

REVISIÓN DE LITERATURA

## RELEVANCIA DE LAS PÉRDIDAS ENDÓGENAS DE NITRÓGENO EN LA NUTRICIÓN DE CERDOS

Sergio Salazar-Villanea<sup>1</sup>

### RESUMEN

---

Las secreciones endógenas de nitrógeno (N) en el proceso digestivo de las proteínas y su relación con los ingredientes, o la tecnología utilizada en el proceso de manufactura de alimentos balanceados para cerdos, es de suma importancia. La digestibilidad ileal verdadera de los ingredientes o dietas se mide tomando en cuenta la excreción de pérdidas endógenas básicas y específicas de N. Mientras las pérdidas endógenas básicas dependen únicamente del consumo de materia seca de los animales, las pérdidas específicas dependen de factores relacionados a los ingredientes utilizados, por ejemplo su contenido de fibra o factores antinutricionales. En cambio, los valores de digestibilidad ileal estandarizada, los cuales se usan de forma rutinaria en la formulación de alimentos balanceados para cerdos, únicamente toman en cuenta la excreción de pérdidas endógenas básicas de nitrógeno. Las secreciones endógenas específicas no se toman en cuenta cuando se usan los valores de digestibilidad ileal estandarizada para la formulación de alimentos balanceados, lo cual puede ser especialmente importante para dietas con altos contenidos de fibra o factores antinutricionales. La digestibilidad ileal aparente no toma en cuenta las secreciones endógenas de N, lo cual hace que estos valores no sean complementarios cuando se formulan dietas mezclando ingredientes con bajos y altos contenidos de aminoácidos. El procesamiento para la fabricación de ingredientes y dietas puede alterar su composición nutricional y por lo tanto reducir la excreción de pérdidas específicas de N. Se concluye que, debido al gasto energético y proteico que involucra, la medición de las pérdidas endógenas de N y aminoácidos resulta de vital importancia para la estimación de valores de digestibilidad que puedan ser utilizados por la industria de alimentos balanceados para animales para la formulación de las raciones.

**Palabras clave:** alimentos concentrados, calidad proteica, digestibilidad, porcino

---

<sup>1</sup> Universidad de Costa Rica. Escuela de Zootecnia y Centro de Investigación en Nutrición Animal. San José, Costa Rica

Autor para correspondencia: [sergio.salazarvillanea@ucr.ac.cr](mailto:sergio.salazarvillanea@ucr.ac.cr)

Recibido: 15 noviembre 2017

Aceptado: 20 diciembre 2017

## ABSTRACT

---

**The relevance of endogenous nitrogen losses in pig nutrition.** Nitrogen (N) endogenous losses during the digestive process of proteins and their relation to the ingredients or processing technologies used for the manufacture of pig feeds is very important. The true ileal digestibility value of ingredients or diets takes into account the excretion of basal and specific N endogenous losses. Whilst basal endogenous losses depend solely on the dry matter intake, specific endogenous losses depend on factors related to the ingredients, for example their fiber or antinutritional factors content. In contrast, the standardized ileal digestibility, which is routinely used for the formulation of pig feeds, only takes into account the secretion of basal endogenous losses. Specific endogenous losses are not considered when formulating with standardized ileal digestibility values, which is especially relevant for diets with high contents of fiber or antinutritional factors. Apparent ileal digestibility values do not take into account N endogenous losses, which causes these values not to be complementary when used to formulate diets that mix low and high amino acid content ingredients. Processing for ingredient and diet manufacture can alter their nutritional composition, thereby reducing the specific endogenous N losses. It is concluded that measurement of N and amino acid endogenous losses is of extreme importance for the determination of digestibility values that can be used by the feed manufacturing industry for the formulation of diets, due to the energetic and protein expenditure they involve.

**Keywords:** feed, protein quality, digestibility, swine

## INTRODUCCIÓN

---

Los aminoácidos (AA) son nutrientes esenciales para el desempeño productivo de los animales. La cantidad de AA disponibles para satisfacer los requerimientos de los animales dependen de la digestibilidad de los ingredientes, lo cual incluye los procesos de hidrólisis y absorción, y de la cantidad pérdidas endógenas de nitrógeno que se secretan, las cuales están relacionadas con la selección de ingredientes para la ración.

La fracción de nitrógeno de la dieta que no se utiliza es excretada, junto con aquella proveniente de las secreciones endógenas. El nitrógeno excretado es potencialmente dañino para el medio ambiente a través de procesos de eutrofización y calentamiento global (Osada et al., 2011; Vizzari y Modica, 2013). Según Vizzari y Modica (2013) el nitrógeno es el elemento de mayor impacto en la polución de fuentes de agua superficiales y profundas; se estima que los costos ambientales asociados rondan los €70 - 320 billones anuales.

El objetivo de la presente revisión de literatura es describir la importancia de las secreciones endógenas de nitrógeno en el proceso digestivo de las proteínas, y su relación con los ingredientes o la tecnología utilizados en el proceso de manufactura de alimentos balanceados para cerdos. La revisión se basa en tres preguntas fundamentales relacionadas al sistema de evaluación proteica utilizado en cerdos, a la cantidad de pérdidas endógenas producidas por distintos ingredientes y al efecto del procesamiento de los ingredientes o las dietas sobre la secreción de pérdidas endógenas.

### **¿Cómo se evalúa el valor nutricional de las proteínas en la nutrición de cerdos?**

El valor nutricional de las proteínas en las materias primas puede ser definido como la cantidad de nitrógeno o AA que están disponibles para las funciones metabólicas de los animales. No existe un método directo para la medición de la biodisponibilidad de los AA (Stein et al., 2007b; Columbus y Lange, 2012). Sin embargo, dependiendo del ingrediente analizado y de sus condiciones de procesamiento, la medición de la digestibilidad de los AA puede ser una buena estimación de la biodisponibilidad para el animal.

Existen tres formas para expresar la digestibilidad de los AA de un ingrediente o dieta: digestibilidad ileal aparente (DIA), digestibilidad ileal estandarizada (DIE) y digestibilidad

ileal verdadera (DIV). La diferencia entre ellas consiste en la posibilidad que brindan de discriminar entre factores relacionados específicamente con la dieta y factores relacionados con el proceso digestivo. La medición de digestibilidad de los AA se realiza a nivel del íleon porque la microflora presente en el intestino grueso convierte la proteína que llega a este nivel en otros compuestos nitrogenados que son fácilmente absorbibles. Esto interfiere con la exactitud en la determinación de la digestibilidad de los AA cuando se realiza a nivel fecal (Low, 1979a; Low, 1979b).

La DIA es la forma más básica de determinar la digestibilidad ileal de las proteínas o los AA. Toma en consideración los contenidos en el alimento, a los cuales se les sustrae los contenidos no digeridos que se obtienen de la digesta a nivel ileal. Los valores de DIA para materias primas individuales no son complementarios en mezclas de ingredientes, por lo cual no pueden ser utilizados para la formulación de dietas (Boisen y Fernández, 1995; Stein et al., 2007b). La principal razón para la falta de complementariedad de los valores de DIA es que la contribución relativa de las pérdidas endógenas de AA al flujo total de AA en el íleon depende del nivel de AA de la dieta. La falta de complementariedad de los valores de DIA son un problema principalmente cuando ingredientes con bajos contenidos de AA, por ejemplo cereales, se mezclan en dietas con ingredientes que tienen altos contenidos de AA (Jansman et al., 2002; Stein et al., 2005).

