predicción, Proteína, Energía, Ileal, Fecal.

Recibido: 16/03/2022

Aceptado: 21/02/2023

Introducción

La producción porcina está cada vez más obligada a mejorar su eficiencia productiva ya que se estima que emite el 9 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero de la ganadería; de ese total las excretas aportan el 27.4 %, compuesto por el 70.1 % de metano y el 29.9 % de óxido nitroso⁽¹⁾. La cantidad de óxido nitroso puede ser reducida al mejorar la eficiencia alimenticia disminuyendo así la excreción de nitrógeno⁽²⁾. En ese aspecto el mayor potencial de mitigación se encuentra en el sistema semitecnificado, y esto es por una mejora en la eficiencia de la pira⁽¹⁾, aunque esa disminución de la excreción de nitrógeno es posible en cualquier sistema al mejorar la precisión en la formulación del alimento⁽³⁾.

Una herramienta para alcanzar este objetivo es la determinación de la digestibilidad de las materias primas y dietas utilizadas en la alimentación del cerdo, sobre todo en un sistema de producción como el mexicano que depende de una gran variedad de materias primas, a diferencia del sistema maíz-pasta de soya utilizado en algunos países como Estados Unidos y Brasil. Sin embargo, el desarrollo de estos estudios es largo y costoso sobre todo por los análisis de laboratorio que tienen que realizarse. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ha realizado varios estudios de digestibilidad ileal de los aminoácidos y total de la proteína y energía⁽⁴⁾, por lo que se usaron las muestras de digesta ileal y heces de dichos estudios para generar el modelo de calibración basado en el método de cuadrados mínimos parciales y así poder estimar la composición química de los contenidos ileales y de heces en un equipo de cercano infrarrojo.

El cercano infrarrojo pertenece al espectro electromagnético, el cual está dividido por regiones de acuerdo con la longitud de las ondas emitidas, la región del cercano infrarrojo (NIRS por sus siglas en inglés) está comprendida entre las longitudes de ondas de 780 a 2,500 nm; y se caracteriza porque su radiación no modifica la estructura de la materia, pero produce vibración de sus átomos, por ello su amplio uso en la industria y la producción animal^(5,6). Los átomos de H, C, N y O forman los grupos funcionales C-H, N-H y O-H; los cuales absorben parte de la energía emitida, y otra parte la reflejan creando bandas de absorción. La proporción y cantidad de estos grupos funcionales encontradas en la muestra hacen que su espectro sea único⁽⁷⁾; por lo que el NIRS puede predecir con precisión la composición química de las muestras escaneadas. Sin embargo, antes de usarlo como una herramienta para predecir la composición química de una muestra, es necesario obtener los modelos de predicción para cada tipo de muestra y analito que se desee analizar. Este proceso consiste en la asociación de la información espectral con los valores obtenidos en el laboratorio⁽⁸⁾. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue obtener los modelos de predicción en un aparato NIRS para estimar el contenido de proteína cruda, lisina, treonina y leucina en la digesta ileal y de materia seca, proteína y energía en heces de cerdo.

Material y métodos

El trabajo se realizó en el Centro Nacional de Investigación en Fisiología y Mejoramiento Animal (CENID-Fisiología), en Ajuchitlán Querétaro. Las muestras de digesta ileal y heces se obtuvieron de experimentos realizados previamente⁽⁹⁻¹⁵⁾, en los cuales se determinó la digestibilidad ileal y fecal de la materia seca (MS), energía (E) y proteína cruda (PC), y la digestibilidad ileal de los aminoácidos (AA). En todos los experimentos se respetaron los lineamientos de la CIOMS⁽¹⁶⁾ y de la Norma Oficial Mexicana para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio⁽¹⁷⁾.

Animales, jaulas y obtención de muestras

Todos los cerdos se alojaron en jaulas metabólicas individuales equipadas con comederos, bebederos de chupón y charolas para la colección de heces, todos los alimentos fueron en harina y son descritos en las referencias citadas; a los cerdos se les alimentó a 2.5 veces sus necesidades de ED de mantenimiento⁽¹⁸⁾. La instalación cuenta con control de temperatura la cual se mantuvo a $19 \pm 2^\circ\text{C}$. Las muestras de digesta ileal se liofilizaron y las de heces se secaron en una estufa de aire forzado a 55°C durante 48 h. Posteriormente, las muestras de digesta liofilizada se molieron a través de una malla de 0.5 mm y las de heces secas a través de una malla de 1 mm en un molino de laboratorio (Arthur H. Thomas Co. Philadelphia, PA).

Análisis de laboratorio

Los análisis de materia seca y proteína cruda se realizaron de acuerdo con los métodos oficiales 934.01 y 976.05 del AOAC⁽¹⁹⁾, la determinación de los marcadores de digestibilidad utilizados en los experimentos se realizó para el óxido de cromo de acuerdo con Fenton⁽²⁰⁾ y el óxido de titanio según Myers⁽²¹⁾. Para la determinación de los AA se utilizó el método 994.12 del AOAC⁽¹⁹⁾, el cual consiste en hidrolizar las muestras a 110 °C durante 24 h en HCl 6 mol/L, los análisis de aminoácidos se realizaron según Henderson⁽²²⁾ o Csapó⁽²³⁾. Los análisis de energía se realizaron en una bomba calorimétrica adiabática (1281, Parr, Moline, IL).

