

Capítulo 3

Producción de etanol y sus coproductos

Tecnologías de fraccionamiento inicial y de extracción de aceite final

Introducción

Aunque la mayoría de los coproductos de maíz producidos por la industria del etanol de molienda en seco son los granos secos de destilería con solubles, se producen cantidades limitadas de nuevos coproductos de maíz, en particular, los DDG altos en proteína. Desde hace algunos años ha disminuido de manera espectacular el interés por parte de la industria del etanol de EUA de implementar las tecnologías de fraccionamiento inicial, lo cual se puede deber a la alta inversión de capital que se necesita y a las mejoras decepcionantes en la eficiencia de la producción del etanol. Existen varias razones del porqué se consideraban las tecnologías de fraccionamiento hace unos años en la industria del etanol de EUA. Entre algunas de ellas se incluyen el mayor rendimiento del etanol, menor uso de enzimas durante la fermentación, producción más baja de la masa de coproductos que requiere secado, reducción de los costos de secado y daño térmico a las proteínas en los coproductos, menos utilización de energía y agua, reducción de la necesidad de limpieza frecuente del sistema para eliminar el aceite, capacidad de comercializar o de usar el aceite de maíz para otras aplicaciones de alto valor y un mayor número de coproductos fraccionados que podrían añadirían valor y crear nuevos mercados para los coproductos de maíz. Desafortunadamente, nunca se llevaron a cabo muchos de estas posibles ventajas.

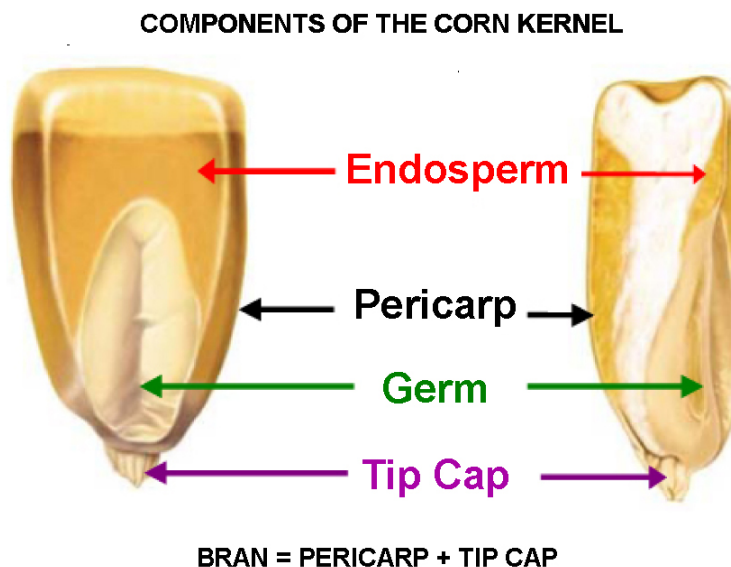
Por lo tanto, ya no se utilizan casi todas las tecnologías de fraccionamiento inicial descritas en este capítulo. Es incierto si estas tecnologías y los nuevos coproductos de maíz producidos de estos procesos, se van a volver a considerar en el futuro. Por lo tanto, el propósito de este capítulo es proporcionar el conocimiento de la amplia gama de tecnología inicial y final de coproductos de destilería y etanol que se ha desarrollado y la investigación que ha empezado a determinar el uso potencial de estos coproductos en alimentos para animales.

Panorama del fraccionamiento inicial y la extracción final de aceite

El fraccionamiento implica la separación del grano de maíz en tres componentes: el endospermo, el germen y el salvado (punta y pericarpio). El endospermo representa alrededor del 83% del grano de maíz, el cual está compuesto principalmente de almidón, mientras que el germen (alrededor del 12% del grano) es alto en aceite, proteínas, cenizas y carbohidratos no fermentables. El resto de la porción de salvado está casi exclusivamente compuesta de fibra (carbohidratos no fermentables).

El fraccionamiento inicial implica la separación de las fracciones del endospermo, el germen y el salvado antes de la fermentación. La fracción del endospermo (rica en almidón) se fermenta para producir etanol y un coproducto de maíz. El aceite de maíz se extrae de la fracción del germen y se comercializa o utiliza para varias aplicaciones industriales, lo que deja a la harina de germen de maíz como un coproducto para alimentos balanceados. La fracción de salvado también se separa y se utiliza como un alimento alto en fibra, principalmente para rumiantes.

En contraste con el fraccionamiento inicial, la extracción final de aceite se ha convertido en la nueva tecnología de más popularidad en la industria del etanol de EUA, en la que más del 50% de las plantas de etanol extraen aceite de maíz. La mayor parte de la industria del etanol utiliza un proceso de extracción “Paso 1”, en el que el aceite de maíz se extrae del



destilado ligero después de eliminarse del destilado entero mediante centrifugación (CEPA, 2011). El destilado ligero resultante parcialmente concentrado se calienta y el aceite de maíz se extrae mediante una segunda centrifuga. Los intercambiadores de calor utilizan vapor para aumentar la temperatura del destilado ligero para facilitar la extracción, por lo que después se extrae el aceite de maíz, se recupera la energía térmica del destilado en los intercambiadores de calor para calentar el destilado que entra.

El destilado ligero contiene aproximadamente 30% del aceite disponible en el maíz, del cual se recupera la mayor parte mediante este proceso “Paso 1”, que depende de las condiciones particulares de la planta de etanol (CEPA, 2011). En general, una planta de etanol típica utiliza maíz que contiene aproximadamente 4% de aceite (con base en el peso) que termina en los DDGS si no se extrae. Por ejemplo, una planta de etanol de molienda en seco con una capacidad de producción anual de 190 millones de litros puede recuperar 5.7 millones de litros de aceite de maíz al año.

Aún no se ha implementado el proceso “Paso 2” en la mayor parte de las plantas en Estados Unidos, pero es un proceso de extracción adicional que puede capturar un 30% más del aceite de maíz que está destinado al destilado completo antes de la separación por centrifuga de los granos húmedos y del destilado ligero (CEPA, 2011). Ya que más del 40% del aceite total en el maíz está atrapado dentro de la pasta húmeda, se “lava” esta pasta o torta para liberar el aceite para que se pueda extraer en el sistema “Paso 1”. El aceite adicional que estuvo a disposición en el proceso de extracción “Paso 1” generalmente duplica la producción del aceite de maíz. Por lo tanto, con la combinación de usar tanto los procesos del “Paso 1” como del “Paso 2”, se pueden extraer del 60 al 70% del aceite de maíz presente en los coproductos de destilería.

Como resultado, estas tecnologías permiten la extracción de 23 a 27 litros de aceite de maíz por cada 380 litros de etanol producido.

Por cada 3.8 litros de etanol producido, se producen 2.4 kg de DDGS sin la extracción del aceite de maíz (CEPA, 2011). Sin embargo, con la extracción de este aceite de maíz, el rendimiento DDGS se reduce en aproximadamente 0.06 kg por litro de etanol producido, lo que representa una reducción del 9.4% en el rendimiento de DDGS. La eliminación del aceite de maíz afecta el perfil nutricional de los DDGS, principalmente al reducir el contenido de grasa y energía, y al aumentar la concentración de proteína. Refiérase entonces a los **Capítulos 15, 18, 20 y 22** para obtener más información sobre los efectos de alimentar los DDGS reducidos en aceite a ganado de engorda, ganado lechero, aves y cerdos respectivamente.