La falta de complementariedad de los valores de DIA de los AA fue superada eliminando la influencia de las pérdidas endógenas basales de la estimación de digestibilidad, lo que da como resultado los valores de DIE. Las pérdidas endógenas basales son inevitables para el animal durante el proceso digestivo (Jansman et al., 2002) y se producen en respuesta al consumo de materia seca (Boisen, 1998). Actualmente, los valores de DIE son utilizados por la industria para la formulación de alimentos balanceados para animales, pues toman en cuenta la digestibilidad de los ingredientes y las pérdidas endógenas basales asociadas al consumo de la dieta. Jansman et al., (2002), en una revisión de literatura, resumió los resultados de distintas investigaciones en las cuales se detalló la composición de AA de las pérdidas endógenas basales (Cuadro 1) y que pueden ser utilizadas para calcular la DIE a partir la medición de valores de DIA (Hulshof et al., 2016; Salazar-Villanea et al., 2017b).

Sin embargo, la forma más exacta de determinar la digestibilidad intrínseca de un ingrediente es utilizando la DIV. Esta determinación toma en cuenta tanto las pérdidas

endógenas basales como las pérdidas endógenas específicas. La secreción de pérdidas endógenas específicas está influenciada por factores asociados a la dieta, por ejemplo el contenido de proteína o fibra de la dieta o la presencia de factores antinutricionales (Stein et al., 2007a).

**Cuadro 1.** Composición de aminoácidos de las pérdidas endógenas de nitrógeno utilizando dietas libres de nitrógeno en cerdos (Jansman et al., 2002).

Componente	Concentración (g/16 g N)
Proteína cruda (g/kg consumo MS)	11,80
Isoleucina	2,73
Leucina	4,20
Lisina	3,40
Metionina	0,96
Cistina	1,63
Fenilalanina	2,94
Tirosina	2,82
Treonina	4,81
Triptófano	1,25
Valina	3,86
Arginina	3,77
Histidina	1,52
Alanina	4,26
Ácido aspártico	6,62
Ácido glutámico	8,06
Glicina	9,54
Prolina	12,41
Serina	4,82

Cuando se utilizan valores de DIV de los ingredientes en la formulación de dietas, se deben de tomar en cuenta tanto las pérdidas endógenas basales como las específicas, como parte de los requerimientos de AA del animal (Stein et al., 2007a). La evaluación de

la biodisponibilidad de AA utilizando la DIV tiene la ventaja de que se estiman los costos metabólicos relacionados con la producción endógena basal y específica (Lahaye et al., 2004). En casos de elevadas secreciones endógenas, estos costos metabólicos implican un gasto energético extra, el cual podría impactar en los requerimientos de mantenimiento de los animales. De acuerdo con Nyachoti et al., (1997b) y Stein et al., (2007b), el rendimiento de los animales podría mejorarse reduciendo las pérdidas endógenas de nitrógeno, ya que se aumenta la eficiencia en la utilización de los AA y la energía de la dieta. La determinación precisa de las pérdidas endógenas totales contribuye con el entendimiento del proceso digestivo y de la utilización de las proteínas y los AA (Stein et al., 2007b) y la estimación de los costos metabólicos asociados (Stein et al., 2007a).

Aún cuando las mediciones de digestibilidad de proteínas y AA se utilicen frecuentemente como estimaciones directas de la biodisponibilidad para distintos ingredientes, existen dos factores principales que contribuyen con las diferencias entre las estimaciones de digestibilidad y biodisponibilidad (Stein et al., 2007b). El primero es la estructura química en la cual se absorben algunos AA, principalmente la lisina. Algunas variaciones en la estructura química de la lisina (por ejemplo, fructosilisina, lisinoalanina, entre otros) pueden ser absorbidas pero no metabolizadas. El segundo factor es la fermentación proteica que realiza la microflora bacteriana en el intestino delgado, lo cual puede resultar en la pérdida o ganancia de AA para el animal (Stein et al., 2007b).

Las variaciones en la estructura química de algunos aminoácidos pueden ocurrir, especialmente, en ingredientes que han sido sujeto de tratamientos térmicos y en los cuales se generan productos de la reacción de Maillard (PRM), lo cual reduce su valor nutricional. Las reacciones de Maillard ocurren como resultado de la interacción entre el grupo carbonil de un azúcar reductor y el grupo amino de un AA; en el caso de la lisina el grupo amino- $\epsilon$  y en el caso de la arginina, el grupo guanidino (Salazar-Villanea et al., 2016b). La absorción de PRM podría resultar en una sobreestimación de la digestibilidad, lo cual puede ser un problema principalmente para ingredientes tratados térmicamente (Boisen, 1998; Stein et al., 2007b).

Como alternativa surgió el análisis del contenido de lisina reactiva para los ingredientes procesados (Moughan y Rutherford, 1996). Este análisis (basado en la reacción de la lisina con el compuesto O-metilisourea que produce homoarginina) es capaz de discriminar entre la lisina que no ha reaccionado con azúcares reductores (lisina reactiva)

y la lisina que ha reaccionado para formar PRM (lisina no reactiva). Anteriormente, ha sido sugerido que la medición del contenido de lisina reactiva en los ingredientes procesados es un mejor reflejo del contenido de lisina biodisponible para el animal (Pahm et al., 2009).

Los PRM pueden ser clasificados en tempranos o avanzados, dependiendo del nivel de daño térmico, lo cual define el grado de avance de la reacción. Hasta un 46% de los PRM tempranos (fructosilisina) pueden ser absorbidos en cerdos (Moughan et al., 1996). Una vez absorbidos, estos PRM no pueden ser utilizados por el metabolismo y son excretados por medio de la orina. La presencia de PRM puede generar un desbalance en el contenido de AA de la dieta, lo cual resulta en la oxidación de estos AA, que también se excretan por medio de la orina (Pahm et al., 2009).

La formación de PRM puede favorecer la reticulación de AA, un fenómeno que consiste en la formación de enlaces covalentes entre AA, lo cual puede facilitar la formación de agregados proteicos (Contreras-Calderón et al., 2009). Estos agregados proteicos pueden limitar la accesibilidad de las proteínas para el ataque enzimático (Papadopoulos, 1989).

Además, la digestibilidad proteica puede variar con la edad del animal, lo cual ha sido reportado para pollos de engorde, ratas (Gilani et al., 2012) y cerdos (Urbaityte et al., 2009). Este fenómeno podría estar relacionado con los factores asociados a la producción de pérdidas endógenas, por ejemplo el contenido de fibra o factores antinutricionales en la dieta.

