

DESARROLLOS RECIENTES Y NUEVAS PERSPECTIVAS EN LA VALORACIÓN DE ALIMENTOS PARA GANADO PORCINO

J. Noblet

INRA, 35590 Saint Gilles (France)

E-mail: Jean.Noblet@rennes.inra.fr

1.- INTRODUCCIÓN

Los cerdos han sido seleccionados intensivamente durante los últimos 40-50 años y su potencial para producir carne magra o leche ha llegado a ser muy elevado, acompañado por una marcada reducción del nivel de engrasamiento corporal tanto en animales reproductores como en animales en crecimiento. Estos cambios genéticos afectan a las necesidades energéticas y proteicas de los cerdos. En paralelo, la alimentación continúa siendo una parte importante (>50%) de los costes en la mayoría de los sistemas de producción, por lo que la definición precisa del valor nutritivo de los alimentos se ha convertido en un aspecto cada vez más importante. La mayor parte de la atención se ha dedicado a aminoácidos y energía y, más recientemente, a algunos minerales (P, Cu, Zn); nuevos ingredientes, tales como los granos de destilería, han sido también estudiados en detalle. Se han propuesto nuevos criterios para mejorar la precisión de la evaluación, tales como aminoácidos digestibles o disponibles, o la energía neta; nuevos métodos y programas informáticos han sido también propuestos. Finalmente, el interés de estudiar el papel de los alimentos para mejorar la salud o el bienestar de los cerdos o en reducir su impacto ambiental se ha incrementado progresivamente. Esta revisión tiene por objeto actualizar estos aspectos y analizar brevemente varias nuevas perspectivas.

2.- VALOR ENERGÉTICO DE LOS ALIMENTOS PARA GANADO PORCINO

La valoración de la concentración energética de los alimentos para ganado porcino está basada inicial y más generalmente en su valor de energía digestible (ED) o

metabolizable (EM). Sin embargo, la estimación más próxima del valor energético ‘verdadero’ de un alimento es su contenido en energía neta (EN), ya que tiene en cuenta diferencias en el grado de utilización metabólica entre nutrientes. Además, la EN es el único sistema en el que las necesidades energéticas y los valores energéticos del pienso se expresan sobre la misma base, que debería teóricamente ser independiente de las características de los ingredientes utilizados. Los aspectos metodológicos de la valoración energética de los alimentos para ganado porcino, así como algunos aspectos complementarios, han sido considerados en revisiones previas (Noblet y van Milgen, 2004; Noblet, 2006).

2.1. Utilización energética

Para la mayoría de los piensos de ganado porcino, el coeficiente de digestibilidad de la energía (dE) varía entre un 70 y un 90%, pero la variación es más amplia en el caso de los ingredientes individuales (10-100%). La mayor parte de la variación de la dE está relacionada con la presencia de fibra dietética (FD), que resulta menos digestible que los otros nutrientes (<50% vs 80-100% para almidón, azúcares, grasa y proteína) y además reduce la digestibilidad fecal aparente de otros nutrientes, tales como la grasa y la proteína. Como consecuencia, la dE está relacionada lineal e inversamente con el contenido en FD del alimento (Le Goff y Noblet, 2001; cuadro 1). Los coeficientes que relacionan dE con FD son tales que la FD esencialmente diluye la dieta, al menos en cerdos en crecimiento. En otros términos, incluso aunque la FD se digiere parcialmente por el cerdo joven en crecimiento, proporciona poca ED al animal (Noblet y van Milgen, 2004).

Cuadro 1.- Efecto de la composición del pienso (g/kg MS) sobre la digestibilidad de la energía (dE, %), el coeficiente EM/ED (%) y la eficacia de utilización de la EM en EN de piensos compuestos para animales en crecimiento (kg, %)^a

	Ecuación	DRS	Fuente^b
1	$dE = 98,3 - 0,090 \times FND$	2,0	1
2	$dE = 96,7 - 0,064 \times FND$	2,2	1
3	$EM/ED = 100,3 - 0,021 \times PB$	0,5	1
4	$k_g = 74,7 + 0,036 \times EE + 0,009 \times ALM - 0,023 \times PB - 0,026 \times FAD$	1,2	2

^aPB: proteína bruta, FND: fibra neutro detergente, EE: extracto etéreo, ALM: almidón, FAD: fibra ácido detergente, DRS: desviación residual estándar.

^b1: Le Goff y Noblet (2001) (n = 77 dietas ; ecuaciones 1 y 3 en cerdos en crecimiento de 60 kg y ecuación 2 en cerdas adultas, respectivamente; 2: Noblet et al. (1994) (n = 61 dietas; cerdos de 45 kg).

La dE también se ve afectada por factores propios del animal. En cerdos en crecimiento, la dE aumenta cuando aumenta el peso vivo del animal (Noblet, 2006) y el efecto mayor del peso vivo se observa cuando se comparan cerdas adultas, tanto gestantes como lactantes, con cerdos en crecimiento alimentados *ad libitum* (Le Goff y Noblet, 2001; Le Goff et al., 2002). La diferencia debida al aumento de peso vivo es más importante para piensos o ingredientes con alto contenido en fibra (ver cuadro 1). En el caso de cerdas adultas y cerdos en crecimiento de 60 kg de peso, el valor ED es un 1,8; 4,2; 6,0; 10,3 y 16,6% más alto en cerdas en el caso del trigo, maíz, harina de soja, salvado de trigo y gluten feed de maíz, respectivamente (Sauvant et al., 2004; Noblet, 2006). Este incremento de la dE con el peso del animal está relacionado principalmente con una mayor eficacia digestiva de la FD (a través de un tránsito digestivo más lento; Le Goff et al., 2002). La diferencia en ED entre cerdas adultas y cerdos en crecimiento es proporcional a la cantidad de material orgánica indigestible medida en cerdos en crecimiento (Noblet, 2006). El efecto del nivel de alimentación sobre la dE es despreciable, incluso en cerdas adultas cuando se comparan cerdas lactantes y gestantes para niveles de aportes energéticos muy diferentes. Existe poca información disponible con respecto a la digestibilidad comparada entre lechones y cerdos en crecimiento. Sin embargo, teniendo en cuenta que los lechones generalmente son alimentados con piensos de bajo contenido en fibra para los que la influencia del peso es escasa, los lechones pueden, desde un punto de vista práctico, ser considerados como cerdos en crecimiento a efectos de utilización digestiva de la energía.