Procedimiento obtención de muestras en equipo NIRS

Las muestras se colocaron en una copa de cuarzo y se escanearon con un espectrofotómetro FT-IR Nicolet 6700 (Thermo Fisher Scientific, Inc), para la generación de los espectros se utilizó el programa OMNIC™. Los espectros se obtuvieron dentro la región del infrarrojo cercano (IC) (1000-2500 nm) y la absorbancia de los datos se expresó como el logaritmo del recíproco de R “(log 1/R)” donde R= reflectancia. Los espectros generados se alimentaron con los valores obtenidos en el laboratorio. El modelo estadístico multivariado utilizado fue el de cuadrados mínimos parciales, la primera o segunda derivada y los filtros de Savitzky-Golay con el Software TQ Analyst v8™. Las variables introducidas en el TQ Analyst v8 fueron: el contenido de materia seca, proteína, energía y aminoácidos. La calibración se realizó con 2/3 de las muestras y la validación con 1/3 ya fuera para muestra de heces o contenido ileal. La selección del mejor modelo predictivo se basó en la minimización de los siguientes estadísticos: error estándar de la predicción (SEP), y el error estándar de la calibración cruzada (SECV), y por otro lado la maximización del coeficiente de determinación (R^2). Para evaluar el poder de predicción del modelo de calibración, se consideró el índice: RPD= la proporción de la desviación de predicción. Así el poder de predicción de la calibración se considera: si RPD es menor a 1.5, no es útil la calibración; si RPD está entre 1.5 a 2.0, la calibración podría distinguir entre valores bajos y altos; si RPD está entre 2.0 y 2.5, la calibración tiene posibilidades de hacer predicciones cuantitativas; si RPD está entre 2.5 a 3.0, la predicción de la calibración es buena y si RPD es mayor a 3.0, la calibración hace excelente predicciones (Williams, 2003) citado por Saeys⁽²⁴⁾. Se consideraron “outlier” aquellas muestras con diferencias mayores a 2.5 desviaciones estándar, las cuáles se eliminaron del estudio.

Escaneo de muestras

Digesta ileal: Se utilizaron 119 muestras de digesta ileal. El análisis matemático utilizado fue el cuadrado mínimo parcial (CMP). El tratamiento matemático fue 1,4,13,6 (los números

representan el grado de la derivada, el ancho del intervalo sobre el cual se calcula la derivada, el nivel de suavidad y el nivel del orden del polinomio).

Heces: Se utilizaron 222 muestras. El modelo estadístico utilizado fue el cuadrado mínimo parcial (CMP), y se usó el tratamiento matemático 1,4,11,5 (ver explicación anterior).

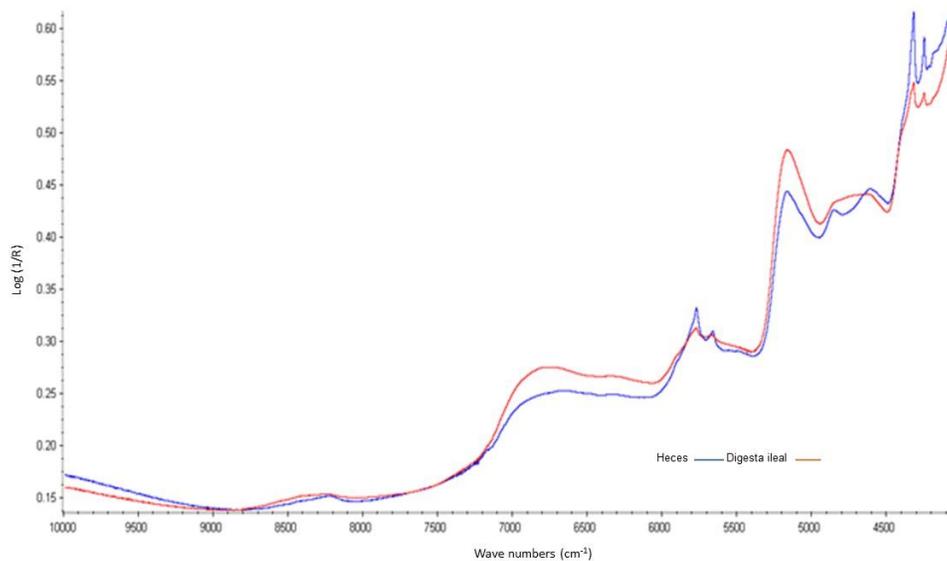
Gráficos. Los gráficos se realizaron utilizando los paquetes “ggplot2”⁽²⁵⁾ y “patchwork”⁽²⁶⁾ del programa R⁽²⁷⁾.

Resultados

Espectros

Espectros representativos de muestras de digesta ileal y heces se muestran en la Figura 1.