### **¿Cuál es la contribución de las pérdidas endógenas de nitrógeno al metabolismo proteico?**

Como fue mencionado anteriormente, el flujo de AA por el tracto gastrointestinal consiste de AA de origen dietético y endógeno. Estos últimos pueden ser sintetizados por el animal o por la microflora intestinal. Las pérdidas endógenas originadas del animal consisten en secreciones del estómago, páncreas, intestino delgado, saliva, bilis, mucosidades y células epiteliales (Jansman et al., 2002). Del total de nitrógeno endógeno recuperado al final del íleon, 44% se encuentra en forma de proteínas y péptidos, 27% en forma de AA libres y 27% en forma de nitrógeno no proteico, por ejemplo amidas, amino azúcares y urea (Souffrant 1991).

Las pérdidas endógenas son el factor más importante para los requerimientos de mantenimiento de nitrógeno en cerdos en las etapas de desarrollo y engorde (Nyachoti et al., 1997b). El aumento en la secreción de pérdidas endógenas puede limitar el crecimiento de los animales pues los procesos relacionados al mantenimiento tienen prioridad sobre aquellos relacionados al crecimiento (Grala et al., 1997).

Las pérdidas endógenas basales pueden ser determinadas por medio de la utilización de dietas libres de nitrógeno o dietas que incluyan fuentes proteicas altamente digestibles (libres de fibra y factores antinutricionales), por ejemplo, caseína hidrolizada. Ya que no existe una técnica para la medición de las pérdidas endógenas específicas, estas se calculan restando las pérdidas endógenas basales de las pérdidas endógenas totales (Eklund et al., 2012). La medición de las pérdidas endógenas totales se puede realizar por medio de la técnica de dilución con  $^{15}\text{N}$  o la técnica de la homoarginina (Stein et al., 2007b). En el Cuadro 2 se muestra un resumen de la DIV y las pérdidas endógenas basales y totales asociadas a algunos ingredientes comúnmente utilizados en dietas para cerdos en desarrollo y engorde. Como se puede observar en este cuadro, las pérdidas endógenas de nitrógeno representan entre 10 - 19% (14% en promedio) del total de nitrógeno suministrado en la dieta. De este porcentaje, entre 19 - 63% (49% en promedio) corresponden a pérdidas endógenas específicas. Entre los ingredientes con mayores contribuciones de pérdidas endógenas específicas al total de pérdidas endógenas se encuentran las arvejas, la harina de soya, la harina de colza y la torta de colza, todos ellos ingredientes ricos en fibra o factores antinutricionales.

De hecho, las pérdidas endógenas determinadas al final del íleon son sólo una parte del total, ya que representan el balance entre la secreción y la reabsorción. Hasta el 75% del nitrógeno endógeno que se secreta en el lumen intestinal puede ser reabsorbido (Souffrant 1991). Este balance puede ser influenciado por factores asociados a la dieta, como el contenido de fibra, el consumo de materia seca y la presencia de factores antinutricionales (Nyachoti et al., 1997a).

**Cuadro 2.** Digestibilidad ileal verdadera y pérdidas endógenas de nitrógeno totales y específicas de ingredientes utilizados comúnmente en dietas para cerdos en crecimiento y finalizadores de acuerdo a su porcentaje de inclusión en la dieta.

<b>Ingredientes</b>	<b>n</b>	<b>Nivel de inclusión (%)</b>	<b>Contenido N dieta (g/kg MS)</b>	<b>DIV del N (%)</b>	<b>Total pérdidas endógenas N (g/kg MS)</b>	<b>Pérdidas endógenas específicas N (g/kg MS)</b>	<b>Referencias<sup>1</sup></b>
Acemite de trigo	2	33,5	20,3	80,0	2,1	0,4	1
Arveja	3	75,0	24,9	97,0	5,5	3,2	2, 3, 4
Cebada	1	94,5	12,1	89,3	1,3	0,6	5
Harina de soya	3	33,0	26,8	95,9	3,4	1,8	3, 4, 6
Harina de colza	3	49,0	26,6	82,0	3,6	1,9	2, 4, 6
Maíz	1	94,5	13,1	95,1	1,4	0,7	5
Torta de colza	1	47,0	23,4	88,0	5,4	3,4	3
Trigo	1	94,5	12,5	95,1	1,5	0,8	5
Trigo + harina de girasol	1	73,4 + 17,8	24,4	89,0	4,6	2,6	7
Trigo + harina de colza	1	77,4 + 16,7	24,0	80,0	3,4	1,4	8

<sup>1</sup> Referencias: 1, Libao-Mercado et al., (2006); 2, Grala et al., (1997); 3, Grala et al., (1999); 4, Eklund et al., (2012); 5, Jondreville et al., (2001); 6, Jondreville et al., (2000); 7, Lahaye et al., (2004); 8, Lahaye et al., (2008).

Los factores que favorecen la secreción de pérdidas endógenas específicas, por ejemplo el contenido de fibra o de factores antinutricionales, pueden ser los causantes de las diferencias reportadas entre las mediciones *in vitro* e *in vivo* de digestibilidad de lisina. Ya que toda la lisina que se secreta en el lumen intestinal como parte de las pérdidas endógenas puede ser considerada como reactiva, el contenido de lisina reactiva digestible de los ingredientes puede ser subestimado debido a la secreción endógena de este AA (Pahm et al., 2009).

Los factores antinutricionales en los ingredientes aumentan la cantidad de nitrógeno de origen endógeno determinado en el íleon terminal ya sea por medio de un aumento de la secreción o por medio de una reducción en la degradación y reabsorción del nitrógeno endógeno (Nyachoti et al., 1997b). Los principales factores antinutricionales detectados en ingredientes de uso común en alimentación animal son inhibidores de tripsina y hemaglutininas en leguminosas, taninos en leguminosas y cereales, fitatos en cereales y oleaginosas, glucosinolatos en semillas de colza y mostaza, gossipol en semillas de algodón, y bases de ácidos nucleicos uricogénicas en levaduras (Gilani et al., 2012). Por ejemplo, los inhibidores de tripsina en la soya pueden ocasionar un aumento en la secreción de proteasas, lo cual podría causar una reducción en el crecimiento producto de la pérdida continua de enzimas (Gilani et al., 2012). Las enzimas pancreáticas, por ejemplo tripsina y chimotripsina, tienen elevados contenidos de AA azufrados.

El contenido de fibra de las dietas puede influenciar la cantidad de nitrógeno endógeno en el íleon terminal pues la capacidad adsorptiva de la fibra limita la hidrólisis y reabsorción de las pérdidas endógenas. Además, la fibra puede tener un efecto abrasivo en el epitelio de la mucosa intestinal, removiendo mucosidad y células epiteliales (Schulze et al., 1995). La fibra puede también promover la fermentación en el intestino delgado, aumentando la masa microbial.