El contenido en EM de un alimento es la diferencia entre la ED y las pérdidas de energía en forma de orina y gases (metano). En cerdos en crecimiento, la media de las pérdidas energéticas en forma de metano representa un 0,4% de la ingestión de ED, siendo aproximadamente el doble en cerdas adultas. Las pérdidas energéticas en la orina representan una proporción variable de la ED, ya que la energía de la orina depende en gran medida de la excreción de nitrógeno urinario. A un nivel dado de producción, la excreción de nitrógeno urinario está relacionada principalmente con el contenido en proteína (digestible) de la dieta. Como promedio, representa un 4% del valor ED. Sin embargo, este valor medio no puede aplicarse a los ingredientes simples. La solución más apropiada es estimar la energía de la orina (kJ/kg MS ingerida) a partir del nitrógeno urinario (g/kg MS) de acuerdo con la siguiente ecuación (para cerdos en crecimiento):

$$\text{Energía en orina} = 192 + 31 \times \text{Nitrógeno urinario}$$

Con el nitrógeno urinario representando un 50% del nitrógeno digestible o un 40% del nitrógeno total (Noblet et al., 2004).

La EN se define como la EM menos el incremento de calor asociado con la utilización metabólica de la EM y el coste energético de la ingestión, digestión y la actividad física. Generalmente se calcula como la suma de la producción de calor en ayunas y la energía retenida (Noblet et al., 1994). El contenido en EN como porcentaje de la EM (k) corresponde a la eficacia de utilización de la EM en EN. Las variaciones de k (cuadro 1) son debidas a diferencias en las eficacias de utilización de la EM entre nutrientes, correspondiendo los valores más altos a la grasa (~90%) y al almidón (~82%) y los más bajos (~60%) a la FD y la PB. Determinaciones realizadas en cerdos que diferían en su peso vivo y en la composición de su ganancia de peso sugieren que la eficacia de conversión de EM en EN se ve poco afectada por la composición del aumento de peso, al menos en la mayoría de las circunstancias prácticas (Noblet et al., 1994). De forma similar, el ranking entre nutrientes por sus eficacias es similar en cerdas adultas a nivel de mantenimiento y cerdos en crecimiento (Noblet et al., 1993; Noblet et al., 1994). Estos resultados han sido confirmados en ensayos recientes (Noblet, 2006). Finalmente, el incremento de calor asociado con la utilización de la proteína, tanto la retenida como la catabolizada, es constante (van Milgen et al., 2001). Esto significa que el valor EN de la proteína de la dieta no depende de su uso final.

2.2.- Contribución de la tecnología a los cambios en valor energético

Generalmente se presta poca atención al impacto de los tratamientos tecnológicos sobre la dE y el valor energético de los alimentos para ganado porcino. Ninguna de las tablas de alimentación para ganado porcino proporciona valores energéticos que tengan en cuenta el procesado tecnológico y la forma de presentación del alimento. Sin embargo, la mayoría de los tratamientos tecnológicos implementados mientras se preparan los ingredientes (ver por ejemplo sección relativa a los DDGs) o en la elaboración de los piensos compuestos (molienda, granulación, extrusión, etc.) afectan en un grado variable a la digestibilidad de la energía y de los nutrientes. Así, una disminución del tamaño de partícula está generalmente asociada a una mejora de la dE; a partir de una revisión bibliográfica, Guillou y Landeau (2000) sugirieron que la dE disminuía en 0,6 unidades cuando el tamaño de las partículas aumentaba en 100 μm . Sin embargo, en la práctica el tamaño óptimo de partícula depende poco de criterios nutricionales y más de aspectos técnicos, tales como el coste de energía para la molienda, el manejo de los alimentos en harina, la acumulación de polvo en las instalaciones o la salud de los animales. Por otro lado, la granulación (es decir, el tratamiento mecánico y térmico) es ampliamente utilizada y se asocia con un incremento de la dE. En piensos compuestos, la mejora media es de 1 punto porcentual. Sin embargo, para algunos tipos de alimentos la mejora puede ser mucho más importante. Así por ejemplo, la mejora es más alta para piensos basados en maíz que para los basados en trigo (cuadro 2), lo que se relaciona principalmente con la mayor

digestibilidad de la fracción grasa (79 vs 57%, datos no publicados). Este aumento de digestibilidad de la grasa es particularmente notable en la semilla de colza, cuya grasa es casi indigestible con simple molienda y altamente digestible después de la granulación (89 vs 21%, Skiba et al., 2002). La misma conclusión se obtiene para la semilla de lino procesada por extrusión (Noblet et al., 2008; cuadro 2). Desgraciadamente, tal información no está disponible para la mayor parte de los ingredientes utilizados en alimentación de cerdos. Además, la mejora depende probablemente de las características (temperatura, presión, etc.) de la tecnología utilizada, que no están en absoluto documentadas.

Cuadro 2.- Efecto de la granulación sobre la digestibilidad de la energía de piensos para cerdos.

Tecnología	Harina		Gránulo	Referencia ^a
Dietas trigo-soja (n=2)	88,6	*	89,2	3
Dietas trigo-maíz-cebada-soja (n=4)	75,8	**	77,3	1
Dietas maíz-soja (n=3)	88,4	**	90,3	2
Maíz (n=5)	87	**	90	3
Semilla de colza	35	**	83	4
Semilla de lino (extrusión)	51	**	84	5

^a1: Le Gall et al., 2009; 2: Noblet y Champion, 2003; 3: Noblet y Jaguelin-Peyraud, 2008; 4: Skiba et al., 2002; 5: Noblet et al., 2008.

Otras tecnologías han pasado a ser ampliamente utilizadas, como es el caso por ejemplo de la adición de componentes (enzimas, ácidos, etc.) en el pienso como alternativas a la medicación o para mejorar la salud y los rendimientos de los cerdos. Simultáneamente, a veces se observa una mejora de la digestibilidad de algunos nutrientes. Si bien estos efectos sobre la digestibilidad están claramente establecidos en especies de aves, la magnitud de la mejora es más variable y menos importante para piensos de porcino, donde está más relacionada con el reparto de la digestión entre el intestino delgado y el intestino grueso que con la digestibilidad fecal.