Figura 1: Espectro de muestras de digesta ileal y heces de una dieta a base de sorgo



Calibración para el análisis de la digesta ileal

Se utilizaron 119 muestras, de las cuales se eliminaron 9 debido a que se consideraron “outliers” de acuerdo al criterio mencionado anteriormente. Por lo que los resultados son sobre el análisis de las 110 muestras conservadas.

Proteína. La media y la desviación estándar (DE) para proteína fueron de 15.57 ± 2.15 ; con un rango de 11.1 a 20.8 (Cuadro 1). El coeficiente de determinación R^2 fue de 0.98, los

errores estándar de calibración (SEC), de validación cruzada (SECV) y de predicción (SEP), fueron 0.330, 1.020 y 0.640, respectivamente. Su RPD fue de 2.11 y la relación DE/SEP de 3.34 (Cuadro 2, Figura 2A).

Cuadro 1: Estadísticos de los nutrientes analizados en la digesta ileal^a

Digesta ileal	Proteína	Leucina	Lisina	Treonina
N	110	110	110	110
Media	15.57	0.85	0.58	0.71
DE ^b	2.15	0.21	0.29	0.36
mínimo	11.1	0.33	0.17	0.32
máximo	20.8	1.31	1.82	2.13

^aLos valores representan el contenido porcentual del nutriente en la materia seca, exceptuando la energía que está expresada en Kcal/kg.

^bDE = Desviación estándar.

Cuadro 2: Resultados de las calibraciones de los analitos en la digesta ileal

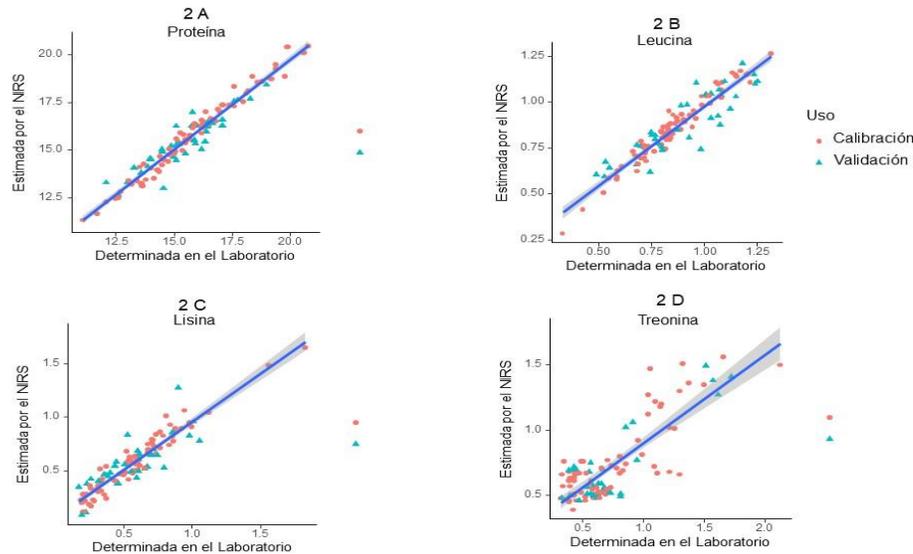
Calibración	Primera				Segunda
	Proteína	Leucina	Lisina	Treonina	Lisina
R ^{2a}	0.98	0.95	0.93	0.67	0.92
SEC ^b	0.330	0.040	0.077	0.209	0.070
SECV ^c	1.020	0.123	0.217	0.230	0.137
SEP ^d	0.640	0.102	0.143	0.187	0.115
RPD ^e	2.11	1.70	1.31	1.57	2.08
SD/SEP ^f	3.34	2.07	2.00	1.94	2.48

^aCoefficiente de determinación; ^bError estándar de la calibración; ^cError estándar de la calibración cruzada;

^dError estándar de la predicción; ^eDesviación estándar entre el error estándar de la calibración cruzada;

^fProporción de la desviación estándar entre SEP (SD/SEP).

Figura 2: Relación entre los valores predichos por el NIRS y los determinados en el Laboratorio para la digesta ileal



Los valores de las ecuaciones se reportan en el Cuadro 2

Leucina. La media y la desviación estándar fueron de 0.85 ± 0.21 . Con un rango de 0.33 a 1.31 (Cuadro 1). El coeficiente de determinación R^2 fue de 0.95, los valores de SEC 0.040, SECV 0.123 y SEP 0.102. Los resultados obtenidos para RPD fueron de 1.70 y para la relación DE/SEP fue de 2.07 (Cuadro 2, Figura 2B).

Lisina. La media y la desviación estándar fueron de 0.58 ± 0.29 . Con un rango de 0.17 a 1.82. El coeficiente de determinación R^2 fue de 0.93. Los valores de SEC 0.077, de SECV 0.217 y SEP 0.143, para RPD 1.31 y la relación DE/SEP fue de 2.00.

Con el fin de mejorar el modelo de predicción de lisina, se realizó una segunda calibración únicamente para lisina. Los estadísticos de DE/SEP y RPD mejoraron y hubo una mínima disminución (un punto porcentual) para la R^2 . La media, desviación estándar, y los valores mínimos y máximos fueron los mismos descritos en el párrafo anterior, por lo que el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.92. Los resultados de SEC 0.070, SECV 0.137, SEP 0.115. El resultado obtenido para RPD fue de 2.08 y para DE/SEP fue de 2.48. (Cuadro 2, Figura 2C).