El nivel y el tipo de fibra presente en la dieta influyen la secreción de nitrógeno endógeno (Schulze et al., 1995; Jansman et al., 2002). Schulze et al., (1995) reportaron un aumento de 0,01 g de nitrógeno endógeno por cada gramo de fibra detergente neutro en la dieta. Además, las fuentes de fibra de alta fermentabilidad inducen un aumento en la cantidad de nitrógeno endógeno en el íleon terminal (Jansman et al., 2002). Al contrario, la inclusión de celulosa purificada no produce un aumento en las pérdidas endógenas de nitrógeno. Boisen y Moughan (1996) sugirieron que la capacidad adsorptiva de la celulosa

purificada no puede imitar aquella de las fibras dietéticas que se encuentran de forma natural en los ingredientes, las cuales incluyen polisacáridos no amiláceos dentro de su composición.

La cantidad de nitrógeno de origen endógeno también puede aumentar con niveles crecientes de proteína en la dieta (Moughan y Rutherford, 1996) y dependen de la calidad proteica (es decir, la DIV) de la misma. Las proteínas de la dieta pueden tener el mismo efecto que la fibra, tanto estimulando la secreción de nitrógeno endógeno como reduciendo la digestión y reabsorción del material endógeno secretado (Nyachoti et al., 1997b).

Las pérdidas endógenas de nitrógeno en cerdos alimentados bajo condiciones comerciales varían de acuerdo a los ingredientes utilizados en las dietas y pueden contribuir con más del 50% del total de AA que salen del íleon (Souffrant, 1991). También ha sido reportado que la presencia de factores antinutricionales en la dieta reduce en 1,9 veces la deposición de proteína muscular comparado a una dieta que no contenía factores antinutricionales, esto producto del aumento en las pérdidas endógenas de nitrógeno (Stein et al., 2007b). Este efecto en deposición proteica también se puede extender a los efectos de la fibra sobre la secreción de pérdidas endógenas.

### **¿Cuáles son los efectos del procesamiento sobre la digestibilidad proteica y las pérdidas endógenas de nitrógeno?**

El procesamiento de los ingredientes y las dietas es una práctica esencial en la producción de alimentos para animales pues permite controlar sus propiedades físicas y químicas. También puede ser considerado como una etapa inevitable durante la producción de algunos ingredientes, principalmente aquellos que son coproductos o subproductos de algunas industrias.

La DIE de la proteína o los AA puede ser influenciada por las diferencias inherentes entre ingredientes o por las condiciones utilizadas durante el procesamiento (Urbaityte et al., 2009). Sin embargo, determinar los efectos del procesamiento sobre la DIE de un ingrediente no permite distinguir entre los efectos sobre la DIV o aquellos sobre las pérdidas específicas de nitrógeno (Stein et al., 2007b).

## Efectos del procesamiento de ingredientes

Las principales fuentes proteicas utilizadas en alimentación animal (por ejemplo, harina de soya, harina de colza, destilados secos de maíz con solubles) son coproductos originados del proceso de extracción de uno de los principales componentes de la semilla. Por ejemplo, la harina de soya y la harina de colza (o harina de canola) resultan del proceso de extracción de aceite de las semillas, mientras que los destilados secos de maíz con solubles son un coproducto de la utilización del almidón del grano para la producción de etanol. Estos procesos involucran la utilización de procesos térmicos que pueden provocar la disminución de la calidad proteica. El tratamiento térmico se utiliza durante el proceso de extracción o para la degradación de los factores antinutricionales del material.

*Harina de soya.* La harina de soya es una de las fuentes proteicas más frecuentemente utilizados en la alimentación de cerdos. Esta semilla oleaginosa es la fuente más concentrada de inhibidores de tripsina (Gilani et al., 2012) y producto de la extracción del aceite se produce una concentración en el contenido de estos compuestos. Para inactivar estos factores antinutricionales la torta que resulta de la extracción con solventes orgánicos debe ser procesada térmicamente, donde el proceso térmico más común es el tostado. La desnaturalización de los inhibidores de tripsina en la harina de soya aumentó la DIE de los AA en el cerdo, pues se disminuyeron las pérdidas endógenas secretadas (Messerschmidt et al., 2012). Sin embargo, los mismos autores mencionaron que dependiendo de la severidad del proceso térmico se puede perder lisina en la materia prima. En ese estudio, la utilización de un proceso térmico severo por un corto tiempo (139 °C durante 7 min) durante la etapa de tostado disminuyó el contenido de lisina reactiva aproximadamente un 10%, comparado con una harina de soya procesada ligeramente (115 °C durante 45 min). De acuerdo con Fontaine et al., (2007), en una harina de soya procesada de forma normal, entre 10 - 20% de la lisina no está disponible para el animal y en los baches sobreprocesados la cantidad de lisina dañada puede llegar hasta el 67%.

El sobreprocesamiento de la harina de soya causó una reducción en la digestibilidad de todos los aminoácidos (González-Vega et al., 2011). En este experimento la harina de soya fue autoclavada a 125 °C durante 0, 15 y 30 min, lo cual resultó en una disminución lineal en la DIA y DIE conforme se aumentó el tiempo de tratamiento hidrotérmico. Estos autores sugirieron que la formación de PRM fue responsable de la disminución en la

digestibilidad, basados en la formación de furosina y el oscurecimiento de las harinas de soya. Otros estudios también han reportado una reducción en la DIE de la harina de soya producto de la formación de PRM como resultado del tostado de harina de soya con una fuente de azúcares reductores (lignosulfonato) (Hulshof et al., 2016).

*Destilados secos de maíz con solubles.* Durante el proceso de fermentación del almidón del maíz para la producción de etanol como producto y destilados secos de maíz con solubles como coproducto, existen varias etapas que involucran la utilización de procesamiento térmico que puede reducir los contenidos de lisina, lisina reactiva y la DIE de la lisina (Pahm et al., 2008). La reducción de los contenidos de lisina y lisina reactiva se debe a la formación de PRM. El daño en la lisina está relacionado a la presencia de azúcares residuales por la fermentación incompleta del almidón, que favorece la interacción entre los azúcares residuales y la lisina, aumentando la síntesis de PRM (Fontaine et al., 2007). En baches sobreprocesados de destilados secos de maíz con solubles hasta un 59% de la lisina puede estar dañada y no disponible para los animales, mientras lo común es encontrar una pérdida del 10 - 40% de la lisina reactiva en baches procesados comercialmente.

Solo el 67% del total de lisina reactiva en los destilados secos de maíz con solubles fue digerido en cerdos (Pahm et al., 2009). De acuerdo con estos autores, la reducción en la digestibilidad de la lisina reactiva puede deberse a un aumento en la secreción de nitrógeno endógeno debido al alto contenido de fibra del ingrediente. Otros autores han reportado que la absorción incompleta de la lisina reactiva puede deberse a la presencia de PRM en las materias primas dañadas térmicamente (Moughan et al., 1996), los cuales pueden también ser considerados como factores antinutricionales (Gilani et al., 2012). Una reducción del 50% en el contenido de lisina reactiva reduce a la mitad los sitios de acción de la tripsina (Rérat et al., 2002), lo que podría aumentar la secreción enzimática, aumentando la cantidad total de pérdidas endógenas de nitrógeno.