2.3.- Sistemas energéticos

Tal como se ha ilustrado en las secciones anteriores, la digestibilidad de la energía está influida por el peso vivo de los animales y por la tecnología de fabricación de los piensos. Con respecto al efecto del peso vivo, sería entonces apropiado utilizar valores de ED y EM adaptados a cada categoría de pesos. Sin embargo desde el punto de vista práctico se ha sugerido utilizar sólo dos valores, uno para cerdos “60 kg” que puede

aplicarse a lechones y a cerdos en crecimiento y cebo, y otro para cerdos adultos aplicable tanto a cerdas gestantes como lactantes.

Todos los sistemas publicados de EN para porcino combinan la utilización de la EN para mantenimiento y para crecimiento o cebo. El sistema propuesto por Noblet et al. (1994), y aplicado en las tablas del INRA y de la AFZ (Noblet et al., 2003; Sauvant et al., 2004), está basado en una amplia serie de determinaciones (61 piensos). Las ecuaciones de predicción de la EN son aplicables a ingredientes y piensos compuestos en cualquier periodo de la producción porcina (Noblet, 2006), pero con valores de ED o contenidos en nutrientes digestibles diferentes para cerdos en crecimiento y cebo, y cerdas adultas. De forma similar, si la tecnología afecta a la digestibilidad de la energía y de los nutrientes, esto debería tenerse en cuenta en el cálculo de la EN. Se necesita, por lo tanto, información fiable sobre la digestibilidad de la energía o de los nutrientes para la predicción del contenido en EN de los piensos de ganado porcino. De hecho, esta información representa el factor más limitante para predecir los valores energéticos de los piensos.

A partir de estas observaciones sobre la utilización de la energía en cerdos, es obvio que la jerarquía entre alimentos obtenidos en los sistemas ED y EM será diferente que en el sistema EN, en función de su composición química. Puesto que la EN representa el mejor compromiso entre el valor energético del alimento y las necesidades energéticas de los animales, el valor energético de la proteína o de los alimentos fibrosos estará sobreestimada cuando se exprese sobre la base de ED o EM. Por otra parte, las fuentes de grasa o de almidón están subestimadas en el sistema ED (Noblet et al., 2001; Sauvant et al., 2004; Noblet, 2006; cuadro 3).

Con respecto a la estimación de la EN para cerdos se han propuesto varios sistemas en los últimos 40-50 años. La propuesta del INRA (Noblet et al., 1994; 2004) es probablemente la más avanzada y ha sido validada tanto en ensayos calorimétricos como en ensayos de crecimiento. Este último se ilustra en el cuadro 4 a partir de pruebas de crecimiento realizadas con niveles variables de grasa o proteína en el pienso. Los resultados muestran que el coste energético es independiente de la composición de la dieta cuando se expresa sobre la base de EN. Por otro lado, utilizando como unidad la ED o la EM el coste energético aumenta cuando el contenido en proteína aumenta o el de grasa disminuye.

Cuadro 3.- Valores relativos ED, EM y EN de ingredientes para cerdos en crecimiento^a.

	ED	EM	EN	EN/EM, %
Grasa animal	243	252	300	90
Maíz	103	105	112	80
Trigo	101	102	106	78
Dieta de referencia	100	100	100	75
Guisantes	101	100	98	73
Salvado de trigo	68	67	63	71
Harina de soja	107	102	82	60

^aSegún Sauvant et al. (2004a,b). Dentro de cada sistema, los valores se expresan como porcentajes del valor energético de una dieta conteniendo un 68% de trigo, un 16% de harina de soja, 2,5% grasa, 5% salvado de trigo, 5% guisante y 4% minerales y vitaminas.

Cuadro 4.- Rendimientos de cerdos en crecimiento-cebo de acuerdo con el sistema energético y las características de la dieta^a.

Sistema energético	ED	EM	EN
Ensayo 1: Grasa añadida (%)			
0	100	100	100
2	100	100	100
4	99	99	100
6	98	98	100
Ensayo 2: Contenido en PB (30-100 kg)			
Normal	100	100	100
Bajo	96	97	100
Ensayo 3: Contenido en PB (90-120 kg)			
Normal	100	100	100
Bajo	97	98	100

^aNecesidades energéticas (o coste energético por kg de ganancia de peso) para similares ganancias de peso y composición de la ganancia (modelos de covarianza); los valores son relativos a las necesidades energéticas (o al coste energético de la ganancia de peso) en el tratamiento control (considerado como base 100); según Noblet (2006) y datos no publicados.

3.- VALOR NUTRITIVO DE LA PROTEÍNA Y DIGESTIBILIDAD ILEAL DE AMINOÁCIDOS PARA GANADO PORCINO

Actualmente está ampliamente aceptado que el contenido total en aminoácidos (AA) de los alimentos es un mal predictor del valor proteico para porcino; la disponibilidad nutricional de los AA es claramente preferida, siendo estimada rutinariamente a partir de la digestibilidad al final del intestino delgado. Efectivamente los AA son absorbidos en el intestino delgado mientras que en el intestino grueso los microorganismos pueden metabolizar algunos de los AA no digeridos, lo que previene su aparición en las heces; la digestibilidad fecal de los AA es, por tanto, un criterio impreciso para estimar su disponibilidad en el punto de absorción. Por lo tanto, se usa digestibilidad ileal aunque existe alguna controversia en cuanto a su expresión e incluso definición.

La digestibilidad ileal aparente ignora el origen – endógeno o exógeno – del nitrógeno (N) o AA no digeridos que aparecen al final del intestino delgado. Además, la digestibilidad aparente aumenta de forma curvilínea con el nivel de inclusión de los AA en el pienso, con valores bajos e incluso negativos a nivel de inclusión muy bajos y con un valor constante a niveles altos (Noblet et al., 2004). De hecho, se ha demostrado que las pérdidas de N o AA a nivel ileal incluyen: a) una pérdida basal que es independiente del contenido en proteína de la dieta y que está más relacionada con el consumo de materia seca, y b) la fracción digestible de N o de AA suministrada por el alimento. Es, por tanto, preferible sustraer esta pérdida basal del flujo total ileal de N y AA, al objeto de considerar solo la parte relacionada con la fracción proteica del alimento. La digestibilidad “verdadera” o “estandarizada” se calcula de esta forma resultando un valor independiente del nivel de inclusión de N o de AA en el pienso. Además, las digestibilidades estandarizadas de los AA son aditivas. Los valores para digestibilidad estandarizada son superiores a los de digestibilidad aparente. Este concepto está ampliamente aceptado (Stein et al., 2008) y ha sido utilizado, por ejemplo en las tablas INRA-AFZ (Sauvant et al., 2004).