Hay una serie de tecnologías de fraccionamiento y extracción de aceite en desarrollo y evaluación, pero que no se han implementado ampliamente para la producción de etanol y coproductos. Los siguientes son ejemplos de los tipos de tecnologías que se están bajo investigación y desarrollo para mejorar el rendimiento de etanol, que resultan en una gran variedad de coproductos con diferentes composiciones de nutrientes que tarde o temprano estarán a disposición para usarse en alimentos balanceados:

1. Esfuerzos para mejorar la eficiencia de la fermentación y la producción de etanol de maíz
 - a) adición de proteasas además de carbohidrasas (Wang et al., 2009)
 - b) comparación de enzimas que hidrolizan el almidón crudo con la licuación convencional y las enzimas de sacarificación (Wang et al., 2007)
 - c) uso de enzimas de licuación endógena (Singh et al., 2006)
 - d) comparación de procesos enzimáticos (E-Mill) y convencionales de maíz molienda en seco con enzimas que hidrolizan el almidón granular (Wang et al., 2005)
2. pretratamientos y fermentación de los componentes de los DDGS para aumentar el rendimiento del etanol
 - a) separación de la proteína en el pretratamiento (Brehmer et al., 2008)
 - b) pretratamiento e hidrólisis enzimática (Perkis et al., 2008)
 - c) fermentación de hidrolizados de DDGS a solventes y productos de valor agregado mediante clostridio solventógeno (Ezeji y Blaschek, 2008)
 - d) uso de agua caliente y amoníaco para expandir los componentes de fibra de los DDGS (Dien et al., 2008; Kim et al., 2008a, b; Lau et al., 2008)
 - e) solubilización en agua de DDGS con ésteres de fosfato (Oshel et al., 2008)
 - f) uso de productos de la fermentación de estado sólido que se desarrollan en DDGS (Hoskins y Lyons, 2009)
3. separación de la fibra para mejorar el rendimiento del etanol
 - a) de DDG y DDGS (Srinivasan et al., 2005, 2007a,b, 2008 a,b, 2009; Srinivasan y Singh, 2006;)

- b) decorticación (Corredor et al., 2006)
- c) comparaciones de la molienda rápida del germen, de la fibra y enzimática con el proceso convencional de maíz molido en seco (Singh et al., 2005)
- d) eliminación del germen y la fibra en seco para separar el germen y la fibra del pericarpio del maíz antes de la fermentación de la fracción del endospermo y eliminación de lípidos (Murthy et al., 2006)
- 4. Métodos de procesamiento del maíz
 - a) de eficiencia de extracción de aceite (Wang et al., 2009)
 - b) extracción supercrítica de CO₂ y con hexano de lípidos de los DDGS (Wang et al., 2008; 2007)
 - c) transesterificación *in situ* para la producción de ésteres de ácidos grasos de los DDGS (Haas et al., 2007)
- 5. producción integrada de etanol y biodiesel a partir de DDGS (Balan et al., 2009)
- 6. Extracción de zeína de los DDGS (Xu et al., 2007)

Composición de nutrientes y nuevos coproductos de maíz

Debido a que el fraccionamiento es una tecnología nueva que está surgiendo en la producción de etanol para combustible, hay pocos datos de composición de nutrientes de los coproductos resultantes. En el **Cuadro 1** se muestra la concentración de materia seca, proteína cruda, grasa cruda, fibra cruda y cenizas de la mayoría de estos coproductos fraccionados conocidos.

Cuadro 1. Composición de nutrientes de los nuevos coproductos fraccionados de destilería del maíz (base materia seca).

Compañía del coproducto	Materia seca, %	Proteína cruda, %	Grasa cruda, %	Fibra cruda, %	Cenizas, %
-------------------------	-----------------	-------------------	----------------	----------------	------------



DDGS típico de maíz	89.3	30.9	10.7	7.2	6.0
Poet Dakota Gold HP	91.6	44.8	3.9	7.3	2.1
Poet Dakota Bran	ND ¹	14.6	9.8	3.8	4.6
Poet Dehydrated Corn Germ	93.2	16.9	18.9	5.5	5.8
Maize Processing Innovators Quick Germ/Quick Fiber DDGS	ND	49.3	3.9	6.8	3.2
Maize Processing Innovators E-Mill DDGS	ND	58.5	4.5	2.0	3.2
Cereal Process Technologies Hi-Protein DDGS	ND	35.0-37.0	4.0-6.0	4.0-6.0	ND
Renessen Enhanced DDGS	ND	40.0-50.0	2.5-4.0	7.0-11.0	ND
Solaris NeutraGerm	97.0	17.5	45.0	6.0	1.9
Solaris Probran	90.0	9.5	2.0	16.6	1.0
Solaris Glutenol	90.0	45.0	3.3	3.8	4.0
Solaris Energia	90.0	30.0	2.5	8.2	2.5
FWS Technologies Enhanced DDGS	ND	35.0-37.0	6.5	ND	3.8
De-Oiled DDGS	89.9	31.3	2.3	ND	6.2
J. Jireh Products Dried Condensed Solubles	93.4	21.6	4.7	3.1	8.3

¹ ND = no determinado.

En general, la mayoría de los coproductos fraccionados de maíz son más altos en proteína cruda y fibra cruda que los DDGS, y son más bajos en grasa cruda. Aunque la concentración de aminoácidos puede aumentar ligeramente en muchos de los coproductos fraccionados altos en proteína, la calidad de ésta (balance de aminoácidos) sigue siendo mala en relación a los requerimientos de los animales monogástricos. La reducción de la grasa y el aumento del contenido de la fibra de esas fracciones puede resultar en un valor energético más bajo para cerdos y aves. Por lo tanto, su valor alimenticio y económico se pueden ver reducidos en comparación con los DDGS para cerdos, aves y acuicultura. Sin embargo, con base en la composición de nutrientes de estos coproductos, generalmente van a tener un mayor valor en las dietas de rumiantes, debido a que balance de aminoácidos de la proteína del maíz no es tan crítico en las dietas de rumiantes, como lo es en las porcinas, avícolas y acuícolas. Además, la mayor cantidad de fibra fácilmente fermentable puede proporcionar una buena fuente de energía para los rumiantes y el menor contenido de grasa puede permitir mayores tasas de inclusión en la dieta para vacas lecheras lactantes y reducir las preocupaciones de la disminución de la grasa láctea en niveles más altos de alimentación.

Digestibilidad de nutrientes de coproductos de maíz nuevos seleccionados

En el **Cuadro 2** se muestran referencias de las publicaciones científicas con resultados de la alimentación de los nuevos coproductos de maíz fraccionados a varias especies ganaderas y avícolas. La mayoría de estos estudios han evaluado el contenido de nutrientes y su digestibilidad, pero no las tasas máximas de inclusión en la dieta ni tampoco se han

determinado sus efectos sobre el desempeño en animal.

Cuadro 2. Resumen de los estudios publicados que implican la alimentación de nuevos coproductos de maíz fraccionados a ganado y aves.