*Harina de colza.* La harina de colza es el segundo ingrediente proteico más utilizado en dietas para cerdos y aves a nivel mundial (Kracht et al., 2004). La harina de colza se produce utilizando el proceso de extracción con solventes orgánicos, usualmente hexano. Posteriormente, se utiliza el tostado para recuperar el excedente de solvente orgánico y para reducir el contenido de glucosinolatos (Kracht et al., 2004), los cuales pueden ser considerados como factores antinutricionales. Este proceso puede reducir la DIA de las

proteínas (Grala et al., 1997). Esto también fue demostrado por Anderson-Hafermann et al., (1993) y por Newkirk et al., (2003), quienes reportaron reducciones del 5 y 8%, respectivamente en la DIA de la lisina en pollos de engorde, comparando las semillas con la harina de colza. En estudios recientes se reportó una disminución en los contenidos de lisina y lisina reactiva con el aumento en el tiempo de tostado de la harina de colza a temperaturas superiores a 110 °C (Salazar-Villanea et al., 2016a). Esto, junto con cambios en la estructura física de las proteínas, resultó en una disminución en la velocidad de hidrólisis proteica (Salazar-Villanea et al., 2016a; Salazar-Villanea et al., 2017a), lo cual conllevó a una reducción en la velocidad de digestión en el tracto gastrointestinal y la DIA y DIE de la proteína y los aminoácidos en cerdos en crecimiento (Salazar-Villanea et al., 2017b).

Es probable que los altos contenidos de fibra de la harina de colza, la cual incluye hemicelulosa, lignina y pectinas, sean responsables del aumento en el flujo de materia seca, nitrógeno no digerido y pérdidas endógenas de nitrógeno por el íleon terminal (Grala et al., 1997). La fibra en las semillas de colza está principalmente concentrada en la cáscara y la remoción de este componente de la semilla resultó en una disminución del 40% en el contenido de fibra detergente ácido y celulosa (Bourdon y Aumaître, 1990), lo cual aumentó en 3% la DIA de la proteína cruda y lisina (Kracht et al., 2004). Sin embargo, existen dos obstáculos mayores en la industria para la remoción de las cáscaras de las semillas de colza: gran parte del aceite va ligado a las cáscaras y eliminar las cáscaras genera un tamaño de partícula pequeño, que dificulta la extracción del aceite y del solvente (Khajali y Slominski, 2012).

La variedad de la colza también tiene influencia en el contenido de fibra. Las variedades amarillas tienen cáscaras más delgadas, mayores contenidos de proteína cruda y menores contenidos de fibra comparadas con las variedades negras o cafés (Kracht et al., 2004).

### **Efectos del procesamiento de dietas**

Las fuentes proteicas descritas anteriormente son incorporadas en dietas y comúnmente reprocesadas durante la producción de alimentos balanceados. Según Cattaneo et al., (2009), los efectos de procesamientos térmicos consecutivos tienen, al menos, un efecto aditivo. Esto significa que el procesamiento de las dietas podría aumentar el nivel del daño sobre las proteínas en ingredientes previamente procesados.

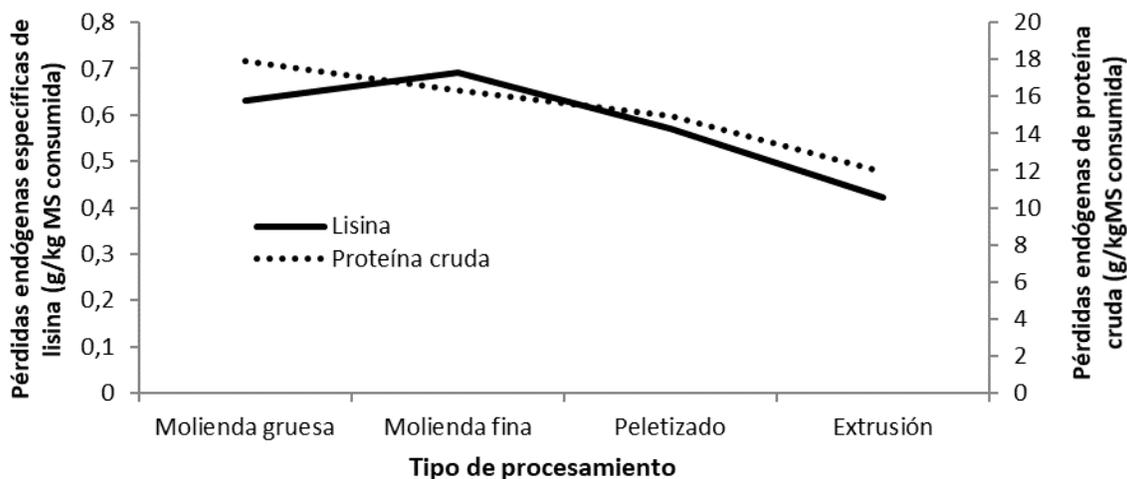
Una de las tecnologías más comúnmente utilizadas para la producción de alimentos balanceados es la molienda (reducción del tamaño de partícula), debido a sus efectos en las propiedades físicas y la digestibilidad de la dieta. La mayoría de los estudios reportan un aumento de la DIA del nitrógeno en cerdos con la reducción en el tamaño de partícula de la dieta. Según Lahaye et al., (2004), el aumento en la DIA del nitrógeno está relacionado con un aumento en la DIV y no con una disminución en la secreción de pérdidas endógenas. El aumento en el tamaño de partícula de la dieta ha sido relacionado con una mayor recuperación de ácidos grasos volátiles en las heces, indicando un aumento en la fermentación microbial en el intestino grueso, relacionado a una menor digestibilidad (Callan et al., 2007).

Otras tecnologías para el procesamiento de dietas que involucran la utilización de calor, por ejemplo la peletización y la extrusión, también han resultado en mejoras en la digestibilidad proteica. Lundblad et al., (2012) reportaron efectos positivos de los procesos más severos (por ejemplo, expansión y extrusión), en comparación con la peletización, sobre la digestibilidad de los AA, pero no sobre la digestibilidad de la proteína cruda. De acuerdo con estos autores, el aumento en la digestibilidad pudo deberse a un aumento en la desnaturalización de las proteínas durante los procesos térmicos o a un aumento en la viscosidad debido al aumento de la gelatinización de los almidones. Una proteína desnaturalizada, y por lo tanto con una estructura abierta, deja una mayor cantidad de AA susceptibles al ataque enzimático en comparación con una proteína en su estado nativo (Opstvedt et al., 2003). Sin embargo, otros autores han reportado que las proteínas en las materias primas que han sido procesadas anteriormente ya se encuentran desnaturalizadas y que el procesamiento para la fabricación de dietas no aumenta su grado de desnaturalización (Salazar-Villanea et al., 2017b). Según Lundblad et al., (2012), el aumento en la gelatinización del almidón aumenta también su digestibilidad, lo cual podría causar una disminución en la tasa de pasaje del contenido digestivo, aumentando el tiempo de interacción entre las enzimas y el sustrato, y consecuentemente, aumentando la tasa de digestión y absorción.