Treonina. La media y la desviación estándar para treonina fueron de 0.71 ± 0.36 . Con un rango de 0.32 a 2.13 (Cuadro 1). El coeficiente de determinación R^2 fue de 0.67, los valores de SEC, SECV y SEP, fueron 0.209, 0.230 y 0.187 respectivamente. Su RPD fue de 1.57 y la relación DE/SEP de 1.94 (Cuadro 2, Figura 2D).

Calibración para el análisis de las heces

De las 222 muestras se eliminaron 20 muestras que se consideraron “outliers”. El resumen de los estadísticos generados por el NIRS se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Estadísticos de los nutrimentos analizados en las heces^a

Heces	Proteína	Energía	Materia seca
N	202	202	202
Media	20.05	4444	93.43
DE	6.65	269	2.48
Mínimo	4.50	3684	85.83
Máximo	29.20	4966	97.50

^aLos valores representan el contenido porcentual del nutrimento en la materia seca, exceptuando la energía que está expresada en Kcal/kg.

^bDE= desviación estándar.

Proteína. Su media y desviación estándar fueron de 20.05 ± 6.65 respectivamente, con un rango de 4.5 a 29.2 (Cuadro 3). Su coeficiente de determinación R^2 fue de 0.98. El valor de SEC 0.950, de SECV 1.600 y de SEP 1.190. Los estadísticos para RPD y DE/SEP fueron superiores a 4, obteniendo valores de 4.16 y 5.59 respectivamente (Cuadro 4, Figura 3A).

Cuadro 4: Resultados de las calibraciones de los analitos en las heces

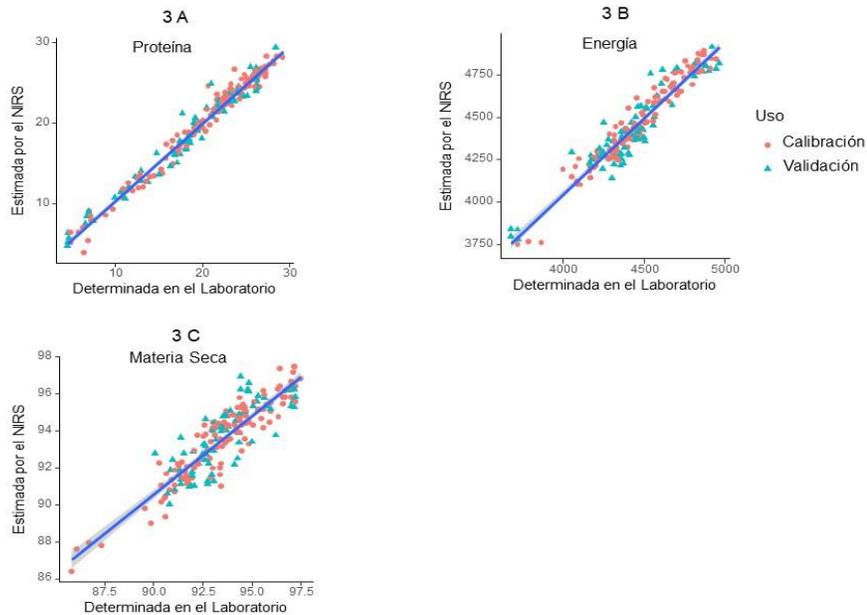
Parámetro	Proteína	Energía	Materia seca
R^{2a}	0.98	0.94	0.87
SEC ^b	0.950	60.8	0.830
SECV ^c	1.600	106.3	1.390
SEP ^d	1.190	95.3	1.150
RPD ^e	4.16	2.53	1.78
SD/SEP ^f	5.59	2.82	2.16

^aCoficiente de determinación; ^bError estándar de la calibración; ^cError estándar de la calibración cruzada;

^dError estándar de la predicción; ^eDesviación estándar entre el error estándar de la calibración cruzada;

^fProporción de la desviación estándar entre SEP (DE/SEP).

Figura 3: Relación entre los valores predichos por el NIRS y los determinados en el Laboratorio para las heces



Los valores de las ecuaciones se reportan en el Cuadro 4.

Energía. La media y la desviación estándar fueron de $4,444 \pm 269$; con un rango de 3,684 a 4,966 (Cuadro 3). El coeficiente de determinación R^2 fue de 0.94. Los resultados para los errores fueron para SEC 60.8, SECV 106.3 y SEP 95.3. Los resultados obtenidos para RPD fueron de 2.53 y para DE/SEP 2.82 (Cuadro 4, Figura 3B).

Materia seca. La media y desviación estándar fueron de 93.43 ± 2.48 , con un rango de 85.83 a 97.50 (Cuadro 3). El coeficiente de determinación R^2 fue de 0.87, los valores de SEC, SECV y SEP, fueron 0.830, 1.390 y 1.150, respectivamente. Su RPD fue de 1.78 y la relación DE/SEP de 2.16 (Cuadro 4, Figura 3C).