Especie	HP-DDG	DDG sin aceite	Germen de maíz	Salvado de maíz	Otros
Ganado de engorda estabulado				Bremer et al. (2006) Berger y Singh (2009)	Fraccionamiento parcial de DDGS (Depenbusch et al., 2008)
Vacas lecheras lactantes	Kelzer et al. (2007) Mjoun et al. (2009b)	Mjoun et al. (2009a, b)	Kelzer et al. (2007) Abdelqader et al., (2006)	Kelzer et al. (2007) Janicek et al. (2007)	
Cerdos en crecimiento-finalización	Widmer et al. (2007) Widmer et al. (2008) Gutiérrez et al. (2009a,b) Anderson et al. (2009)	Anderson et al. (2009)	Widmer et al. (2007) Widmer et al. (2008) Anderson et al. (2009)	Anderson et al. (2009)	Prod. de levaduras Stein et al. (2005) Coproductos de maíz desgerminados, condensados, solubles y deshidratados - Anderson et al. (2009) Helembai et al. (2006)
Pollos de engorda	Batal (2007) Kim et al. (2008)		Batal (2007) Kim et al. (2008)	Batal (2007)	
Gallinas de postura	Batal (2007) Kim et al. (2008)		Batal (2007) Kim et al. (2008)	Batal (2007)	
Pavos	Batal (2007) Kim et al. (2008)		Batal (2007) Kim et al. (2008)	Batal (2007)	Coproducto de maíz hidrolizado alto en proteína (Abe et al., 2004)

Aves

Se evaluó un coproducto de maíz hidrolizado alto en proteína obtenido del National Renewable Energy Laboratory en cuanto al contenido y digestibilidad de nutrientes, así como su valor alimenticio en dietas de iniciación de pavos (Abe et al., 2004). El contenido de materia seca, cenizas, grasa, fibra, proteína, almidón y azúcar fueron 95.9, 1.43, 10.7, 3.9, 57.8, 1.6, y 2.0%, respectivamente. El contenido de lisina, arginina, triptofano, treonina, cistina y metionina como % de la proteína cruda fueron 1.99, 2.63, 0.34, 3.14 y 2.1% respectivamente, y los coeficientes de digestibilidad fueron 68.1, 79.0, 64.0, 75.2, 78.3 y 85.9%, respectivamente. La energía metabolizable verdadera (EMV_n) corregida por nitrógeno fue de 2,692 kcal/kg (en base a como se alimentó). Cuando se añadió 0, 5, 10, 15 y 20% de este coproducto a las dietas y se

alimentó de 3 a 18 días de edad, hubo una disminución lineal en la GDP al día 11 y un efecto cúbico del día 11 al 18. Estos resultados indican que se puede usar hasta el 10% de este coproducto de manera eficaz hasta el día 14, y que se pueden tener tasas de inclusión mayores que puedan proporcionar un crecimiento satisfactorio en pavos mayores de dos semanas.

Batal (2007) determinó la digestibilidad de nutrientes de DDGS, granos secos de destilería de maíz con solubles altos en proteína (HP-DDGS), germen de maíz deshidratado y salvado de maíz en aves (**Cuadro 3**). Estos resultados indican que las nuevas tecnologías de fraccionamiento utilizadas en la producción de etanol resultan en coproductos que tienen propiedades nutricionales especiales, por lo que es básico el conocimiento de su valor nutritivo con el fin de evaluar su valor económico y alimenticio.

Cuadro 3. Contenido y digestibilidad de nutrientes de los DDGS, HP-DDGS, germen de maíz de deshidratado y salvado de maíz para aves¹.

Nutriente	DDGS	HP-DDGS	Germen de maíz deshidratado	Torta de salvado
Proteína cruda, %	27.0	44.0	15.5	11.6
Fibra cruda, %	7.0	7.0	4.5	4.5
Grasa cruda, %	10.0	3.0	17.0	7.8
EMV_n, kcal/kg	2,829	2,700	2,965	2,912
Lisina, %	0.79	1.03	0.83	0.43
Disponibilidad de lisina, %	81	72	80	68
Lisina como % de PC	2.9	2.3	5.4	3.7
Fósforo, %	0.77	0.35	1.18	Sin datos
Biodisponibilidad de P, %	60	47	31	Sin datos

¹ Batal, 2007.

Los DDGS altos en proteína (33% proteína, 0.33% de fósforo con base en materia seca de 90%) y la harina de germen de maíz (14% cruda y 1.22% de fósforo) se alimentaron a pollos y gallos con alimentación precisa a para determinar la EMV_n corregida por nitrógeno, la digestibilidad de aminoácidos y la biodisponibilidad de fósforo para aves (Kim et al., 2008). La EMV_n y la digestibilidad de aminoácidos en la harina de germen de maíz fue significativamente más alta en comparación con los HP-DDGS, mientras que la biodisponibilidad de P fue similar entre los DDGS y los HP-DDGS (60 vs. 58%, respectivamente), pero más baja que la harina de germen de maíz (25%). Estos resultados indican que la harina de germen de maíz es una mejor fuente de energía con digestibilidad de aminoácidos más alta que los HP-DDGS, pero los DDGS y los HP-DDGS son mejores fuentes de fósforo disponible que la harina de germen de maíz para aves.

Rochelle et al. (2011) utilizaron un análisis de regresión por pasos para desarrollar una ecuación de predicción que calculara la EMV_n de usar datos de composición de nutrientes y la EMV_n *in vivo* de una colección diversa de coproductos de maíz. La EMV_n se puede predecir ($R^2 = 0.89$, SEM =191, $P < 0.01$) como sigue:

$$EMV_n \text{ (kcal/kg de materia seca)} = 3,517 - (33.27 \times \% \text{ hemicelulosa, base materia seca}) + (46.02 \times \% \text{ grasa cruda, base MS}) - (82.47 \times \% \text{ cenizas, base MS})$$

Cerdos

Widmer et al. (2007) realizaron tres experimentos para determinar la digestibilidad de energía, fósforo y aminoácidos en los HP-DDG y germen de maíz, en comparación con el maíz. El contenido de energía metabolizable y digestible del maíz con base en MS (4,056 y 3,972 kcal/kg, respectivamente) fue similar al del germen de maíz (3,979 y 3,866 kcal/kg, respectivamente), pero fueron sorprendentemente más bajas que los HP-DDG (4,763 y 4,476 kcal/kg, respectivamente). La digestibilidad total verdadera del tubo digestivo del fósforo fue más alta en HP-DDG (69%) en comparación con el germen de maíz (34%), y similar a los valores obtenidos por Kim et al. (2008) en aves. La digestibilidad ileal estandarizada de la proteína cruda y de todos los aminoácidos excepto arginina, lisina, glicina y prolina fueron más altos en HP-DDG que en el germen de maíz. Por lo tanto, los HP-DDG parecen tener niveles más altos de energía digestible, fósforo y la mayoría de los aminoácidos que el germen de maíz para cerdos.

Stein et al. (2005) realizaron dos estudios para determinar la digestibilidad de energía, proteína cruda y aminoácidos de un producto de levadura extraído de la corriente de coproducto del etanol. La concentración de energía digestible y metabolizable en el producto de levadura fue de 5,600 y 5,350 kcal/kg de MS, respectivamente, que es 138 a 134% del valor encontrado en el maíz (4,071 y 3,992 kcal/kg, respectivamente). Los coeficientes de digestibilidad ileal estandarizada también fueron altos para la proteína cruda (74.8%), lisina (82.2%), metionina



(88.6%), treonina (71.1%), triptofano (82.2%), isoleucina (79.5%), leucina (84.0%) y valina (74.5%). Estos resultados indican que este producto de levadura puede ser una excelente fuente de energía y aminoácidos digestibles en las dietas de cerdos.

Helembai et al. (2006) evaluaron la digestibilidad aparente de los nutrientes y la retención de nitrógeno de la harina de gluten de maíz, DDGS y NuPro a base de hidrolizado de levadura en cerdos en crecimiento. La digestibilidad aparente de la proteína cruda (82.7%) y la retención de nitrógeno (53.3%) fue mayor en NuPro al nivel de inclusión de 20% de la dieta. La digestibilidad de la proteína cruda de los DDGS fue de 75.8% y la retención de nitrógeno más baja (44.03%), mientras que la digestibilidad de proteína cruda de la harina del gluten de maíz fue alta (82.9%), pero la retención de nitrógeno fue baja (24.9%). La digestibilidad aparente de la grasa cruda fue similar en los tres coproductos de maíz (68.0, 67.4 y 68.1%, respectivamente). A pesar de las diferencias en la retención de nitrógeno, todos estos coproductos tuvieron un extracto libre de nitrógeno digestible aparente alto (85.2, 81.4 y 82.2%, respectivamente), así como de materia seca (86.4, 80.6 y 82.6%, respectivamente), además de que son altamente digestibles.