Los efectos del procesamiento sobre la DIA y la DIE podrían deberse también a una reducción en las secreciones endógenas. Marty et al., (1994) reportaron una disminución en el flujo total de lisina por el íleon terminal después de la extrusión del frijol de soya, y lo relacionaron con una menor secreción de nitrógeno endógeno. El menor flujo de nitrógeno endógeno estuvo posiblemente relacionado a un aumento en la solubilidad de la fibra, lo

cual aumenta la accesibilidad de las proteínas al ataque enzimático (van der Poel, 1990), y no a la disminución en la concentración de inhibidores de tripsina. Lahaye et al., (2004) reportaron una disminución en la secreción de nitrógeno endógeno específico con la utilización de condiciones más severas durante el procesamiento en dietas basadas en trigo y harina de girasol, sin que se afectara la DIV de la dieta (Figura 1). Estos autores compararon dos tamaños de partícula de la dieta (grueso y fino) con dos procesos térmicos (peletización y extrusión de alto flujo). La disminución en la secreción de pérdidas endógenas específicas puede estar relacionada con una mayor digestibilidad de todos los componentes de la dieta, disminuyendo la interacción entre los nutrientes y la pared intestinal.

Los efectos de las condiciones de procesamiento probablemente dependen también de las materias primas que componen la dieta. Contenidos de humedad entre 18 - 25% y temperaturas entre 120 - 170 °C durante la extrusión de granos han resultado en altos niveles de gelatinización del almidón y mínimos grados de daño proteico (Chae et al., 1997). En contraste, estos mismos autores reportaron que la utilización de temperaturas entre 125 - 150 °C durante la extrusión de harina de soya han resultado en una disminución de la DIA de la lisina en cerdos recién destetados.



**Figura 1.** Efectos de la reducción en el tamaño de partícula y tratamientos térmicos sobre la excreción de pérdidas endógenas específicas de nitrógeno y pérdidas endógenas totales de proteína cruda en el íleon terminal (Adaptado de Lahaye et al. 2004).

Estudios recientes indican que la peletización o la extrusión de dietas con diferentes grados de daño proteico pueden mejorar la digestibilidad de la proteína cruda y los aminoácidos (Salazar-Villanea et al., 2017b). En este estudio, la DIA de la lisina aumentó 0, 4 y 9 unidades porcentuales después del peletizado y 4, 5 y 8 unidades porcentuales después de la extrusión de dietas a base de harina de colza sin tostar o tostadas durante 60 o 120 min, respectivamente. Sin embargo, debido al diseño experimental utilizado, estos autores no fueron capaces de determinar si la mejoría en la digestibilidad se debió a un aumento en la DIV o una disminución en la secreción de pérdidas endógenas.

Además, los efectos del procesamiento (por ejemplo, extrusión) sobre el rendimiento productivo de los animales dependen de si los ingredientes fueron procesados individualmente o como parte de dietas (Chae et al., 1997; Johnston et al., 1999). Ambos estudios reportaron un aumento generalizado en el rendimiento productivo de cerdos cuando los animales consumieron ingredientes que fueron procesados individualmente. Sin embargo, procesar los ingredientes de forma individual podría complicar la combinación de estos en una dieta. VandeGinste y Schrijver (1998) y Sauer et al., (1990) reportaron que los efectos positivos de la expansión o extrusión de los ingredientes sobre el rendimiento productivo de los cerdos desaparecieron cuando las dietas fueron peletizadas. Esto podría estar relacionado con los efectos aditivos de los tratamientos térmicos (Cattaneo et al., 2009). Otra posibilidad es que existan interacciones entre los ingredientes a nivel digestivo, que resulten en mayores secreciones endógenas, afectando el rendimiento productivo de los animales.

Otras alternativas tecnológicas, por ejemplo la inclusión de enzimas exógenas (por ejemplo, carbohidrasas o proteasas) podrían aumentar la exposición de los sustratos al ataque enzimático y la digestibilidad, reduciendo la secreción de pérdidas endógenas desde el epitelio intestinal (Nyachoti et al., 1997b). Además, los cocteles enzimáticos podrían ayudar en la hidrólisis de los complejos entre fibra y proteína, lo cual tendría un efecto positivo en la digestibilidad proteica y de los AA (Ayoade et al., 2012).

## **CONSIDERACIONES FINALES**

---

La medición de las pérdidas endógenas de nitrógeno y aminoácidos resulta de vital importancia para la estimación de valores de digestibilidad que puedan ser utilizados por la industria de alimentos balanceados para animales para la formulación de las raciones. Las pérdidas endógenas de nitrógeno y AA están directamente relacionadas con los ingredientes que se utilizan en la dieta, su composición fibrosa y su contenido de factores antinutricionales. Debido al gasto energético y proteico que estos involucran, resulta de vital importancia considerar estos factores a la hora de formular las dietas. Finalmente, la utilización de tecnologías para la producción de alimentos balanceados, ya sea con o sin procesamiento térmico, pueden ser consideradas como alternativas adecuadas para mejorar la digestibilidad de los AA, incluso en fuentes proteicas sobreprocesadas.

## LITERATURA CITADA

---

- Anderson-Hafermann, J. C., Y. Zhang, y C. M. Parsons. 1993. Effects of processing on the nutritional quality of canola meal. *Poult. Sci.* 72:326–333.
- Ayoade, D. I., E. Kiarie, T. A. Woyengo, B. A. Slominski, y C. M. Nyachoti. 2012. Effect of a carbohydrase mixture on ileal amino acid digestibility in extruded full-fat soybeans fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:3842–3847. doi:10.2527/jas.2011-4761.
- Boisen, S. 1998. A new protein evaluation system for pig feeds and its practical application. *Acta Agric. Scand. A Anim. Sci.* 48:1–11. doi:10.1080/09064709809362397.
- Boisen, S., y J. A. Fernández. 1995. Prediction of the apparent ileal digestibility of protein and amino acids in feedstuffs and feed mixtures for pigs by in vitro analyses. *Anim. Feed Sci. Technol.* 51:29–43. doi:10.1016/0377-8401(94)00686-4.
- Boisen, S., y P. J. Moughan. 1996. Dietary Influences on Endogenous Ileal Protein and Amino Acid Loss in the Pig—A Review. *Acta Agric. Scand. A Anim. Sci.* 46:154–164. doi:10.1080/09064709609415866.
- Bourdon, D., y A. Aumaître. 1990. Low-glucosinolate rapeseeds and rapeseed meals: effect of technological treatments on chemical composition, digestible energy content and feeding value for growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 30:175–191. doi:10.1016/0377-8401(90)90014-Y.
- Callan, J. J., B. P. Garry, y J. V. O'Doherty. 2007. The effect of expander processing and screen size on nutrient digestibility, growth performance, selected faecal microbial populations and faecal volatile fatty acid concentrations in grower–finisher pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 134:223–234. doi:10.1016/j.anifeedsci.2006.09.018.
- Cattaneo, S., F. Masotti, y L. Pellegrino. 2009. Liquid infant formulas: Technological tools for limiting heat damage. *J. Agric. Food Chem.* 57:10689–10694. doi:10.1021/jf901800v.
- Chae, B. J., I. K. Han, C. J. Yang, Y. K. Chung, Y. C. Rhee, S. J. Ohh, y R. K. H. 1997. Effects of extrusion conditions of corn and soybean meal on the physico chemical properties, ileal digestibility and growth of weaned pigs. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 10:170–177.
- Columbus, D., y C. F. M. De Lange. 2012. Evidence for validity of ileal digestibility coefficients in monogastrics. *Br. J. Nutr.* 264–272.

doi:10.1017/S0007114512002334.