Discusión

El fundamento de la técnica de la espectroscopia se basa en la interacción de la luz con la composición molecular de la materia; en el infrarrojo cercano (longitudes de onda entre 800 y 2,500 nanómetros), la energía causa que los enlaces se exciten y vibren de dos formas: acortamiento (alta energía) o doblamiento (baja energía). La cual se puede entender de la siguiente manera: las moléculas son un conjunto de átomos unidos por enlaces y cada enlace vibra a una frecuencia determinada que depende del grupo químico involucrado en él, por lo que la energía de un rayo de luz incidente será absorbida cuando su frecuencia sea idéntica a la frecuencia natural del enlace intermolecular⁽⁷⁾. Por lo que el arreglo de enlaces químicos

de una muestra hace que los espectros sean únicos⁽²⁸⁾. Los enlaces orgánicos (C-H, N-H, O-H) reaccionan en diferentes longitudes de onda: en la región comprendida entre los 1,450 nm y 1,900 nm reaccionan los enlaces O-H; entre los 2,080-2,220 nm y los 1,560-1,670 nm reaccionan los enlaces N-H y entre los 1,100, 1,600, 1,700-1,800, 2,000 y 2,200-2,400 nm los enlaces C-H^(7,29,30).

Proteína y aminoácidos

Este es el primer trabajo en que se utilizó la tecnología de NIRS para predecir el contenido de proteína y aminoácidos en digesta ileal en cerdos. Los resultados obtenidos muestran que para predecir la composición de la digesta ileal la calibración para proteína cruda es aceptable de acuerdo a los estadísticos R^2 0.97, y el valor de RPD 2.11. Estos valores concuerdan con lo indicado por Saeys⁽²⁴⁾, quienes reportan que la calibración para estimar el N de excretas de cerdo tenía una $R^2=0.89$ y un RPD mayor a 3.0, lo que sugiere que el NIRS puede predecir el contenido de proteína cruda. De acuerdo al estadístico RPD (1.70, 1.31 y 1.57), la predicción de la concentración de lisina y leucina no es confiable, pero la calibración obtenida puede utilizarse para estimar su concentración en la digesta ileal. Sin embargo, en el caso de treonina los resultados no fueron favorables, ya que los valores de calibración y predicción obtenidos y el índice RPD ($R^2=0.67$ y $SEP=1.87$ y $RPD=1.57$) sugieren que es una calibración de comportamiento pobre y no recomendable. La baja confiabilidad en la predicción de treonina pudiera deberse a su riqueza en las pérdidas ileales endógenas de proteína ya que la mucina es rica en treonina y la secreción de mucina es modulada por varios factores dietéticos como la fibra y factores antinutricionales^(31,32), por lo que la concentración de treonina es más variable que la de los aminoácidos lisina y leucina; esta argumentación es apoyada por la capacidad de predicción del contenido de aminoácidos por el NIRS en trigo (213 muestras), cebada (185 muestras) y maíz (258 muestras)⁽³³⁾, ya que la variabilidad en el contenido de aminoácidos en ese tipo de muestras es menor que en la digesta ileal. En la calibración en la que se incluyó solo lisina (segunda calibración), se mejoró la predicción, lo cual se atribuyó a que las correlaciones obtenidas solo fueron para ese aminoácido; situación similar a lo reportado por Owens *et al*⁽³⁴⁾ quienes al predecir más de 20 características del trigo obtuvieron buenas predicciones solamente para algunas, entre ellos proteína. Los resultados del presente trabajo para predecir el contenido de proteína en las heces fueron superiores o iguales a trabajos previos⁽³⁵⁻³⁸⁾.

El rango de los valores de la proteína cruda en heces de cerdos (45 a 292 g/kg) es mayor a los reportados en trabajos previos^(35,36,38); este mayor rango es debido a las dietas utilizadas en los trabajos mencionados; por ejemplo, en los trabajos de Bastianelli⁽³⁶⁾ las muestras provinieron de una sola dieta experimental y en este estudio provinieron de varios experimentos y consecuentemente de diferentes dietas. No obstante, la mayor variación en los datos del presente trabajo hace que la calibración obtenida sea más robusta; esto se aprecia

en el R^2 , el cual es superior a los reportados en esos trabajos (0.98 vs 0.84, 0.88 y 0.89)^(35,36,38) e indica que la calibración fue excelente. De acuerdo a Saeys⁽²⁴⁾ la calibración puede utilizarse para predecir el contenido de proteína cruda de las heces. Lo que se refleja en los resultados del presente estudio ya que el error para predicción en este trabajo fue de 11.9 g/kg valor menor a los reportados en otros estudios. Además, sí se considera que la calibración tiene un valor de 4.15 del estadístico RPD, que es superior al valor de 3 recomendado por Saeys⁽²⁴⁾, lo que indica que la predicción es precisa y confiable.

