

# Capítulo 7

## Características físicas y químicas relacionadas con el manejo y el almacenamiento de los DDGS

---

### Introducción

Las propiedades físicas y químicas de los DDGS varían entre fuentes y pueden tener influencia sobre su valor alimenticio y las características de manejo y almacenamiento. Entre estas características se incluye el color, olor, tamaño de partícula, densidad de masa, pH, propiedades térmicas, capacidad de flujo, estabilidad en la vida de anaquel e higroscopicidad. Los granos secos de destilería con soluble se caracterizan por ser un material granulado heterogéneo que consiste de una amplia gama de tipos, tamaños y formas de partículas. Entre las partículas se incluyen fragmentos de maíz (por ejemplo, la punta y tejidos del pericarpio), proteína soluble cristalizada no uniformemente y recubrimientos de lípidos en la superficie de estos fragmentos, y aglomerados (por ejemplo, “bolas de mieles”) que se forman durante el proceso de secado (Rosentrater, 2012). Estas características afectan el manejo y la capacidad de flujo y el comportamiento del almacenamiento de los DDGS.

Las propiedades físicas de los DDGS varían entre y dentro de las plantas de etanol; gran parte de esta variación está causada por varios factores (Rosentrater, 2012) entre los que se incluyen:

- Características de la materia prima (maíz)
- Configuración del molino de martillos
- Condiciones, aditivos y químicos usados durante el procesamiento
- Proporción de los solubles de destilería condensados añadidos a los granos de destilería húmedos antes del secado
- Tipo de secador utilizado
- Tiempo y temperaturas de secado
- Enfriamiento y acondicionamiento de los DDGS después del secado
  - Almacenamiento plano vs. almacenamiento en silo vertical
  - Contenido de humedad final
  - Tiempo de enfriamiento antes del embarque
  - Carga en los vehículos de transporte y contenedores cuando están calientes
  - Temperatura y humedad del ambiente

Durante los últimos años se han realizado considerables investigaciones para medir las diversas propiedades físicas particularmente enfocadas a la capacidad de flujo de los DDGS (Rosentrater, 2006a; Ganesan et al., 2008a,b). En 2004, Rosentrater (2006a) recolectó muestras de DDGS de 6 plantas de etanol de molienda en seco en el este de Dakota del Sur para determinar la humedad, actividad acuosa, la conductividad térmica, resistividad térmica, difusividad térmica, densidad de masa, ángulo de deslizamiento y mediciones de color mediante el Hunter L\*, a\* y b\*, cuyos resultados se muestran en el **cuadro 1**.

**Cuadro 1. Promedio e intervalo de propiedades físicas de 144 muestras de DDGS de 6 plantas de etanol de molienda en seco<sup>1</sup>**

Propiedad física	Mínimo	Máximo	Promedio
Contenido de humedad, %	13.4	21.2	14.7
Actividad acuosa, -	0.53	0.63	0.55
Conductividad térmica, W/m°C	0.06	0.08	0.07
Resistividad térmica, m°C/W	13.1	15.6	14.0
Difusividad térmica, mm <sup>2</sup> /s	0.13	0.15	0.13
Densidad de masa, kg/m <sup>3</sup>	389.3	501.5	483.3
Ángulo de deslizamiento, °	26.5	34.2	31.5
Color, Hunter L*	40.0	49.8	43.1
Color, Hunter a*	8.0	9.8	8.7
Color, Hunter b*	18.2	23.5	19.4

<sup>1</sup> Rosentrater, 2006.

En general, fue baja la variabilidad (desviaciones estándar) entre muestras dentro de la medición, excepto la densidad de masa. El contenido de humedad promedió 14.7% en estas muestras, lo cual está por arriba del 12% de contenido máximo de humedad recomendado para ingredientes de alimentos balanceados para minimizar los costos de transporte y descomposición microbiológica (Rosentrater, 2006a). La actividad acuosa es la medida de la cantidad de agua “libre” disponible y de la susceptibilidad de las muestras a la descomposición y deterioro por microorganismos y agentes químicos. La conductividad, resistividad y difusividad térmicas describen la capacidad de un material de conducir, resistir o difundir el calor, respectivamente. Las fuentes de DDGS tienen valor de conductividad térmica que van de 0.06 a 0.08 W/(m°C) y valores de difusividad térmica que van de 0.13 a 0.15 mm<sup>2</sup>/s (Rosentrater, 2012). La densidad de masa es un factor importante al determinar el volumen de almacenamiento de los vehículos de transporte, barcos, contenedores, tambores y sacos. La densidad de masa afecta los costos de transporte y de almacenamiento. Los ingredientes con una densidad de masa baja tienen un mayor costo por unidad de peso. También afecta la cantidad de segregación del ingrediente que pueda haber durante el manejo de alimentos completos. Las partículas de densidad de masa mayor se van al fondo de la carga durante el transporte mientras que las de densidad menor suben a la parte superior de la carga. El ángulo de deslizamiento es una medida de la capacidad de flujo de una sustancia y el color L\* es la claridad o oscuridad del color, a\* es lo rojo o verde del color y b\* es lo amarillo o azul del color.