- Contreras-Calderón, J., E. Guerra-Hernández, y B. García-Villanova. 2009. Utility of some indicators related to the Maillard browning reaction during processing of infant formulas. *Food Chem.* 114:1265–1270. doi:10.1016/j.foodchem.2008.11.004.
- Eklund, M., W. R. Caine, W. C. Sauer, G. S. Huang, G. Diebold, M. Schollenberger, y R. Mosenthin. 2012. True and standardized ileal digestibilities and specific ileal endogenous recoveries of crude protein and amino acid in soybean meal, rapeseed meal and peas fed to growing pigs. *Livest. Sci.* 145:174–182. doi:10.1016/j.livsci.2012.01.016.
- Fontaine, J., U. Zimmer, P. J. Moughan, y S. M. Rutherford. 2007. Effect of heat damage in an autoclave on the reactive lysine contents of soy products and corn distillers dried grains with solubles. Use of the results to check on lysine damage in common qualities of these ingredients. *J. Agric. Food Chem.* 55:10737–10743. doi:10.1021/jf071747c.
- Gilani, G. S., C. W. Xiao, y K. A. Cockell. 2012. Impact of Antinutritional Factors in Food Proteins on the Digestibility of Protein and the Bioavailability of Amino Acids and on Protein Quality. *Br. J. Nutr.* 108:S315–S332. doi:10.1017/S0007114512002371.
- González-Vega, J. C., B. G. Kim, J. K. Htoo, A. Lemme, y H. H. Stein. 2011. Amino acid digestibility in heated soybean meal fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 89:3617–3625. doi:10.2527/jas.2010-3465.
- Grala, W., M. W. A. Verstegen, A. J. M. Jansman, J. Huisman, P. Van Leeuwen, y S. Tamminga. 1999. Effects of ileal endogenous nitrogen losses and dietary amino acid supplementation on nitrogen retention in growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 80:207–222. doi:10.1016/S0377-8401(99)00066-8.
- Grala, W., M. W. A. Verstegen, P. vanLeeuwen, J. Huisman, A. J. M. Jansman, y S. Tamminga. 1997. Nitrogen balance of pigs as affected by feedstuffs causing different endogenous nitrogen flow at the terminal ileum. *Livest. Prod. Sci.* 48:143–155.
- Hulshof, T. G., P. Bikker, A. F. B. van der-Poel, y W. H. Hendriks. 2016. Assessment of protein quality of soybean meal and 00-rapeseed meal toasted in the presence of lignosulfonate by amino acid digestibility in growing pigs and Maillard reaction products. *J. Anim. Sci.* 94:1020–1030. doi:10.2527/jas2015-9700.
- Jansman, A. J. M., W. Smink, P. Van Leeuwen, y M. Rademacher. 2002. Evaluation through literature data of the amount and amino acid composition of basal endogenous crude protein at the terminal ileum of pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*

98:49–60. doi:10.1016/S0377-8401(02)00015-9.

- Johnston, S. L., R. H. Hines, J. D. Hancock, K. C. Behnke, S. L. Traylor, B. J. Chae, y I. K. Han. 1999. Effects of Conditioners (Standard, Long-Term and Expander) on Pellet Quality and Growth Performance in Nursery and Finishing Pigs. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 12:558–564.
- Jondreville, C., J. van den Broecke, F. Gâtel, F. Grosjean, S. van Cauwenberghe y B. Sève. 2000. Ileal amino acid digestibility and estimates of endogenous amino acid losses in pigs fed rapeseed meal, sunflower meal and soybean meal. *Can. J. Anim. Sci.* 80: 495-506.
- Jondreville, C., J. van den Broecke, F. Gâtel, F. Grosjean, S. van Cauwenberghe y B. Sève. 2001. Ileal digestibility of amino acids and estimates of endogenous amino acid losses in pigs fed wheat, triticale, rye, barley, maize and sorghum. *Anim. Res.* 50: 119-134.
- Khajali, F., y B. A. Slominski. 2012. Factors that affect the nutritive value of canola meal for poultry. *Poult. Sci.* 91:2564–2575. doi:10.3382/ps.2012-02332.
- Kracht, W., S. Dänicke, H. Kluge, K. Keller, W. Matzke, U. Hennig, y W. Schumann. 2004. Effect of dehulling of rapeseed on feed value and nutrient digestibility of rape products in pigs. *Arch. Anim. Nutr.* 58:389–404. doi:10.1080/00039420400005018.
- Lahaye, L., P. Ganier, J. N. Thibault, y B. Sève. 2004. Technological processes of feed manufacturing affect protein endogenous losses and amino acid availability for body protein deposition in pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 113:141–156. doi:10.1016/j.anifeedsci.2003.07.005.
- Lahaye, L., P. Ganier, J. N. Thibault, Y. Riou, y B. Sève. 2008. Impact of wheat grinding and pelleting in a wheat-rapeseed meal diet on amino acid ileal digestibility and endogenous losses in pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 141:287–305. doi:10.1016/j.anifeedsci.2007.06.016.
- Libao-Mercado, A.J., Y. Yin, J. van Eys y C.F.M. de Lange. 2006. True ileal amino acid digestibility and endogenous ileal amino acid losses in growing pigs fed wheat shorts- or casein-based diets. *J. Anim. Sci.* 84:1351-1361.
- Low, A. G. 1979a. Studies on digestion and absorption in the intestines of growing pigs. 6. Measurements of the flow of amino acids. *Br. J. Nutr.* 41:147–156. doi:10.1079/BJN19790020.
- Low, A. G. 1979b. Studies on digestion and absorption in the intestines of growing pigs. 5. Measurements of the flow of nitrogen. *Br. J. Nutr.* 41:137–146.

doi:10.1079/BJN19790020.