En un estudio reciente, Anderson et al. (2012) evaluaron varios coproductos de maíz (**Cuadro 4**), que variaban sustancialmente en contenido de nutrientes para determinar su contenido de ED y EM en cerdos en finalización. Los ingredientes evaluados incluían aquellos bajos en fibra (almidón, aceite, solubles secos y maíz desgerminado y descascarillado), DDGS (n = 7), alto en proteína (HP-DDG; n = 3, y harina de gluten de maíz), y alto en fibra (salvado, n = 2; harina de germen de maíz, n = 2; y harina de gluten de maíz >20% de proteína). La mayoría de los ingredientes se obtuvieron de varias plantas de etanol de molienda en seco, con la excepción de la harina de gluten, la harina de gluten de maíz >20% de proteína y una fuente de la harina de germen de maíz, que se obtuvieron de plantas de molienda húmeda de maíz. Una de las materias primas, el maíz descascarillado y desgerminado, es un coproducto del proceso de molienda en seco fraccionado.

Cuadro 4. Fuentes de coproductos de maíz utilizadas para determinar la ED y la EM para finalización

¹.

Materia prima	Proveedor
Harina de gluten de maíz >20% de proteína	Tate & Lyle, Ft. Dodge, IA
Salvado de maíz	ICM/Lifeline Foods, St. Joseph, MO
Salvado de maíz con solubles	Poet Biorefining, Glenville, MN
DDGS	Ace Ethanol, Racine, WI
DDGS – secados en tambor	Cellencor, Heron Lake, MN
DDGS – secados en microondas	Cellencor, Heron Lake, MN
DDGS	Hawkeye Renewables, Iowa Falls, IA
DDGS- Dakota Gold BPX	Poet Biorefining, Groton, SD
DDGS	VeraSun Energy Corporation, Aurora, SD
DDGS – con aceite extraído	VeraSun Energy Corporation, Aurora, SD
Harina de gluten de maíz	Archer Daniels Midland, Cedar Rapids, IA
HP-DDG	ICM/Lifeline Foods, St. Joseph, MO
HP-DDG	MOR Technology, Cape Girardeau, MO

HP-DDG	Poet Biorefining, Coon Rapids, IA
Germen de maíz deshidratado	Poet, Coon Rapids, IA
Harina de germen de maíz	Cargill, Eddyville, IA
Maíz seco de destilería con solubles	Pulse Combustion Systems, Payson, AZ
Maíz descascarillado y desgerminado	Bunge North America, Atchison, KS
Almidón de maíz	Archer Daniels Midland, Clinton, IA
Aceite de maíz	Mazola, ACH Food Co., Memphis, TN

¹ Anderson, 2009.

En el **cuadro 5** se encuentra la composición variable de nutrientes de coproductos de maíz. El almidón y el aceite de maíz se incluyeron en el estudio para que sirvieran como estándares de referencia para determinar la EM, sin embargo, no se incluyen en el análisis químico. Todos los valores se calcularon con base en MS. Las concentraciones de nutrientes estuvieron del 8.3 al 66.3%, del 0.5 al 100%, del 0.08 al 11.5%, del 2.6 al 53.6%, del 2.3 al 61.1%, del 0.5 al 25.4%, del 0.8 al 22.6%, del 0.3 al 3.5%, y del 0.5 al 14.1% para proteína cruda, almidón, fibra cruda, fibra dietética total (FDT), fibra neutrodetergente (FND), fibra ácidodetergente(FAD), celulosa, lignina y grasa cruda, respectivamente.

Como era de esperarse, el contenido de EM varió sustancialmente entre los coproductos de maíz (**Cuadro 6**). Los coproductos de fibra baja (almidón, aceite, solubles secos y maíz desgerminado y descascarillado) difirieron en EM de 4,080 a 8,755 kcal/kg de MS, respectivamente. Las siete muestras de DDGS difirieron en EM de 3,414 a 4,141 kcal/kg de MS, respectivamente. Los coproductos altos en proteína (harina de gluten de maíz y las tres fuentes de HP-DDG) tuvieron una EM de 3,676 a 4,606 kcal/kg de MS para el HP-DDG (ICM) y de HP-DDG (MOR), respectivamente. Las materias primas fibrosas restantes (dos fuentes de salvado y harina de germen, y una fuente de harina de gluten de maíz >20% de proteína) estuvieron de 2,334 a 3,692 kcal/kg de MS.

Se usó el análisis de regresión por pasos que usaba la composición química de los ingredientes alimenticios para desarrollar ecuaciones de predicción de la EM. La ecuación fue significativa ($P < 0.01$) y proporcionó un buen estimado ($r^2 = 0.95$) para calcular la EM real de los coproductos de maíz evaluados en este estudio. La energía bruta tuvo un efecto positivo sobre el cálculo de la EM mientras que la FDT y las cenizas tuvieron efectos negativos sobre la estimación del contenido de EM.



Cuadro 5. Composición de nutrientes de coproductos de maíz^{1,2}.

(CON BASE EN MS)	DDGS (WI)	DDGS (IA)	DDGS (Verasun)	RO-DDGS (Verasun)	DDGS (BPX)	DDGS (MNdm)	DDGS (MNmc)	Solubles secos	Harina de gluten de maíz >20% de proteín a
Densidad de masa, g/cm ³	0.581	0.470	0.487	0.494	0.467	0.530	0.396	0.330	0.499
Tamaño de partícula, micrones	1054	784	579	480	330	568	866	NP	571
Humedad	6.82	9.75	13.41	12.64	10.87	11.43	12.95	22.3	4.14
Digestibilidad MO	74.22	62.25	64.7	57.14	65.43	63.85	62.97	93.48	60.99
Energía bruta	5314	5375	5434	5076	5547	5550	5502	54.76	4539
Proteína cruda	29.62	29.65	31.94	34.74	29.49	32.69	34.12	23.75	24.29
Alanina	2.07	2.09	2.38	2.48	2.09	2.38	2.47	1.47	1.52
Arginina	1.33	1.46	1.49	1.44	1.37	1.47	1.55	1.20	1.13
Ácido aspártico	1.87	1.96	2.11	2.19	1.93	2.24	2.22	1.48	1.45
Cisteína	0.53	0.57	0.60	0.61	0.59	0.64	0.61	0.39	0.52
Ácido glutámico	4.41	4.50	5.20	5.43	4.70	5.11	5.33	2.79	3.70
Glicina	1.18	1.24	1.34	1.39	1.22	1.38	1.38	1.26	1.03
Histidina	0.77	0.83	0.90	0.89	0.82	0.90	0.94	0.60	0.72
Isoleucina	1.06	1.14	1.19	1.25	1.11	1.23	1.29	0.68	0.70
Leucina	3.47	3.45	3.90	4.12	3.37	3.88	4.08	1.58	2.03
Lisina	1.03	1.21	1.19	1.00	1.10	1.20	1.29	1.09	0.67
Metionina	0.56	0.58	0.65	0.64	0.54	0.64	0.65	0.32	0.30
Fenilalanina	1.29	1.61	1.48	1.51	1.31	1.48	1.55	0.53	0.77
Prolina	2.08	2.23	2.52	2.54	2.29	2.44	2.57	1.29	1.87
Serina	1.37	1.32	1.52	1.58	1.30	1.47	1.53	0.90	0.88
Treonina	1.11	1.10	1.22	1.26	1.09	1.25	1.26	0.81	0.78
Triptofano	0.21	0.19	0.20	0.18	0.21	0.23	0.23	0.21	0.13
Tirosina	1.04	1.17	1.19	1.22	1.05	1.16	1.22	0.62	0.65
Valina	1.49	1.57	1.69	1.76	1.53	1.73	1.80	1.08	1.11
Almidón	7.85	3.47	6.24	3.04	4.94	2.12	1.05	6.34	12.57
Fibra cruda	7.05	7.76	7.56	8.69	7.95	7.93	8.35	0.08	8.56
Fibra dietética total	30.34	38.14	35.69	37.20	35.90	35.38	43.18	16.07	40.07
FND	34.61	40.13	40.12	50.96	33.41	44.87	49.12	2.33	42.66
FAD	11.25	10.55	14.42	15.82	8.62	13.16	14.66	0.49	9.90
Celulosa	10.64	10.12	11.72	12.72	8.21	11.95	13.37	0.79	9.17
Lignina	1.21	1.06	3.16	3.49	1.00	1.72	1.92	0.31	1.05
Grasa cruda	11.45	10.89	10.16	3.15	11.71	12.10	11.98	11.81	2.70
Cenizas	4.16	4.43	4.46	5.16	5.41	4.55	4.04	14.08	6.81
Calcio (mg/kg)	204	248	475	652	663	240	230	1699	683
Cobre (mg/kg)	6	6	5	8	6	5	5	9	8
Hierro (mg/kg)	81	72	125	288	90	104	132	129	125
Magnesio (mg/kg)	3485	3023	3456	3986	3710	3736	3125	11389	5192
Manganeso (mg/kg)	21	13	16	23	15	20	18	40	34
Fósforo	7913	8582	7527	8373	9613	8377	7394	24356	11979