Energía bruta

La predicción de la energía se logra gracias a las bandas de absorción de los enlaces orgánicos de C-H presentes en las muestras escaneadas y que corresponde a los enlaces presentes en los carbohidratos, lípidos y proteína del alimento. Los carbohidratos presentes en el alimento constituyen la principal fracción de la dieta de los cerdos, y se clasifican en azúcares (mono y disacáridos), oligosacáridos y polisacáridos (almidón y polisacáridos no amiláceos (PNA)). La mayor parte de los disacáridos y del almidón se digieren y absorben en el intestino delgado como lo muestra el trabajo de Reis *et al*⁽¹⁰⁾; mientras que los PNA no son hidrolizados por las enzimas digestivas del cerdo por lo que su degradación la realiza la microflora de ciego y colon a través de la fermentación⁽³⁹⁾.

La fuente de proteína dietaria varía en su contenido de aminoácidos según la fase productiva en que se encuentre el cerdo. Por ejemplo, los lechones consumen principalmente fuentes de origen animal como las proteínas del suero de leche, pescado, plasma animal etc. que son altamente digeribles. Conforme el aparato digestivo del cerdo va madurando las proteínas vegetales (principalmente provenientes de pasta de soya y otras oleaginosas) se van incrementando hasta usar únicamente proteínas vegetales; por lo que su digestibilidad es más variable que la de los carbohidratos o las grasas⁽⁴⁰⁾. En las muestras de digesta ileal estos enlaces corresponden mayoritariamente a los enlaces no digeridos del alimento consumido, así como a las pérdidas endógenas con las que contribuye el organismo del animal⁽⁴¹⁾. Los sustratos que no fueron absorbidos en el intestino delgado llegan al intestino grueso y son fermentados por la microbiota o excretados en las heces⁽⁴²⁾. En el caso de los aminoácidos, estos pueden ser utilizados para la síntesis de proteína microbiana o ser fermentados y utilizados como fuente de energía⁽⁴³⁾. Por lo que los enlaces C-H presentes en las heces corresponden mayoritariamente a los enlaces presentes en la microbiota y a los productos de la fermentación realizada por ella.

Los resultados obtenidos en la calibración para predecir la energía fueron excelentes, el R^2 fue de 0.94, lo cual indica una calibración excelente que puede ser utilizada en la predicción del contenido de energía de las heces⁽²⁴⁾. Los resultados del presente estudio concuerdan con

otros trabajos^(37,38). Además, la robustez de la predicción de la energía (RPD de 2.52) significa que es posible hacer predicciones cuantitativas.

Los resultados en la capacidad de predicción del contenido de proteína y energía de las heces son similares a los de Cruz-Conesa⁽⁴⁴⁾ cuyo objetivo fue desarrollar modelos de predicción para estimar la composición química de heces de tres diferentes especies de aves: pollos de engorda, gallinas de postura y pavos. Estos autores⁽⁴⁴⁾ reportaron que sus calibraciones explicaban arriba del 93 % de la variación y los RPD fueron superiores a 3.7 por lo que concluyen que el NIRS es capaz de estimar el contenido de proteína y energía de las heces.

Materia seca

La composición química de las muestras es afectada por el sitio de colecta (ileal o fecal), ya que, aunque gran parte del agua es reabsorbida en el intestino delgado el intestino grueso es dónde se termina de deshidratar la digesta⁽⁴⁵⁾; por lo que las heces tuvieron un mayor contenido de materia seca.

El contenido de humedad de las muestras tiene un impacto directo a la hora de generar el espectro, ya que el agua incrementa la absorción de la luz produciendo una mayor absorción en todo el espectro, por otro lado, las partículas sólidas hacen que la luz sea reflejada disminuyendo la absorción y generan mayores picos. Por ejemplo, la región entre los 1,450 nm y 1,900 nm corresponde a los enlaces químicos de O-H presentes en el agua, por lo que se presentan picos más pronunciados en esta región.

El coeficiente de determinación de la calibración para materia seca R^2 fue de 0.87, lo que indica que la calibración es precisa y confiable para determinar el contenido de materia seca en las muestras ileales según Saeys⁽²⁴⁾ con un error de calibración de 8.3 g/kg MS. Por otro lado, el error de predicción fue de 11.5 g/kg y se obtuvo un RPD de 1.78; este valor indica que es posible realizar una aproximación cuantitativa de la materia seca en las muestras de heces⁽²⁴⁾. Los valores relativamente bajos de predicción obtenidos para la materia seca comparados con los valores de proteína y energía se deben a que las muestras escaneadas fueron de experimentos que previamente se habían analizado para determinar la digestibilidad, por lo que las muestras estuvieron almacenadas. Aunque las muestras estuvieron almacenadas correctamente, es posible que se rehidrataron con la humedad ambiente, argumento apoyado por el trabajo de Garnsworthy *et al*⁽⁴⁶⁾ quienes al evaluar 156 muestras de grano de trigo y comparar los valores de materia seca obtenidos por el NIRS en las muestras previamente deshidratadas contra los valores de obtenidos en las muestras deshidratadas al momento del escaneo, observaron valores inferiores en las muestras previamente deshidratadas. Otro factor es que la variación del análisis del laboratorio para

materia seca fue estrecha (2.48 %); esta variación tan pequeña hace que al hidratarse las muestras, éstas se salgan fácilmente del rango calibrado afectando los resultados.