- Lundblad, K. K., J. D. Hancock, K. C. Behnke, L. J. McKinney, S. Alavi, E. Prestløkken, y M. Sørensen. 2012. Ileal digestibility of crude protein, amino acids, dry matter and phosphorous in pigs fed diets steam conditioned at low and high temperature, expander conditioned or extruder processed. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172:237–241. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.12.025.
- Marty, B. J., E. R. Chavez, y C. F. de Lange. 1994. Recovery of amino acids at the distal ileum for determining apparent and true ileal amino acid digestibilities in growing pigs fed various heat-processed full-fat soybean products. *J. Anim. Sci.* 72:2029–2037.
- Messerschmidt, U., M. Eklund, V. T. S. Rist, P. Rosenfelder, H. K. Spindler, J. K. Htoo, y R. Mosenthin. 2012. Effect of particle size and heat treatment of soybean meal on standardized ileal digestibility of amino acids in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:119–121. doi:10.2527/jas.53767.
- Moughan, P. J., M. P. J. Gall, y S. M. Rutherfurd. 1996. Absorption of Lysine and Deoxyketosyllysine in an Early-Maillard Brownd Casein by the Growing Pig. *J. Agric. Food Chem.* 8561:1520–1525. doi:10.1021/jf950428v.
- Moughan, P. J., y S. M. Rutherfurd. 1996. A New Method for Determining Digestible Reactive Lysine in Foods. *J. Agric. Food Chem.* 44:2202–2209. doi:10.1021/jf950032j.
- Newkirk, R. W., H. L. Classen, T. A. Scott, y M. J. Edney. 2003. The digestibility and content of amino acids in toasted and non-toasted canola meals. *Can. J. Anim. Sci.* 83:131–139. doi:10.4141/A02-028.
- Nyachoti, C. M., C. F. De Lange, y H. Schulze. 1997a. Estimating endogenous amino acid flows at the terminal ileum and true ileal amino acid digestibilities in feedstuffs for growing pigs using the homoarginine method. *J. Anim. Sci.* 75:3206–3213.
- Nyachoti, C. M., C. F. M. De Lange, B. W. McBride, y H. Schulze. 1997b. Significance of endogenous gut nitrogen losses in the nutrition of growing pigs: A review. *Can. J. Anim. Sci.* 77:149–163. doi:10.4141/A96-044.
- Opstvedt, J., E. Nygård, T. A. Samuelsen, G. Venturini, U. Luzzana, y H. Mundheim. 2003. Effect on protein digestibility of different processing conditions in the production of fish meal and fish feed. *J. Sci. Food Agric.* 83:775–782. doi:10.1002/jsfa.1396.
- Osada, T., R. Takada, y I. Shinzato. 2011. Potential reduction of greenhouse gas emission from swine manure by using a low-protein diet supplemented with synthetic amino acids. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166–167:562–574.

doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.079.

- Pahm, A. A., C. Pedersen, D. Hoehler, y H. H. Stein. 2008. Factors affecting the variability in ileal amino acid digestibility in corn distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86:2180–2189. doi:10.2527/jas.2008-0868.
- Pahm, A. A., C. Pedersen, y H. H. Stein. 2009. Standardized ileal digestibility of reactive lysine in distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Agric. Food Chem.* 57:535–539. doi:10.1021/jf802047d.
- Papadopoulos, M. C. 1989. Effect of processing on high-protein feedstuffs: A review. *Biol. Wastes.* 29:123–138. doi:10.1016/0269-7483(89)90092-X.
- Rérat, A., R. Calmes, P. Vaissade, y P. Finot. 2002. Nutritional and metabolic consequences of the early Maillard reaction of heat treated milk in the pig. *Eur. J. Nutr.* 41:1–11.
- Salazar-Villanea, S., E. M. A. M. Bruininx, H. Gruppen, P. Carré, A. Quinsac, y A. F. B. van der Poel. 2017a. Effects of Toasting Time on Digestive Hydrolysis of Soluble and Insoluble 00-Rapeseed Meal Proteins. *JAOCS, J. Am. Oil Chem. Soc.* 94. doi:10.1007/s11746-017-2960-8.
- Salazar-Villanea, S., E. M. A. M. Bruininx, H. Gruppen, W. H. Hendriks, P. Carré, A. Quinsac, y A. F. B. van der Poel. 2017b. Pelleting and extrusion can ameliorate negative effects of toasting of rapeseed meal on protein digestibility in growing pigs. *Animal*. In press:1–9. doi:10.1017/S1751731117002476.
- Salazar-Villanea, S., E. M. A. M. Bruininx, H. Gruppen, W. H. Hendriks, P. Carré, A. Quinsac, y A. F. B. van der Poel. 2016a. Physical and chemical changes of rapeseed meal proteins during toasting and their effects on in vitro digestibility. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 7:62. doi:10.1186/s40104-016-0120-x.
- Salazar-Villanea, S., W. H. Hendriks, E. M. A. M. Bruininx, H. Gruppen, y A. F. B. van der Poel. 2016b. Protein structural changes during processing of vegetable feed ingredients used in swine diets: implications for nutritional value. *Nutr. Res. Rev.* 29:126–141. doi:10.1017/S0954422416000056.
- Sauer, W. C., R. Mosenthin, y A. B. Pierce. 1990. The utilization of pelleted, extruded, and extruded and repelleted diets by early weaned pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 31:269–275. doi:10.1016/0377-8401(90)90131-Q.
- Schulze, H., P. van Leeuwen, M. W. Verstegen, y J. W. van den Berg. 1995. Dietary level and source of neutral detergent fiber and ileal endogenous nitrogen flow in pigs. *J. Anim. Sci.* 73:441–448. doi:1995.732441x.

- Souffrant, W. B. 1991. Endogenous nitrogen losses during digestion in pigs. In: M.W.A. Verstegen, J. Huisman, y L. A. den Hartog (Ed.) Digestive Physiology in Pigs. Proc. 5th Int. Symp. Dig. Physiol. Pigs. EAAP Publ. No. 54. pp 147-166. Wageningen, Holanda.
- Stein, H. H., B. Sève, M. F. Fuller, P. J. Moughan, y C. F. M. De Lange. 2007b. Invited review: Amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: Terminology and application. *J. Anim. Sci.* 85:172–180. doi:10.2527/jas.2005-742.
- Stein, H. H., C. Pedersen, A. R. Wirt, R. A. Bohlke, H. H. Stein, C. Pedersen, A. R. Wirt, y R. A. Bohlke. 2005. Additivity of values for apparent and standardized ileal digestibility of amino acids in mixed diets fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 83:2387–2395.
- Stein, H. H., M. F. Fuller, P. J. Moughan, B. Sève, R. Mosenthin, A. J. M. Jansman, J. A. Fernández, y C. F. M. de Lange. 2007a. Definition of apparent, true, and standardized ileal digestibility of amino acids in pigs. *Livest. Sci.* 109:282–285. doi:10.1016/j.livsci.2007.01.019.
- Urbaityte, R., R. Mosenthin, y M. Eklund. 2009. The concept of standardized ileal amino acid digestibilities: Principles and application In feed ingredients for piglets. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 22:1209–1223.
- van der Poel, A. F. B. 1990. Effect of processing on antinutritional factors and protein nutritional value of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). A review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 29:179–208.
- Vande Ginste, J., y R. De Schrijver. 1998. Expansion and pelleting of starter, grower and finisher diets for pigs: effects on nitrogen retention, ileal and total tract digestibility of protein, phosphorus and calcium and in vitro protein quality. *Anim. Feed Sci. Technol.* 72:303–314. doi:10.1016/S0377-8401(97)00192-2.
- Vizzari, M., y G. Modica. 2013. Environmental effectiveness of swine sewage management: A multicriteria ahp-based model for a reliable quick assessment. *Environ. Manage.* 52:1023–1039. doi:10.1007/s00267-013-0149-y.