Los valores proporcionados por las tablas INRA-AFZ proceden de experimentos realizados en Francia a principios de los años 80, independientemente por Adisseo, Arvalis e INRA. Todos estos datos fueron recopilados entre 1996 y 1999, y publicados en primer lugar en un CD-ROM (AFZ et al., 2000). En todos los estudios, se utilizó una metodología común consistente en la determinación de la digestibilidad ileal en cerdos en crecimiento anastomizados entre el íleon terminal y el recto. Un total de 430 determinaciones fueron realizadas en los tres centros experimentales; fueron clarificados en 51 ingredientes alimenticios diferentes y se calcularon los valores medios correspondientes. La metodología incluía la recogida total de la digesta ileal en cerdos alimentados con piensos

generalmente basados en ingredientes alimenticios libres de proteína (almidón, azúcar, ácido vegetal, aceite y vitaminas) a los que se les añadía el ingrediente que proporcionaba la proteína que se deseaba evaluar. Se usó el método por diferencia para determinar la digestibilidad aparente de la fuente proteica. La composición en AA de las pérdidas endógenas se determinó en cada centro de investigación y permitió el cálculo de la denominada digestibilidad ileal estandarizada de los AA, cuyos valores son aditivos y suponen un buen predictor del valor proteico de los alimentos para ganado porcino. La revisión de este tema realizada por Stein et al. (2008) confirma el consenso sobre este concepto a nivel internacional, aunque sería preferible determinar la digestibilidad verdadera de los AA. En la práctica se recomienda, por tanto, el uso de los valores de digestibilidad ileal estandarizada para estimar el valor proteico de un alimento y para cubrir las necesidades de los animales, estimadas a partir de la suma de las necesidades para mantenimiento (o pérdidas basales) y para la retención de proteína. Al igual que para el caso de la energía, el cuadro 5 indica que la jerarquía entre ingredientes por su valor proteico es totalmente diferente cuando se compara el uso de los niveles de AA brutos o digestibles. La influencia del método de expresión es más obvia para AA sintéticos, cuando se comparan con AA procedentes de proteínas.

Cuadro 5.- Valores proteicos de algunos ingredientes para cerdos expresados bien como AA fecales o bien como AA digestibles estandarizados (según Sauvart et al., 2004; tablas INRA-AFZ)^a.

Alimento	Lisina		Treonina	
	Total	Digestible	Total	Digestible
Maíz	29	26	49	47
Trigo	36	33	52	50
Salvado trigo	68	53	75	57
Harina de soja	340	353	294	304
Mezcla AA ^b	4580	5180	4015	4680

^aExpresado como porcentaje del valor de lisina o treonina de un pienso que contiene trigo (67%), harina de soja (16%), grasa (2,5%), salvado de trigo (5%), guisante (5%), lisina HCL (0,1%), metionina (0,05%), treonina (0,05%), minerales y vitaminas.

^bMezcla de un 50% de lisina HCL, 25% de treonina y 25% de metionina.

Al igual que para la energía, se conoce todavía poco sobre el efecto de la tecnología en la disponibilidad de la proteína, no existiendo información bibliográfica que permita establecer correcciones para los efectos del tamaño de partícula, granulación, procesado térmico, etc., sobre la digestibilidad verdadera y/o las pérdidas endógenas (Lahaye et al.,

2008). Por tanto, el INRA-AFZ y otras tablas de valoración de alimentos proponen valores que son aplicables a alimentos presentados en forma de harina; estos valores pueden extrapolarse a otras presentaciones, tanto si los tratamientos tecnológicos tienen un efecto negativo (ver sección sobre DDGS) o, de forma más general, efectos positivos sobre la digestibilidad de AA. A diferencia del valor energético, no hay evidencias que permitan comparar el uso de diferentes unidades de valoración proteica en lechones, cerdos en crecimiento y cebo, y cerdas reproductoras.

En conclusión, el cambio desde contenido total en AA a digestibilidad ileal estandarizada de AA ha permitido una mejor estimación del valor proteico verdadero de los alimentos para ganado porcino; este cambio ofrece posibilidades de reducción del margen de seguridad en la formulación de piensos. Continúan existiendo dudas acerca de los efectos de los tratamientos tecnológicos y de los factores antinutritivos sobre la digestibilidad ileal y/o el flujo ileal de AA. Se recomienda la realización de mejoras en la metodología de evaluación al objeto de reducir la mano de obra y los costes inherentes a las determinaciones *in vivo* y los análisis de AA. La metodología NIR es prometedora pero debe de estar calibrada a partir de una importante base de datos de valores *in vivo*.

4.- VALOR NUTRITIVO DE LOS DDGS

La producción de biocombustibles (biodiesel y bioetanol) ha aumentado en la mayor parte del mundo en los últimos 10 años. En el caso de la producción de bioetanol, los principales sustratos utilizados son el azúcar de caña (Brasil), el maíz (EEUU) o el trigo (Europa, Canadá). El uso del maíz o del trigo genera co-productos correspondientes básicamente a la fracción no-amilácea del grano, puesto que el almidón es hidrolizado y fermentado para producir etanol. Estos co-productos son comúnmente denominados DDGS (granos secos de destilería con solubles). Sin embargo, el proceso de producción de etanol ha cambiado a lo largo del tiempo y es más o menos complejo, con un progresivo fraccionamiento de los componentes no amiláceos del grano para la obtención de co-productos ricos en proteína o en grasa y los subsiguientes co-productos ricos en fibra. Además, los procesos de producción son bastante variables. La consecuencia práctica de estos cambios y de la variabilidad del proceso es que la composición química y el valor nutritivo asociado de los co-productos son también bastante variables. En cualquier caso, este nuevo uso de los cereales constituye un importante desafío para la industria de piensos compuestos en orden a implementar la incorporación de nuevos ingredientes con características específicas y variables.