(mg/kg)									
Potasio (mg/kg)	11465	10974	10069	11232	13140	11758	10172	38597	19862
Selenio (mg/kg)	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD
Sodio (mg/kg)									
Azufre (mg/kg)	172	1287	2414	3776	2659	1361	1324	4259	364
Zinc (mg/kg)	8475	7940	7616	9772	11087	7288	6982	18069	4907
	63	55	59	67	89	82	75	95	120

¹ En el cuadro 1 se describe la identidad de las materias primas individuales. DLD = Debajo del Límite de Detección y NP = no pasaría. Todos los valores se basan en MS, excepto el tamaño de partícula y la densidad de masa que están con base en cómo es. Los valores con base en porcentaje, excepto que se especifique de otra manera.

² Anderson, 2009.

Cuadro 5 (continuación). Composición de nutrientes de coproductos de maíz^{1,2}.

(CON BASE EN MS)	DH-DG maíz	Germen de maíz deshidratado	Harina de germen de maíz	Salvado de maíz (ICM)	Salvado de maíz (Poet)	Harina de gluten de maíz	HP-DDG (MOR)	HP-DDG (Poet)	HP-DDG (ICM)
Densidad de masa, g/cm ³	0.687	0.435	0.465	0.158	0.346	0.677	0.636	0.576	0.604
Tamaño de partícula, micrones	477	1175	483	1841	2166	577	471	587	783
Humedad	12.78	9.44	10.87	12.62	9.18	8.51	8.3	5.95	12.31
Digestibilidad MO	93.15	75.54	56.98	32.32	73.32	79.95	61.46	71.54	54.36
Energía bruta	4397	5224	4767	4847	4982	5467	58.11	53.21	5464
Proteína cruda	8.28	17.54	23.64	10.94	15.17	66.30	57.45	43.83	39.98
Alanina	0.66	1.05	1.41	0.78	1.04	5.54	4.65	3.49	2.92
Arginina	0.28	1.31	1.67	0.65	0.77	2.38	2.26	1.63	1.68
Ácido aspártico	0.48	1.35	1.68	0.81	1.02	4.23	3.75	2.82	2.44
Cisteína	0.17	0.34	0.37	0.22	0.30	1.08	1.13	0.81	0.74
Ácido glutámico	1.74	2.47	3.22	1.67	1.95	13.51	10.88	7.88	6.84
Glicina	0.25	0.91	1.31	0.55	0.77	1.93	1.93	1.51	1.46
Histidina	0.22	0.51	0.72	0.31	0.44	1.41	1.36	1.17	1.07
Isoleucina	0.31	0.53	0.84	0.38	0.50	2.83	2.33	1.86	1.53
Leucina	1.25	1.27	1.91	1.10	1.30	10.67	8.57	6.37	5.12
Lisina	0.17	0.97	1.17	0.58	0.62	1.39	1.58	1.33	1.20
Metionina	0.16	0.28	0.42	0.18	0.23	1.41	1.44	0.94	0.81
Fenilalanina	0.45	0.66	1.02	0.50	0.55	4.14	3.13	2.37	1.96
Prolina	0.77	1.07	1.20	0.82	1.08	5.59	4.77	3.79	3.06
Serina	0.39	0.68	1.00	0.53	0.65	2.91	2.86	2.02	1.68
Treonina	0.26	0.57	0.88	0.50	0.61	2.12	2.14	1.61	1.33
Triptofano	0.06	0.17	0.20	0.06	0.09	0.24	0.29	0.14	0.19
Tirosina	0.25	0.53	0.71	0.37	0.41	3.16	2.61	1.77	1.46
Valina	0.38	0.86	1.37	0.56	0.76	3.18	2.88	2.32	2.02
Almidón	87.96	25.00	15.29	23.25	25.73	11.08	0.51	7.30	5.10
Fibra cruda	0.60	4.87	10.69	11.54	4.80	1.44	8.14	9.42	7.87
Fibra dietética total	2.61	24.78	47.76	53.60	26.65	9.24	28.80	31.28	36.75
FND	4.27	27.37	61.05	56.86	25.21	12.25	43.52	32.00	51.09
FAD	0.49	6.13	12.49	13.14	5.35	7.57	25.42	12.61	15.11
Celulosa	0.77	5.21	11.71	12.78	5.38	5.95	22.55	12.05	14.25
Lignina	0.33	1.28	1.22	0.89	0.55	2.24	3.40	0.95	1.44
Grasa cruda	0.17	18.45	2.38	5.14	9.68	1.34	4.12	2.86	6.97
Cenizas	0.49	6.46	2.70	2.33	5.31	3.99	1.10	2.05	2.09
Calcio (mg/kg)	13	159	359	164	314	6408	173	114	78
Cobre (mg/kg)	1	7	36	5	5	18	6	4	4
Hierro (mg/kg)	15	90	122	54	98	242	102	53	61

Magnesio (mg/kg)	268	5626	1905	1675	3277	1039	456	1110	936
Manganeso (mg/kg)	1	22	11	15	17	25	17	6	5
Fósforo (mg/kg)	879	15187	6496	4379	7578	6318	2486	4185	5029
Potasio (mg/kg)	1449	16593	4093	6464	13682	4596	1700	4389	3028
Selenio (mg/kg)	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD
Sodio (mg/kg)	115	83	839	63	4270	1029	231	1260	563
Azufre (mg/kg)	1048	2141	3274	1460	9506	9051	7178	9034	7002
Zinc (mg/kg)	5	85	77	39	195	42	71	28	37

¹ La identidad de las materias primas individuales está descrita en el Cuadro 1. DLD = Debajo del límite de detección
 Todos los valores se basan en MS, excepto el tamaño de partícula y la densidad de masa que están con base en cómo es. Los valores con base en porcentaje, excepto que se especifique de otra manera.

² Anderson, 2009.