Conclusiones e implicaciones

Se concluye que el NIRS puede utilizarse como una herramienta analítica rápida y confiable para predecir el contenido de proteína cruda de la digesta ileal y de proteína cruda y energía de las heces. Para mejorar la estimación del contenido de aminoácidos en DI deben explorarse las posibles causas que afectan la robustez de las calibraciones. El uso de NIRS representa una reducción en los costos de los experimentos y menor tiempo para generar los resultados del contenido químico de las muestras.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado parcialmente por: el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y la Universidad Autónoma de Querétaro.

Literatura citada:

1. Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, *et al.* Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería – Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación. Roma: FAO; 2013.
2. Milgen JV, Dourmad JY. Concept and application of ideal protein for pigs. *J Anim Sci Biotechnol* 2015;6(1):1-11.
3. Andretta I, Pomar C, Rivest J, Pomar J, Lovatto PA, Neto JR. The impact of feeding growing-finishing pigs with daily tailored diets using precision feeding techniques on animal performance, nutrient utilization, and body and carcass composition. *J Anim Sci* 2014;92:3925–3936.
4. Rentería FJA, Gómez RS, López HLH, Ordaz OG, Anaya EAM, Mejía GCA, *et al.* Principales aportes de la investigación del INIFAP a la nutrición porcina en México: retos y perspectivas. *Rev Mex Cienc Pecu* 2021;12:79-110.
5. Givens DI, Deaville ER. The current and future role of near infrared reflectance spectroscopy in animal nutrition: a review. *Aust J Agric Res* 1999;50:1131–1145.
6. Osborne BG. Near-infrared spectroscopy in food analysis. In: *Encyclopedia of analytical chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd.; 2006:1-14.
7. Bertrand D. La spectroscopie proche infrarouge et ses applications dans les industries de l'alimentation animale. *INRA Prod Anim* 2002;15(3):209-219.

8. Shenk JS, Westerhaus MO. The application of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to forage analysis. In forage quality, evaluation, and utilization. In: Jr. GCF editor. Forage quality evaluation, and utilization. 1994:406-449.10.2134/1994.
9. Balderrama-Pérez VA, Gómez-Soto JG, Reis de Souza TC, Ramírez RE, Mariscal-Landín G. Is the kafirin profile capable of modulating the ileal digestibility of amino acids in a soybean meal-sorghum diet fed to pigs? *Anim Nutr* 2019;5:124-129.
10. Reis de Souza TC, Ávila AIE, Ramírez RE, Mariscal-Landín G. Effects of kafirins and tannins concentrations in sorghum on the ileal digestibility of amino acids and starch, and on the glucose and plasma urea nitrogen levels in growing pigs. *Livest Sci* 2019;227:29-36.
11. Aguilera A, Reis de Souza TC, Mariscal-Landín G, Escobar K, Montaña S, Bernal MG. Standardized ileal digestibility of proteins and amino acids in sesame expeller and soya bean meal in weaning piglets. *J Anim Physiol Anim Nutr* 2015;99:728-736.
12. Reis de Souza TC, Escobar García K, Aguilera AB, Ramirez RE, Mariscal-Landín G. Sesame meal as the first protein source in piglet starter diets and advantages of a phytase: a digestive study. *S Afr J Anim Sci* 2017;47:606-615.
13. Mariscal-Landín G, Ramírez RE, Cuarón IJA. Valor nutritivo de subproductos de cártamo para cerdos en finalización. *Rev Mex Cienc Pecu* 2017;8:331-340.
14. Mariscal-Landín G, Ramirez RE. Determinación de la digestibilidad de la proteína, aminoácidos y energía de canola integral en cerdos en crecimiento. *Rev Mex Cienc Pecu* 2017;8:297-304.
15. Luján OC. Desarrollo tecnológico para el uso del Ronozyme Proact en la producción porcina [tesis Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México. México: 2014
16. CIOMS. International guiding principles for biomedical research involving animals. In: Organization WH editor. International guiding principles for biomedical research involving animals. Council for International Organizations of Medical Sciences ed. Geneva; 2012.
17. Diario Oficial de la Federación. Especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio. Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999. Diario Oficial de la Federación 2001(2 de agosto).
18. INRA. L'alimentation des animaux monogastriques: porc, lapin, volailles. Paris, France: Institut National de la Recherche Agronomique; 1984.
19. AOAC. Official Methods of Analysis. 17 th. ed. Arlington, VA. USA: Assoc Offic Anal Chem; 2000.