En el cuadro 6 se presentan la composición y valor nutritivo medio de los DDGs ‘estándar’ de maíz y trigo; sin embargo, este maíz ‘medio’ tiene un contenido en grasa inferior al de la mayor parte de los DDGs de maíz. Además, en el caso de los DDGs de trigo hemos asignado también valores a los productos dañados por calor; sin embargo, su frecuencia será probablemente reducida en el futuro. En concordancia con el principal objetivo de la industria del bioetanol, el contenido en almidón de los DDGs es extremadamente bajo. Por otra parte, las otras fracciones químicas de los granos originales están concentradas (3x), con niveles de proteína oscilando entre 25 (DDGs de maíz) y 30% (DDGs de trigo) y contenidos en grasa superiores al 5%. El contenido en fibra es también alrededor de 3 veces superior que en los granos. La composición en AA de la proteína es bastante similar a la del grano original, con la excepción de la lisina, que es más baja en la mayor parte de los casos y altamente variable, en función del daño sufrido por el tratamiento térmico realizado durante la desecación (Cozannet et al., 2010).

Tal como se ilustra en el cuadro 6, la digestibilidad ileal de la lisina es más baja que la de la proteína total o la de los otros aminoácidos esenciales y, sobre todo, es bastante variable. Los ejemplos que se muestran en el cuadro 6 indican que la lisina en muestras de color oscuro es casi indigestible. Como consecuencia, el balance de AA en los DDGs es bastante pobre, con un importante déficit de lisina debido tanto a su bajo contenido como a su baja digestibilidad.

En conexión con su alto nivel de FD, la dE es marcadamente más baja que en el cereal original. Sin embargo, debido a su apreciable contenido en grasa, los contenidos en ED, EM y EN están justo por debajo del rango normal de concentraciones energéticas de piensos compuestos para cerdos. El daño por calor también reduce la dE en DDGs de trigo (cuadro 6).

En conjunto, estos datos indican que los DDGs de trigo o maíz representan alternativas energéticas y proteicas interesantes en piensos de porcino. Sin embargo, el balance de AA debe mejorarse mediante su complementación con proteínas de alta calidad o con AA sintéticos. Además, su valor nutritivo es altamente variable; esta variabilidad debe ser evaluada en orden a su uso seguro en piensos de porcino. En el caso de la lisina, su concentración en la PB o, más simplemente, su color, pueden utilizarse como indicadores de calidad proteica (Cozannet et al., 2010). Para la energía, se han propuesto ecuaciones de predicción de su concentración en ED, EM o EN (ver siguiente sección acerca de EvaPig; Cozannet et al., 2010). Finalmente, en conexión con su contenido en fibra, debe tenerse en cuenta que los cerdos adultos la degradan en mayor grado que los cerdos en crecimiento (Cozannet et al., 2010).

Cuadro 6.- Composición y valor nutritivo de los DDGs de maíz y trigo para ganado porcino.

	DDGS maíz ¹	DDGs trigo ²	
		Claro	Oscuro
Características químicas, % de materia seca			
Cenizas	4,4	4,9	5,7
Almidón	8,2	4,7	2,9
Extracto etéreo	5,4	4,3	5,1
Proteína bruta	28,2	36,2	35,8
Fibra bruta	8,3	7,8	9,5
Composición en aminoácidos (AA), % de proteína bruta			
AA esenciales	41,5	33,0	28,0
Lisina	2,8	2,3	1,0
Treonina	3,6	3,0	2,8
Metionina + cistina	4,0	3,3	2,9
Digestibilidad de la energía, %	76	70	60
Valor energético, MJ/kg MS (cerdos crecimiento)			
ED	16,9	14,5	12,6
EM	15,8	13,5	11,7
EN	9,3	8,3	7,0
Digestibilidad de aminoácidos, % ³			
AA esenciales	77	82	66
Lisina	62	69	24
Treonina	70	79	64
Metionina + cistina	77	81	59

¹Adaptado de Stein et al., 2006 (n = 10)

²Adaptado de Cozannet et al., 2010 (7 productos claros y 3 productos oscuros).

³Digestibilidad ileal estandarizada.

5.- EL SOFTWARE EVAPIG®

Excepto para las regiones donde se usan piensos simples (p.ej. maíz y soja), los piensos compuestos y los piensos concentrados pueden estar basados en ingredientes muy diferentes. Ya que estos alimentos tienen unas características químicas que varían en el tiempo y entre zonas de producción, tienen también unos valores nutritivos altamente variables. Es, por tanto, necesario caracterizarlos de la forma más precisa posible en orden a estimar sus valores para los animales. Sin embargo, la determinación *in vivo* de los

valores nutritivos es compleja, laboriosa y costosa. Por ello los productores de piensos tienden a estimar estos valores más que a medirlos. Los métodos de estimación son más o menos sofisticados y precisos; en la mayor parte de los casos, sólo se usan valores nutritivos medios disponibles en tablas de composición de alimentos, y los efectos de la composición química sobre el valor nutritivo son más o menos ignorados. Sin embargo, las tablas de alimentos proporcionan valores nutritivos medios, basados en características químicas medias que fueron determinadas en el momento de la publicación. Estos valores no son generalmente aplicables a los ingredientes actuales que tienen una composición diferente de la que se presenta en las Tablas. Al objeto de superar esta limitación fue desarrollado el programa EvaPig®. El programa está basado en los conceptos desarrollados anteriormente en este documento para valores de energía y proteína y en las Tablas INRA & AFZ (Sauvant et al., 2004) como base de datos de referencia; los valores publicados y no publicados del INRA referentes a la utilización digestiva de los nutrientes y de la energía en ingredientes para cerdos también ha sido utilizados. Todos los cálculos, supuestos y ecuaciones están disponibles en la página web www.evapig.com. El programa puede descargarse libremente desde esta dirección.

La primera función del EvaPig® es la estimación de los valores de energía (ED, EM, EN), proteína (aminoácidos digestibles) y minerales (fósforo digestible) de los ingredientes de acuerdo con su composición química. Para la energía se han propuesto valores diferentes para cerdos en crecimiento y cerdas adultas. La lista de ingredientes es la misma que la de las tablas INRA-AFZ, más algunos ingredientes nuevos valorados in vivo (por ejemplo, DDGS) de uso habitual en la actualidad. Los métodos de corrección y ajuste de los valores nutritivos se explican en el texto (Noblet et al., 2009; www.evapig.com). Los valores energéticos procedentes de las tablas INRA-AFZ o los presentados por defecto en EvaPig® se refieren a presentación en harina. Sin embargo, procesos tecnológicos tales como la molienda fina, granulación, extrusión, o la adición de enzimas incrementan los valores de digestibilidad de la energía (ver apartado anterior). El programa EvaPig® hace posible tener en cuenta los efectos del procesado mediante la aplicación de un “bonus energético” que puede aumentar hasta un 5% el valor energético del alimento; estos bonus deberían ser probablemente menos importante en el caso de cerdas adultas (la bibliografía disponible es escasa). El “bonus” también puede modificarse por parte del nutricionista cuando el valor energético de los ingredientes EvaPig® se considera que está subestimado. De igual modo, puede usarse un valor negativo cuando se considere que los valores propuestos están sobreestimados. Esta corrección se aplica al valor ED y modifica automáticamente los valores EM y EN.