Cuadro 6. Valores de energía digestible y metabolizable de los coproductos de maíz en cerdos en finalización¹.

Coproducto de maíz	Energía, kcal/kg	
	ED ³	EM ³
Harina de gluten de maíz >20% de proteína	2517	2334
Salvado (ICM)	3004	2957
Salvado (Poet)	3282	3031
DDGS (ACE)	4332	4141
DDGS (MNdrum)	4116	3876
DDGS (MNmicro)	4016	3713
DDGS (Hawk)	3841	3659
DDGS (Poet)	3705	3414
DDGS (VS)	4164	3937
RO-DDGS (VS)	3868	3650
Harina de gluten	5047	4598
HP-DDG (ICM)	3994	3676
HP-DDG (MOR)	4955	4606
HP-DDG (Poet)	4210	3823
DCG (Poet)	3889	3692
Harina de germen	3521	3417
Solubles (20%)	4762	4525
DH-DG maíz	4401	4316
Almidón	4082	4080
Aceite (10%)	8988	8755
Promedio	4250	4028
Desv. Est.	362.5	413.0

Se utilizó el análisis de regresión por pasos que usaba la composición química de los ingredientes de alimentos para desarrollar las ecuaciones de predicción de la EM (**Cuadro 7**). La ecuación fue significativa ($P < 0.01$) y proporcionó un buen estimado ($r^2 = 0.95$) para calcular la EM real de los coproductos de maíz evaluados en este estudio. La energía bruta tuvo un efecto positivo sobre el cálculo de la EM mientras que la FDT y las cenizas tuvieron efectos negativos sobre la estimación del contenido de EM.

Cuadro 7. Ecuación para predecir la EM a partir del análisis químico de los coproductos de maíz en cerdos en finalización.

Ecuación ¹	R ²	SE	Valor P
EM = 0.949 × EB – 32.238 × FDT – 40.175 × Cenizas	0.95	306	<0.01

¹ EM = kcal/kg MS; EB = kcal/kg MS; FDT = %; Cenizas = %.

Ganado lechero

Kelzer et al. (2007) realizaron un estudio para determinar las fracciones de proteína y evaluar las diferencias en la proteína no degradable en el rumen (PNDR), la digestibilidad de la PNDR (dPNDR) y las concentraciones de aminoácidos en el germen de maíz, salvado de maíz, HP-DDGS, dos fuentes de DDG, harina de gluten de maíz húmeda y granos de destilería húmedos. En el **Cuadro 8** se encuentra una comparación de las concentraciones de nutrientes de estos coproductos de maíz. Las concentraciones de PNDR, dPNDR, lisina y metionina fueron diferentes entre las diferentes fuentes de coproductos de la molienda.

Cuadro 8. Comparación de las concentraciones de fracciones de proteína como % de la proteína cruda entre siete coproductos de maíz¹.

Fracción de la proteína, % PC	Germen de maíz	Salvado de maíz	DDGS altos en proteína	DDGS 1	DDGS 2	Harina de gluten de maíz húmeda	Granos de destilería húmedos
Proteína cruda, % MS	16.3	13.5	47.2	30.1	28.9	26.7	29.9
Nitrógeno no proteico	30.0	33.5	7.4	17.0	17.9	36.6	18.6
Proteína verdadera rápidamente degradable	15.0	4.0	0.6	7.0	2.1	15.9	2.4
Proteína verdadera moderadamente degradable	38.1	54.3	82.4	67.0	41.0	33.2	53.1
Proteína verdadera lentamente degradable	13.5	6.0	8.8	4.8	11.1	10.1	11.0
Proteína no degradada	3.4	2.2	0.8	4.2	27.9	4.1	14.9
Proteína no degradada en el rumen	16.5	20.7	55.2	33.2	56.3	11.5	44.7
Digestibilidad de PNDR	66.8	65.8	97.7	92.0	91.9	51.0	93.1
Lisina	2.9	3.2	2.0	1.9	1.9	3.5	1.9
Metionina	1.9	1.4	3.2	2.0	2.4	1.6	2.3

¹ Kelzer et al., 2007.

Ganado de engorda

Bremer et al. (2006) evaluaron un coproducto de maíz bajo en proteína (Dakota Bran Cake – DBRAN) sobre el desempeño del ganado de engorda estabulado y las características de la

canal del ganado de finalización. Los resultados de este estudio muestran que la alimentación DBRAN hasta el 45% de la dieta mejora el desempeño del crecimiento sin efectos sobre las características de la canal y tiene aproximadamente de 100 a 108% del valor energético del maíz.

Valor alimenticio de nuevos coproductos de maíz fraccionados en ganado y aves

Debido a que aún no se han implementado ni se han evaluado la mayoría de las nuevas tecnologías de fraccionamiento, hay cantidades limitadas de coproductos de maíz fraccionados que se producen y que están comercialmente disponibles. Como resultado, hay datos publicados limitados sobre la eficiencia y calidad de estos coproductos de maíz fraccionados en los alimentos para ganado y avicultura. Hasta que haya dichos datos, va a ser difícil determinar su valor alimenticio comparativo, las tasas de inclusión en la dieta y los valores comparativos nutricionales y económicos.

El **Cuadro 9** muestra un resumen de las tasas máximas de inclusión en la dieta de algunos coproductos de maíz fraccionados con base en los resultados de unas cuantas pruebas de alimentación animal diseñadas para determinar la respuesta de crecimiento animal y de la producción de leche.

Cuadro 9. Tasa máxima de inclusión en la dieta de coproductos de maíz seleccionados para varias especies con base en las pruebas de desempeño animal.

	Ganado lechero	Ganado de engorda	Cerdos	Aves
HP-DDG	ND	ND	20%-30%	ND
DDG sin aceite	ND	ND	ND	ND
Salvado de maíz	25%	45%	ND	ND
Germen de maíz	14%	ND	10%	ND

ND = no disponible.

Aves

No se han realizado pruebas de desempeño para evaluar los efectos de la alimentación de salvado de maíz, germen de maíz, HP-DDGS y DDGS sin aceite sobre el desempeño del crecimiento de pollos de engorda y pavos, así como la producción de huevo de gallinas ponedoras. Sin esta información, damos por sentado que no hay cambios en el desempeño de las aves cuando se calculan las tasas de desplazamiento de estos ingredientes.

Cerdos

Un estudio (Widmer et al., 2008) evaluó los efectos de la alimentación de DDGS (10 o 20% de la dieta), HP DDG (que sustituyó 50 o 100% de la harina de soya) y germen de maíz (5 o 10% de la dieta) en cerdos en crecimiento - finalización sobre el desempeño del crecimiento, la calidad de la canal y la palatabilidad de la carne de cerdo. Los resultados de este estudio muestran a la alimentación de dietas que contienen 20% de DDGS o tasas altas de inclusión en la dieta de HP-DDG no presentaron efectos negativos sobre el desempeño del crecimiento, composición de la canal, calidad del músculo y características de consumo del tocino y chuletas de cerdo, pero puede disminuir la calidad de la grasa de cerdo. De la misma forma, la

alimentación de dietas que contienen hasta 10% de germen de maíz no tuvieron efectos negativos sobre el desempeño del crecimiento, la composición de la canal, la calidad de la canal o las características de consumo del tocino y lomo de cerdo, pero aumentó el peso corporal final y mejoró la calidad de la grasa del tocino (valor de yodo reducido). De la misma forma que los resultados preliminares de alimentar algunos de los coproductos de maíz fraccionado a ganado lechero y de engorda, parece que no hay efectos negativos y efectos potencialmente positivos de alimentar dietas que contienen HP-DDGS y germen de maíz en cerdos en crecimiento y finalización, y que los DDGS sin aceite en estos coproductos puede mejorar la calidad de la carne de cerdo.