## Color

El color de los DDGS de maíz puede variar de ser un amarillo dorado y claro a un café muy oscuro. En el **Capítulo 8** se puede encontrar un resumen detallado de la relación del color de los DDGS con la calidad y el valor nutritivo. El color se mide en el laboratorio mediante un colorímetro Hunter Lab o uno Minolta, los cuales se usan ampliamente en las industrias de alimentos para consumo humano y animal para medir el alcance del daño térmico (encafecimiento) en alimentos procesados térmicamente (Ferrer et al., 2005) e ingredientes de alimentos balanceados (Cromwell et al., 1993). Estos colorímetros se usan ahora de forma muy común para medir las características de color de las fuentes de DDGS en la industria de etanol de EUA. La claridad o la oscuridad del color se determina mediante la lectura de L\* (0 =

oscuro, 100 = claro), las mediciones de lectura de  $a^*$  miden lo rojo y la  $b^*$  lo amarillo del color de los DDGS. Bhadra et al. (2007) informaron que  $L^*$  va del 36.6 a 50.2,  $a^*$  del 5.2 al 10.8, y  $b^*$  del 12.5 al 23.4 entre las fuentes de DDGS.

Hay varios factores que afectan el color de los DDGS, como lo es la cantidad de solubles añadidos a los granos antes del secado, del tipo de secador y la temperatura de secado utilizada, así como el color natural del grano de la materia prima que se usa. El color de los granos de maíz puede variar entre las diferentes variedades, lo cual influye sobre el color final de los DDGS. Las mezclas de maíz y sorgo de DDGS también son más oscuras en color que las de maíz, debido al color bronce de muchas de las variedades de sorgo.

Cuando se añade en una proporción relativamente alta de solubles a la masa (fracción de granos) para hacer DDGS, se oscurece el color. Noll et al. (2006) llevaron a cabo un estudio en el que evaluaron el color en lotes de DDGS en los que se añadía aproximadamente 0, 30, 60 y 100% del máximo posible de mieles a la masa antes del secado. Las tasas reales de adición de solubles a la masa fueron de 0, 45.4, 94.6 y 158.9 l/minuto (0, 12, 25 y 42 galones/minuto). Como se muestra en el **cuadro 2**, el aumento en la adición de solubles a la masa resultó en una disminución en L\* (claridad del color) y b\* (amarillo del color), con un aumento en a\* (rojo del color). Ganesan et al. (2005) informaron de resultados similares.