La segunda utilidad del programa EvaPig® es la estimación de los valores de energía, proteína y minerales de ingredientes que no se encuentran en las tablas, o de

piensos compuestos cuya composición en ingredientes es desconocida; para ello se utilizan únicamente criterios químicos y ecuaciones (y coeficientes) genéricos. Para los valores energéticos, el proceso de cálculo predice la energía bruta, digestibilidad de la energía, EM/ED y EN/EM. El programa EvaPig® también proporciona por defecto coeficientes de digestibilidad para los aminoácidos que pueden ser modificados por el usuario. Sin embargo, aunque son de gran interés práctico, las ecuaciones genéricas son menos precisas y no pueden tener en cuenta efectos específicos de algunos ingredientes, tales como la presencia de factores antinutritivos o el tipo de estructura de la pared celular.

La tercera función del programa es el cálculo de los valores nutritivos de los piensos a partir de su composición en alimentos. Para piensos elaborados a partir de la lista de ingredientes, los valores químicos y nutritivos se calculan como una media ponderada a partir de sus niveles de incorporación y su contenido en materia seca; se supone que no existen interacciones. Para el cálculo del fósforo digestible, se tiene en cuenta la presencia y la cantidad de fitasa endógena y/o exógena junto con la forma de presentación (harina o gránulo).

En conclusión, el programa EvaPig constituye una herramienta para la estimación del valor nutritivo de los piensos de ganado porcino en función de las características químicas de los elementos. Es por tanto utilizable por la industria de piensos para generar valores nutritivos de partidas sucesivas de ingredientes. También puede utilizarse para la enseñanza de los conceptos nutritivos utilizados para valoración de alimentos. Finalmente, el programa hasta ahora está disponible en 13 idiomas diferentes, incluido el chino, y tiene una base de datos de alrededor de 120 alimentos; los valores para nuevos ingredientes y su traducción a otros idiomas se implementarán progresivamente.

6.- NUEVOS ASPECTOS DE VALORACIÓN DE ALIMENTOS

Los alimentos se caracterizan generalmente por su valor nutritivo expresado como la cantidad de energía, aminoácidos y, en menor extensión, de minerales disponibles para los animales. Los métodos, conceptos y su utilización práctica han sido ilustrados anteriormente. Sin embargo, deben desarrollarse nuevos métodos en orden a mejorar los sistemas tradicionales y para utilizar menos animales ajustándose a los nuevos límites éticos. Además, los alimentos deberán considerarse en el futuro como soluciones para controlar la salud de los cerdos, su bienestar o su impacto sobre el medio. Estas características de los alimentos ‘no nutritivas’ son todavía bastante desconocidas y se requieren nuevos conocimientos para mantener/mejorar la sostenibilidad y la imagen de la producción porcina.

6.1. Aspectos metodológicos.

El valor nutritivo de los piensos compuestos puede deducirse por la suma de la contribución de los diferentes nutrientes de los alimentos y asumiendo que no existen interacciones, ni influencia del nivel de inclusión de los ingredientes. En la mayor parte de los casos estos supuestos son correctos. Sin embargo, en algunas situaciones específicas existen interacciones a nivel digestivo y metabólico que pueden tener un efecto tanto positivo como negativo. Tales efectos son usualmente ignorados y se precisa un mayor grado de conocimiento de los mismos.

Los métodos de valoración de alimentos son bastante variables y más o menos complejos. Por un lado, es más sencillo, barato y rápido, pero menos preciso, usar valores medios de Tablas, al menos cuando la composición de los piensos en ingredientes es conocida. Sin embargo, esta composición puede ser desconocida o algún ingrediente utilizado puede no estar valorado o los ingredientes utilizados pueden tener una composición muy diferente a la reportada en las Tablas. Deben desarrollarse por tanto alternativas al uso de Tablas generales o de las determinaciones *in vivo*. Una primera opción es el uso de ecuaciones de predicción del valor energético o proteico; algunas ecuaciones para piensos compuestos basadas en composición química están disponibles en la literatura (Le Goff y Noblet, 2001) y el programa EvaPig presentado anteriormente contiene ecuaciones que pueden usarse para ingredientes. Una segunda opción es el uso de métodos *in vitro* que simulan la digestión en pasos sucesivos; un método de este tipo para estimar el valor energético de piensos de porcino ha sido propuesto recientemente por Noblet y Jaguelin-Peyraud (2007). Desgraciadamente, no existen métodos equivalentes disponibles para aminoácidos. La tercera opción está basada en métodos de espectroscopía y es muy eficiente para la estimación de las características químicas de cada ingrediente. Desafortunadamente, la predicción del valor nutritivo (ED, AA digestibles, etc.) por este método es complicada y su valor depende de la calidad o del tamaño de la base de datos usada en la calibración.

En conclusión, los métodos para predecir el valor nutritivo de los piensos de porcino, y más generalmente de los alimentos animales, necesitan ser mejorados al objeto de predecir con rapidez, bajo coste y precisión todas las características de un alimento incluyendo los criterios de valoración nutritiva. En este contexto, el impacto de las tecnologías (tamaño de partícula, tratamiento térmico, enzimas, etc.) sobre estos valores, representa una dificultad adicional. Al mismo tiempo, estos cambios en los métodos de valoración contribuirán a resolver problemas de tipo ético asociados al empleo de animales para la valoración de alimentos.

6.2. Alimentación y salud

La salud de los animales es un gran desafío en la mayoría de los países en los que existe preocupación por el excesivo uso de antibióticos en la producción porcina. Alternativas tales como mejoras en el manejo o en el ambiente, la selección genética para resistencia a enfermedades o la utilización de aditivos no antibióticos (ácidos, enzimas, etc.; Gallois et al., 2009) han sido estudiadas y pueden contribuir a mejorar la salud y la eficacia productiva en la producción porcina. Las características del alimento y, eventualmente, los efectos específicos de algunos ingredientes o de los constituyentes químicos pueden también jugar un papel importante en el estatus sanitario de los animales (Bikker y Verstegen, 2010).