Ganado lechero

Hasta la fecha, el germen de maíz y el salvado de maíz son los únicos coproductos fraccionados que se han evaluado en pruebas de desempeño. La adición de 14% de germen de maíz a la porción de concentrado en una dieta con una proporción de forraje a concentrado de 55:45 para vacas lecheras lactantes va a aumentar la leche y el rendimiento de la grasa láctea, pero a 21%, va a disminuir la concentración de ésta (Abdelqader et al., 2006). Janicek et al. (2007) mostraron que cuando se aumenta el salvado de maíz de 10 a 25% de la dieta, no hubo efectos sobre el consumo de materia seca ni el rendimiento de grasa láctea, pero aumentó el rendimiento de leche, el rendimiento de proteína láctea y la conversión alimenticia. La disminución en la concentración de grasa láctea con los niveles crecientes de salvado de maíz, junto con el aumento en el rendimiento total de leche resultó en que no hubiera diferencias entre los tratamientos de la dieta en la leche corregida al 3.5% de grasa. Con base en los resultados de estos dos estudios, damos por sentado de forma conservadora en nuestro cálculo de las tasas de desplazamiento de todos los coproductos (y que incluyen el germen y al salvado de maíz) que el rendimiento de leche y la eficiencia alimenticia no se ven afectados aunque los resultados preliminares de estos dos estudios indican un mejor desempeño.

Ganado de engorda

Actualmente, sólo se ha evaluado el salvado de maíz en un estudio de desempeño de ganado de engorda estabulado y de la canal. Bremer et al. (2006) evaluaron Dakota Bran Cake (DBRAN) sobre el desempeño de ganado de engorda estabulado y las características de la canal en la finalización, en cuyo estudio observaron que la alimentación de esta materia prima hasta el 45% de la dieta mejora el desempeño del crecimiento sin efectos sobre las características de la canal. Aunque, este estudio mostró una mejora en el desempeño del crecimiento del ganado, es el único que se ha realizado y hemos decidido suponer de forma conservadora que no hay cambios en el desempeño del crecimiento cuando se calculan las tasas de desplazamiento de los coproductos de maíz fraccionados alimentados al ganado de engorda estabulado.

Conclusiones

Durante muchos años se ha usado el fraccionamiento del maíz para producir productos de grado alimenticio e industriales especializados. Muy pocas plantas de etanol utilizan tecnologías de fraccionamiento "inicial" para separar el endospermo (fracción rica en almidón) de las fracciones no fermentables, que incluyen el germen y el salvado. En contraste, la mitad de la industria del etanol está usando la extracción de aceite "final" para capturar parte del aceite de maíz del coproducto que resulta en un contenido alto de proteína y fibra, pero más bajo en aceite de los coproductos resultantes. Se han publicado pocos estudios científicos que evalúan los coproductos de maíz fraccionados y reducidos en aceite en alimentos para ganadería y avicultura, pero aquí se han resumido los estudios que hasta la fecha se han publicado. Hasta que se realicen más investigaciones para evaluar el valor alimenticio de estos coproductos, es difícil determinar su valor alimenticio comparativo, las tasas de inclusión de la dieta y el valor nutricional y económico comparativo de estos coproductos. No obstante, todos los nuevos coproductos fraccionados que se han producido tienen algo de valor nutritivo y aplicaciones en la alimentación en alimentos para animales.

Bibliografía

- Abdelqader, M., A.R. Hippen, D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur, K. Karges, and M.L. Gibson. 2006. Corn germ from ethanol production as an energy supplement for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89(Suppl. 1):156.
- Abe, C., N.J. Nagle, C. Parsons, J. Brannon, and S.L. Noll. 2004. High protein corn distiller grains as a feed ingredient. *J. Anim. Sci.* 82(Suppl. 1):264.
- Anderson, P.V., B. J. Kerr, T. E. Weber, C. Z. Ziemer, and G. C. Shurson. 2012. Determination and prediction of energy from chemical analysis of corn co-products fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242-1254.
- Anderson, P.V. 2009. Energy determination of corn co-products in finishing pigs and the use of an *in vitro* organic matter digestibility assay to predict *in vivo* energy. Iowa State University.
- Balan, V, C.A. Rogers, S.P.S. Chundawat, L. da C. Sousa, P.J. Slininger, R. Gupta, and B.E. Dale. 2009. Conversion of Extracted Oil Cake Fibers into Bioethanol Including DDGS, Canola, Sunflower, Sesame, Soy, and Peanut for Integrated Biodiesel Processing. *J. American Oil Chemists' Society.* 86(2):157-165.
- Batal, A. 2007. Nutrient digestibility of high protein corn distillers dried grains with solubles, dehydrated corn germ and bran. 2007 ADSA/ASAS/AMPA/PSA Joint Ann. Mtg., San Antonio, TX. July 8-12. Abstract M206.
- Berger, L. and V. Singh. 2009. Changes and evolution of corn based co-products for beef cattle. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 116.
- Brehmer, B., B. Bals, J. Sanders, and B. Dale. 2008. Improving the corn-ethanol industry: Studying protein separation techniques to obtain higher value-added product options for distiller' grains. *Biotechnol Bioeng.* 101(1):49-61.
- Bremer, V.R., G.E. Erickson, T.J. Klopfenstein, M.L. Gibson, K.J. Vander Pol, and M.A. Greenquist. 2006. Evaluation of a low protein distiller's by-product for finishing cattle. *Nebraska Beef Report.* Pp. 57-58.
- California Environmental Protection Agency. 2012. California-Modified GREET Pathway for the Production of Biodiesel from Corn Oil at Dry Mill Ethanol Plants. Stationary Source Division, Release Date: November 3, 2011, Version 2.0. 40 pp.
- Corredor, D.Y., S.R. Bean, T. Schober, and D. Wang. 2006. Effect of decorticating sorghum on ethanol production and composition of DDGS. *Cereal Chem* 83(1):17-21