20. Fenton TW, Fenton M. An improved procedure for determination of chromic oxide in feed and feces. *Can J Anim Sci* 1979;59:631-634.
21. Myers WD, Ludden PA, Nayigihugu V, Hess BW. Technical Note: A procedure for the preparation and quantitative analysis of samples for titanium dioxide. *J Anim Sci* 2004;82:179-183.
22. Henderson JH, Ricker RD, Bidlingmeyer BA, Woodward C. Rapid, accurate and reproducible HPLC analysis of amino acids. Amino acid analysis using Zorbax Eclipse AAA columns and the Agilent 1100 HPLC. Agilent technologies 2000(Part No.5980-1193E):10 pag. Agilent technologies home page at: www.agilent.com/chem/supplies.
23. Csapó J, Loki K, Csapó-Kiss Z, Albert C. Separation and determination of the amino acids by ion exchange column chromatography applying post-column derivatization. *Acta Agr Kapos* 2005;9:33-51.
24. Saeys W, Darius P, Ramon H. Potential for on-site analysis of hog manure using a visual and near infrared diode array reflectance spectrometer. *J Near Infrared Spectrosc* 2004;12:299-309.
25. Wickham H. *Elegant Graphics for data analysis*. Nueva York: Springer-Verlag; 2016. 260 Pag. doi:10.1007/978-3-319-24277-4.
26. Patil, I. Visualizations with statistical details: The 'ggstatsplot' approach. *J Open Source Softw* 2021;6:3167. doi:10.21105/joss.03167.
27. R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing. 2021.
28. Tester RF, Karkalas J, Qi X. Starch—composition, fine structure and architecture. *J Cereal Sci* 2004;39:151-165.
29. Saeys W, Xing J, de Baerdemaeker J, Ramon H. Comparison of transreflectance and reflectance to analyse hog manures. *J Near Infrared Spectroscopy* 2005;13:99-107.
30. Wehling RL. *Infrared spectroscopy. Food analysis*. Boston, MA Springer; 2010:407-420.
31. Montagne L, Piel C, Lallès JP. Effect of diet on mucin kinetics and composition: nutrition and health implications. *Nutr Rev* 2004;62(3):105-114.
32. Mariscal-Landín G, Reis de Souza TC, Hernández DAA, Escobar GK. Pérdidas endógenas de nitrógeno y aminoácidos en cerdos y su aplicación en la estimación de los coeficientes de digestibilidad ileal de la proteína y aminoácidos de las materias primas. *Téc Pecu Méx* 2009;47:371-388.

33. Fontaine J, Schirmer B, Hörr J. Near-infrared reflectance spectroscopy (nirs) enables the fast and accurate prediction of essential amino acid contents. 2. Results for wheat, barley, corn, triticale, wheat bran/middlings, rice bran, and sorghum. *J Agric Food Chem* 2002;50:3902-3911.
34. Owens B, McCann MEE, McCracken KJ, Park RS. Prediction of wheat chemical and physical characteristics and nutritive value by near-infrared reflectance spectroscopy. *Br Poult Sci* 2009;50:103-122.
35. Schiborra A, Bulang M, Berk A, Susenbeth A, Schlecht E. Using faecal near-infrared spectroscopy (FNIRS) to estimate nutrient digestibility and chemical composition of diets and faeces of growing pigs. *Anim Feed Sci Technol* 2015;210:234-242.
36. Bastianelli D, Bonnal L, Jaguelin-Peyraud Y, Noblet J. Predicting feed digestibility from NIRS analysis of pig faeces. *Animal* 2015;9:781-786.
37. de la Roza-Delgado B, Modroño SFV, Martínez-Fernández A, Soldado A. Suitability of faecal near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) predictions. *Spanish J Agric Res* 2015;13:1-7.
38. Nirea KG, Pérez de Nanclares M, Skugor A, Afseth NK, Meuwissen THE, Hansen JØ, *et al.* Assessment of fecal near-infrared spectroscopy to predict feces chemical composition and apparent total-tract digestibility of nutrients in pigs. *J Anim Sci* 2018;96:2826–2837.
39. Velayudhan DE, Kim IH, Nyachoti CM. Characterization of dietary energy in swine feed and feed ingredients: a review of recent research results. *Asian Australas J Anim Sci* 2015;28:1-13.
40. Aluthge ND, Van Sambeek DM, Carney-Hinkle EE, Li YS, Fernando SC, Burkey TE. Board invited review: The pig microbiota and the potential for harnessing the power of the microbiome to improve growth and health. *J Anim Sci* 2019;97(9):3741-3757.
41. Stein HH, Sève B, Fuller MF, Moughan PJ, de Lange CFM. Invited review: Amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: Terminology and application. *J Anim Sci* 2007;85:172-180.
42. Jha R, Fouhse JM, Tiwari UP, Li L, Willing BP. Dietary fiber and intestinal health of monogastric animals. *Front Vet Sci* 2019;6:48.
43. Lin R, Liu W, Piao M, Zhu H. A review of the relationship between the gut microbiota and amino acid metabolism. *Amino Acids* 2017:1-8.

44. Cruz-Conesa A, Ferré J, Pérez-Vendrell AM, Callao MP, Ruisánchez I. Use of visible-near infrared spectroscopy to predict nutrient composition of poultry excreta. *Anim Feed Sci Technol* 2021;283:115-169.
45. Thiagarajah J, Verkman A. Water transport in the gastrointestinal tract. In: Johnson LR editor. *Physiology of the gastrointestinal tract*. Fifth ed. Amsterdam: Academic Press; 2012:1757-1780.
46. Garnsworthy PC, Wiseman J, Fegeros K. Prediction of chemical, nutritive and agronomic characteristics of wheat by near infrared spectroscopy. *J Agric Sci Cambridge* 2000;135:409–417.