En primer lugar, se recomienda proporcionar una dieta que cubra las necesidades del animal y que contribuya a su salud y a su bienestar. Esto es crítico para el caso de los minerales, vitaminas y aminoácidos en ciertas situaciones que pueden darse en función de las limitaciones de uso de estos nutrientes por razones regulatorias, técnicas o económicas. Esto puede generar un riesgo de deficiencias o desequilibrios entre nutrientes.

En segundo lugar, una proporción importante de los problemas sanitarios en la producción porcina están relacionados con patologías digestivas, especialmente en el momento del destete (Lallès et al., 2009). La mayor parte de los problemas ocurren en el intestino grueso en correspondencia con la cantidad y calidad de la fibra de la dieta. Sin embargo, los resultados sobre el interés de la fibra son bastante controvertidos, aunque existe un progresivo consenso sobre el interés de utilizar niveles altos de fibra fermentable. Estas discrepancias están relacionadas con la insuficiente caracterización de la fibra, probables interacciones positivas o negativas con el resto de la dieta y a la escasez de conocimientos sobre la biología de la flora digestiva (Bikker y Verstegen, 2010). En conclusión, este área de investigación merece más estudios básicos para poder proponer soluciones seguras y prácticas para mejorar la salud intestinal en cerdos, especialmente durante la fase post-destete.

6.3. Alimentación y bienestar

El bienestar de animales criados en sistemas intensivos se ha convertido en un tema cada vez más importante y diferentes propuestas de manejo o alojamiento que contribuyen a mejorarlo se han ido implementando progresivamente. También se han propuesto cambios en las características del alimento con el mismo objetivo. El estado de producción más crítico corresponde a la gestación de las cerdas que son alimentadas de forma restringida; su saciedad y desórdenes de comportamiento pueden regularse modificando las

características de la dieta. De nuevo, la mayor parte de los efectos significativos observados se asocian a la adición de fibra, siendo especialmente importantes cuando se utiliza pulpa de remolacha (Brouns et al., 1995). Otras fuentes de fibra o combinaciones de fuentes de fibra pueden también ser útiles para modificar el comportamiento de las cerdas gestantes (Ramonet et al., 2000; De Leeuw et al., 2005). En conjunto, hay un consenso generalizado sobre el uso de dietas ricas en fibra en cerdas gestantes, interés que se enfatiza por la alta capacidad de estos animales para digerir la fibra (ver apartado anterior). Sin embargo, la cuantificación de este efecto de la fibra sobre el bienestar y el comportamiento está todavía insuficientemente documentada, especialmente para el efecto de diferentes fuentes de fibra sobre las propiedades de la fibra presente en el contenido digestivo.

6.4. Alimentación y ambiente

La producción porcina, y más en general toda la producción ganadera, por un lado consume materias primas (cereales, harinas, forrajes, fósforo, etc.) para la producción de carne, leche, huevos, etc. y, por otra, genera efluentes, gases, etc. que pueden contribuir a deteriorar el medio ambiente. La ganadería, las industrias (incluyendo los biocombustibles) y los humanos son, por tanto, competidores por la utilización de las materias primas disponibles anualmente. La disponibilidad y la accesibilidad de algunos ingredientes para la producción animal puede por ello disminuir. En tales circunstancias, el valor nutritivo tiene una importancia limitada en la formulación de las dietas, mientras que criterios de tipo socio-económico se convierten en más relevantes. La posibilidad de alimentar los cerdos (y los animales monogástricos, en general) con una mayor cantidad de subproductos debe ser evaluada, incluyendo la selección de animales con mayor capacidad para digerir subproductos con un alto contenido en fibra.

Las especificaciones de la dieta pueden contribuir de forma importante a una reducción del impacto ambiental de la producción animal. Se ha realizado mucha investigación en orden a reducir los niveles de nitrógeno (con el uso de AA sintéticos), fósforo (con el uso de fitasas) o de microminerales específicos (Cu, Zn) en piensos. Sin embargo, las posibilidades prácticas pueden estar limitadas por razones técnicas, regulatorias o económicas. Las características del pienso pueden también alterar los niveles de otras sustancias relacionadas con la contaminación del aire, el agua o el suelo. Un ejemplo lo constituyen las emisiones de amoníaco, que son altamente dependientes de la ruta (heces u orina) de la excreción de nitrógeno en los animales. De nuevo, un incremento en el suministro de fibra en el pienso de ganado porcino, reduce la producción de urea y aumenta el crecimiento bacteriano con la subsiguiente disminución de la producción de amoníaco (Canh et al., 1998). De forma más general, es el momento de evaluar el impacto

global de cada ingrediente y de cada pienso sobre el ambiente. La metodología “Life Cycle Assessment” ha sido desarrollada con este propósito (Basset-Mens y van der Werf, 2005; de Vries y de Boer, 2010). Desafortunadamente, la cuantificación de este impacto global es bastante compleja, está basada en hipótesis controvertidas y todavía no es lo suficientemente precisa para diferenciar entre distintas estrategias de alimentación.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo de revisión indica que se han desarrollado nuevas herramientas para la estimación del valor nutritivo de los piensos (energía neta, aminoácidos digestibles) en los últimos años y que ya han sido implementadas para poder ser utilizadas en la práctica; tablas de alimentos y sistemas de cálculo han sido propuestos. Todavía existe cierta incertidumbre sobre el efecto de los tratamientos tecnológicos sobre el valor nutritivo de los alimentos. Otro desafío importante consiste en proponer nuevos métodos que permitan una evaluación más rápida, barata, precisa y ética (p. ej. menos y menos animales) de los alimentos para el ganado porcino: métodos *in vitro* y NIRS deberían ser evaluados. Finalmente, las funciones “no nutricionales” de los piensos, tales como la mejora del bienestar o la salud de los animales, o la reducción del impacto de la producción porcina sobre el medio ambiente han de ser progresivamente cuantificadas; desde ese punto de vista, la fibra de la dieta, que es bastante “inerte” en términos de proporcionar nutrientes al animal, debería ser más estudiada en el futuro, unido a la creciente disponibilidad de co-productos y la mayor competencia con otros usos de las materias primas convencionales utilizadas en piensos.