- Depenbusch, B.E., E.R. Loe, M.J. Quinn, M.E. Corrigan, M.L. Gibson, K.K. Karges, and J.S. Drouillard. 2008. Corn distiller's grain with solubles derived from a traditional or partial fractionation process: growth performance and carcass characteristics of finishing feedlot heifer. *J. Anim. Sci.* 1910. doi: 10.2527/jas.2007-0501.
- Dien, B.S., E.A. Ximenes, P.J. O'Bryan, M. Moniruzzaman, X-L.Li, V. Balan, B. Dale, and M.A. Cotta. 2008. Enzyme characterization for hydrolysis of AFEX and liquid hot-water pretreated distillers' grains and their conversion to ethanol. *Bioresource Technol.* 99(12):5216-5225.
- Ezeji, T., and H.P. Blaschek. 2008. Fermentation of dried distillers' grains and solubles (DDGS) hydrolysates to solvents and value-added products by solventogenic clostridia. *Bioresource Technol.* 99(12):5232-5242.
- Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, and H.H. Stein, 2009a. Net energy of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains fed to growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87(Suppl. 2): in press.
- Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, B.G. Kim, and H.H. Stein. 2009b. Effects of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains on growth performance and organ weights of growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87 (Suppl. 3): In press
- Haas, M.J., K.M. Scott, T.A. Foglia, and W.N. Marmer. 2007. The general applicability of in situ transesterification for the production of fatty acid esters from a variety of feedstocks. *J. American Oil Chemists' Society.* 84(10):963-970.
- Helembai J., J. Hausenblas, and M. Mezes. 2006. Ethanol industry by-products in pig nutrition. *Takarmanyozas-Hungary.* v. 9(2):24-26.
- Hoskins, B., and M. Lyons. 2009. Improving bioethanol yield: the use of solid-state fermentation products grown on DDGS. *J. Institute of Brewing.* 115:1, 64-70.
- Janicek, B.N., P.J. Kononoff, A.M. Gehman, K. Karges, and M.L. Gibson. 2007. Effect of increasing levels of corn bran on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 90:4313-4316.
- Kelzer, J.M., P.J. Kononoff, K. Karges, and M.L. Gibson. 2007. Evaluation of protein fractionation and ruminal and intestinal digestibility of corn milling co-products. *Dakota Gold Research Association.* <http://www.dakotagold.org/research/dairy.asp> descargado el 25 de junio de 2008.
- Kim, E.J., C. Martinez Amezcua, P.L. Utterback, and C.M. Parsons. 2008. Phosphorus bioavailability, true metabolizable energy, and amino acid digestibilities of high protein corn distillers dried grains and dehydrated corn germ. *Poult. Sci.* 87:700-705.
- Kim, Y., R. Hendrickson, N.S. Mosier, M.R. Ladisch, B. Bals, V. Balan, B.E. Dale. 2008a. Enzyme hydrolysis and ethanol fermentation of liquid hot water and AFEX pretreated distillers' grains at high-solids loadings. *Bioresource Technol.* 99(12): 5206-5215.
- Kim, Y., N. Mosier, and M.R. Ladisch. 2008b. Process simulation of modified dry grind ethanol plant with recycle of pretreated and enzymatically hydrolyzed distillers' grains. *Bioresource Technol.* 99(12):5177-5192.
- Lau, M.W., B.E. Dale, V. Balan. 2008. Ethanolic fermentation of hydrolysates from ammonia fiber expansion (AFEX) treated corn stover and distillers grain without detoxification and external nutrient supplementation. *Biotechnol Bioeng.* 99(3):529-539.
- Mjoun, K., K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D. J. Schingoethe. 2009a. Lactation performance and amino acid utilization of early lactating cows fed regular or de-oiled dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 559.
- Mjoun, K., K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D. J. Schingoethe. 2009b. In situ ruminal degradability and intestinal digestibility of protein in soybean and dried distillers grains with solubles products. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 84.
- Murthy, G.S., V. Singh, D.B. Johnston, K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2006. Improvement in fermentation characteristics of degermed ground corn by lipid supplementation. *J. Ind Microbiol Biot.* 33(8):655-660.

- Oshel, R.E., M.V. Nandakumar, S. Uргаonkar, D.G. Hendricker, and J.G. Verkade. 2008. Water solubilization of DDGS via derivatization with phosphite esters. *Bioresource Technol.* 99(12):5193-5205.
- Perkis, D., W. Tyner, and R. Dale. 2008. Economic analysis of a modified dry grind ethanol process with recycle of pretreated and enzymatically hydrolyzed distillers' grains. *Bioresource Technol.* 99(12):5243-5249.
- Rochelle, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier. 2011. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. *Poul. Sci.* 90:1999-2007.
- Singh, V., C.J. Batie, G.W. Aux, K.D. Rausch, and C. Miller. 2006. Dry-grind processing of corn with endogenous liquefaction enzymes. *Cereal Chem.* 83(4):317-320.
- Singh, V., D.B. Johnston, K. Naidu, K.D. Rausch, R.L. Belyea, and M.E. Tumbleson. 2005. Comparison of modified dry-grind corn processes for fermentation characteristics and DDGS composition. *Cereal Chem.* 82(2):187-190.
- Srinivasan, R., F. To, and E. Columbus. 2009. Pilot scale fiber separation from distillers dried grains with solubles (DDGS) using sieving and air classification. *Bioresource Technol.* 100(14):3548-55.
- Srinivasan, R., M.P. Yadav, R.L. Belyea, K.D. Rausch, L.E. Pruiett, D.B. Johnston, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2008a. Fiber separation from distillers dried grains with solubles using a larger elutriation apparatus and use of fiber as a feedstock for corn fiber gum production. *Biol. Eng.* 1:1, 39-49.
- Srinivasan, R., R.A. Moreau, C. Parsons, J.D. Lane, and V. Singh. 2008b. Separation of fiber from distillers dried grains (DDG) using sieving and elutriation. *Biomass Bioenerg.* 32(5):468-472.
- Srinivasan, R., and V. Singh. Removal of fiber from grain products including distillers dried grains with solubles. United States Patent Application Publication. US 0040024 A1; 2006.
- Srinivasan, R., R.A. Moreau, K.D. Rausch, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2007a. Phytosterol distribution in fractions obtained from processing of distillers dried grains with solubles using sieving and elutriation. *Cereal Chem.* 84(6):626-630.
- Srinivasan, R., B.S. Dien, K.D. Rausch, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2007b. Fiber separated from distillers dried grains with solubles as a feedstock for ethanol production. *Cereal Chem.* 84(6):563-566.
- Srinivasan, R., R.A. Moreau, K.D. Rausch, R.L. Belyea, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2005. Separation of fiber from distillers dried grains with solubles (DDGS) using sieving and elutriation. *Cereal Chem.* 82(5):528-533.
- Stein, H.H., M.L. Gibson, M.G. Boersma, and C. Pedersen. 2005. Digestibility of CP, AA, and energy in a novel yeast product by pigs. *J. Anim. Sci.* 83(Suppl. 1):35.
- Wang, H., T. Wang, L.A. Johnson, and A.L. III. Pometto. 2008. Effect of the corn breaking method on oil distribution between stillage phases of dry-grind corn ethanol production. *J. Agr. Food Chem.* 56(21):9975-9980.
- Wang, L., C.L. Weller, V.L. Schlegel, T.P. Carr, and S.L. Cuppett. 2008b. Supercritical CO2 extraction of lipids from grain sorghum dried distillers grains with solubles. *Bioresource Technol.* 99(5):1373-1382.
- Wang, L., C.L. Weller, V.L. Schlegel, T.P. Carr, and S.L. Cuppett. 2007. Comparison of supercritical CO2 and hexane extraction of lipids from sorghum distillers grains. *Eur. J. Lipid Sci. Tech.* 109(6):567-574.
- Wang, P., D.B. Johnston, K.D. Rausch, S.J. Schmidt, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2009. Effects of Protease and Urea on a Granular Starch Hydrolyzing Process for Corn Ethanol Production. *Cereal Chem.* 86(3): 319-322.

- Wang, P., V. Singh, H. Xue, D.B. Johnston, K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2007. Comparison of raw starch hydrolyzing enzyme with conventional liquefaction and saccharification enzymes in dry-grind corn processing. *Cereal Chem.* 84(1):10-14.
- Wang, P., V. Singh, L. Xu, D.B. Johnston, K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2005. Comparison of enzymatic (E-Mill) and conventional dry-grind corn processes using a granular starch hydrolyzing enzyme. *Cereal Chem.* 82(6):734-738.
- Widmer, M.R., L.M. McGinnis, and H.H. Stein. 2007. Energy, phosphorus, and amino acid digestibility of high-protein distillers dried grains and corn germ fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:2994-3003.
- Widmer, L.M. McGinnis, D.M. Wulf, and H.H. Stein. 2008. Effects of feeding distillers dried grains with solubles, high protein distillers dried grains, and corn germ to growing-finishing pigs on pig performance, carcass quality, and the palatability of pork. *J. Anim. Sci.* 86:1819-1831.
- Xu, W., N. Reddy, and Y. Yang. 2007. An acidic method of zein extraction from DDGS. *J. Agr. Food Chem.* 55(15):6279-6284.