8.- REFERENCIAS

- AFZ, AJINOMOTO EUROLYSINE, AVENTIS ANIMAL NUTRITION, INRA, ITCF (2000) *AmiPig. Standardised Ileal Digestibility of amino acids in feedstuffs for pigs*, AFZ, Paris (www.feedbase.com/amipig).
- BASSET-MENS, C. y VAN DER WERF, H.M.G. (2005) *Agric., Ecosyst. Environm.* **105**: 127-144.
- BIKKER, P. y VERSTEGEN, M. (2010) En: *Energy and protein metabolism and nutrition*. EAAP n°127, Ed. M. Crovetto, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, pp. 573-582
- BROUNS, F., EDWARDS, S.A. y ENGLISH, P.R. (1995) *Anim. Feed Sci. Technol.* **54**: 301-313.

- CANH, T.T., SUTTON, A.J., AARNINK, A.J., VERSTEGEN, M.W., SCHRAMA, J.W. y BAKKER, G.C. (1998) *J. Anim. Sci.* 76: 1887-1895.
- COZANNET, P., PRIMOT, Y., GADY, C., MÉTAYER, J.P., CALLU, P., LESSIRE, M., SKIBA, F. y NOBLET, J. (2010) *Anim. Feed Sci. Technol.* 158: 177-186.
- COZANNET, P., PRIMOT, Y., GADY, C., MÉTAYER, J.P., LESSIRE, M., SKIBA, F. y NOBLET, J. (2010) *J. Anim. Sci.* 88: 2382-2392.
- DE LEEUW, J.A., ZONDERLAND, J.J., ALTENA, H., SPOOLDER, H.A.M., JONGBLOED, A.W. y VERSTEGEN, M.W.A., (2005) *Appl. Anim. Behav. Sci.* 94: 15-29.
- DE VRIES, M. y DE BOER, I.J.M., (2010) *Livest. Sci* 128: 1-11.
- EVAPIG (2008) *A calculator of energy, amino acid and phosphorus values of ingredients and diets for growing and adult pigs*. www.evapig.com.
- GALLOIS, M., ROTHKOTTER, H.J., BAILEY, M., STOKES, C.R. y OSWALD, I., (2009) *Animal* 3: 1644-1661.
- GUILLOU, D. y LANDEAU, E. (2000) *Prod. Anim.* 13: 137-145.
- LAHAYE, L., GANIER, P., THIBAUT, J.N., RIOU, Y. y SÈVE, B. (2008) *Anim. Feed Sci. Technol.* 141: 287-305.
- LALLÈS, J.P., BOSI, P., JANCZYK, P., KOPMANS, S.J. y TORRALARDONA, D. (2009) *Animal* 3: 1625-1643.
- LE GALL, M., WARPECHOWSKI, M, JAGUELIN-PEYRAUD, Y. y NOBLET, J. (2009) *Animal* 3: 352-359.
- LE GOFF, G. y NOBLET, J. (2001) *J. Anim. Sci.* 79: 2418-2427.
- LE GOFF, G., VAN MILGEN, J. y NOBLET, J. (2002a) *Anim. Sci.* 74: 503-515.
- LE GOFF, G., DUBOIS, S., VAN MILGEN, J. y NOBLET, J. (2002b) *Anim. Res.* 51: 245-259
- NOBLET, J., SHI, X.S. y DUBOIS, S. (1993a) *Br. J. Nutr.* 70: 407-419
- NOBLET, J., FORTUNE, H., SHI, X.S. y DUBOIS, S. (1994a) *J. Anim. Sci.* 72: 344-354.
- NOBLET, J., SHI, X.S. y DUBOIS, S. (1994b) *J. Anim. Sci.* 72: 648-657.
- NOBLET, J., BONTEMS, V. y TRAN, G. (2003) *Prod. Anim.* 16: 197-210.
- NOBLET, J. y CHAMPION, M. (2003) *J. Anim. Sci.* 81 (Suppl. 1), 140.
- NOBLET, J. y VAN MILGEN, J. (2004) *J. Anim. Sci.* 82: E229-E238.
- NOBLET, J., SÈVE, B. y JONDREVILLE, C. (2004a) En: *Tables of composition and nutritional value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish* (Ed. D. Sauvant, J.M. Perez and G. Tran). Wageningen Academic Publishers, Wageningen and INRA Editions, Versailles. pp. 25-35.
- NOBLET, J., SÈVE, B. y JONDREVILLE, C. (2004b) En: *Tablas de composicion y de valor nutritivo de las materias primas destinadas a los animales de interès ganado: cerdos, aves, bovinos, ovinos, capriunos, conejos, caballos, peces*. D. Sauvant, J.M. Perez & G. Tran (Eds), Ediciones Mundi Prensa, Madrid, pp. 25-35.

- NOBLET, J. (2006) En: *Recent Advances in Animal Nutrition 2005*. Eds. P.C. Garnsworthy and J. Wiseman, Nottingham University Press, Nottingham. pp 1-26
- NOBLET, J. y JAGUELIN-PEYRAUD, Y. (2007) *Anim. Feed Sci. Technol.* 134: 211-222
- NOBLET, J. y JAGUELIN-PEYRAUD, Y. (2008) *J. Anim. Sci.* 86 (E-suppl. 2): 574.
- NOBLET, J., JAGUELIN-PEYRAUD, Y., QUEMENEUR, B. y CHESNEAU, G. (2008) *Journées Rech. Porcine en France* 40: 203-208
- NOBLET, J., VALANCOGNE, A., TRAN, G. y PRIMOT, Y. (2009) *Feed Mix* 17 (3): 10-12
- RAMONET, Y., ROBERT, S., AUMAITRE, A., DOURMAD, J.Y. y MEUNIER-SALAUN, M.C. (2000) *Anim. Sci.* 70: 275-286.
- SAUVANT, D., PEREZ, J.M. y TRAN, G. (2004) *Tables of composition and nutritional value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen e INRA Editions, Versailles.
- SKIBA, F., NOBLET, J., CALLU, P., EVRARD, J. y MELCION, J.P. (2002) *Journées Rech. Porcine en France* 34: 67-74.
- STEIN, H.H., GIBSON, M.L., PEDERSEN, C. y BOERSMA, M.G. (2006) *J. Anim. Sci.* 84: 853-860.
- STEIN, H.H., SÈVE, B., FULLER, M.F., MOUGHAN, P.J. y DE LANGE, C.F.M. (2007) *J. Anim. Sci.* 85: 172-180.
- VAN MILGEN, J., NOBLET, J. y DUBOIS, S. (2001) *J. Nutr.* 131: 1309-1318.