**Cuadro 2. Efecto de la tasa de adición de solubles a la masa sobre las características del color de los DDGS**

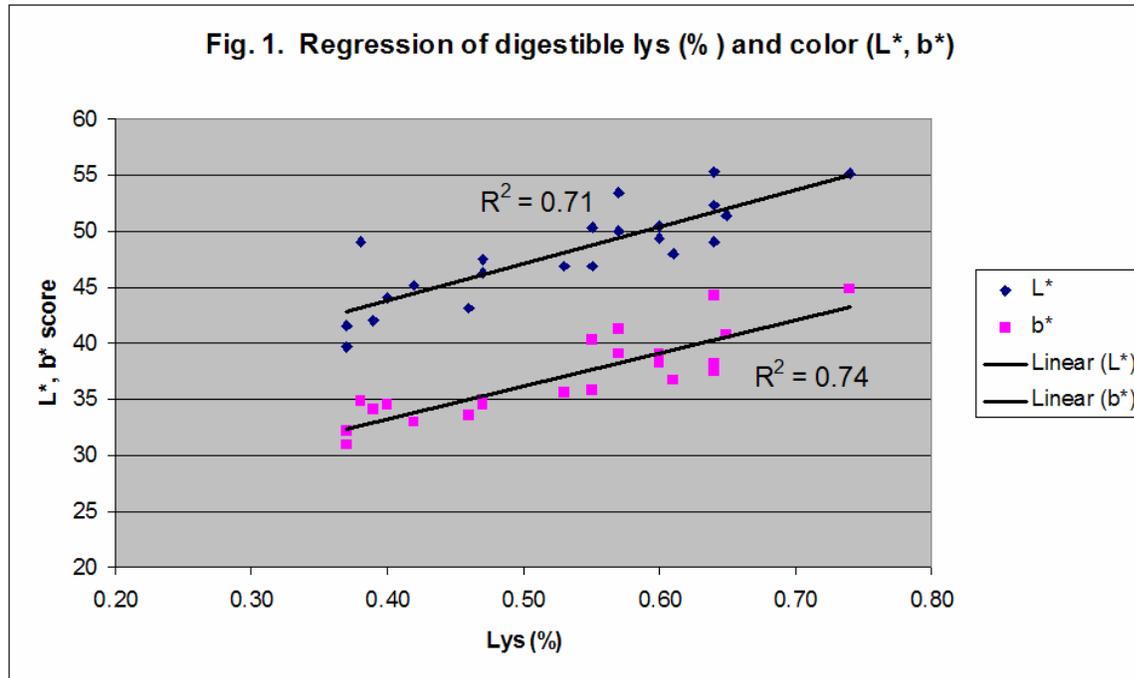
Color (escala CIE)	0 gal/min	12 gal/min	25 gal/min	42 gal/min	Correlación de Pearson	Valor P
L*	59.4	56.8	52.5	46.1	- 0.98	0.0001
a*	8.0	8.4	9.3	8.8	0.62	0.03
b*	43.3	42.1	40.4	35.6	- 0.92	0.0001

Adaptado de Noll et al. (2006).

Las temperaturas del secador en las plantas de etanol de molienda en seco pueden ir de 127 a 621° C. El tiempo que pasan los DDGS en el secador también influye sobre el color. En general, mientras mayor sea la temperatura del secador y más tiempo permanezcan los DDGS en él, más oscuro será el color. La cantidad y duración del calentamiento están altamente correlacionada al color y a la digestibilidad de lisina, y debido a la amplia gama en las temperaturas del secador, hay una gran variedad en la digestibilidad de lisina entre las fuentes de DDGS.

Cuando se aplica calor a los ingredientes de alimentos balanceados, se produce una reacción de encafecimiento o de Maillard, que resulta en la formación de compuestos poliméricos de alto peso molecular conocidos como melanoidinas. El grado de encafecimiento (medido a través de la absorbancia a 420 nm) se usa para evaluar el grado de la reacción de Maillard en los alimentos. La digestibilidad de la lisina es afectada por el grado de la reacción de Maillard. La claridad y el color amarillo de los DDGS han mostrado ser predictores razonables generales del contenido de lisina digestible entre las fuentes de DDGS de maíz para aves (**figura 1**; Ergul et al., 2003) y cerdos (Cromwell et al., 1993; Pederson et al., 2005). Sin embargo, entre las fuentes de DDGS de maíz, Ergul et al., (2003) mostraron que los coeficientes de digestibilidad verdadera de la lisina iban del 59% al 83 % para aves y Stein et al. (2005) mostraron un intervalo similar de los coeficientes de digestibilidad verdadera de lisina para cerdos (44 - 63%). En un estudio más robusto, Urriola (2007) evaluó la relación entre L\* de las fuentes de DDGS y el contenido de lisina digestible en cerdos y encontró que está relación era muy baja para las

muestras con un  $L^*$  mayor a 50, y una relación mejorada, pero aún mala, para las muestras de DDGS con un  $L^*$  menor a 50. Cromwell et al. (1993) evaluaron la relación entre los valores de color de Hunter Lab de varias fuentes de DDGS y el nitrógeno insoluble ácidodetergente sobre el desempeño del crecimiento de cerdos (**cuadro 3**).



**Cuadro 3. Efecto del nitrógeno insoluble ácidodetergente (NIAD) y la calificación de color sobre el desempeño del crecimiento de cerdos alimentados con tres fuentes mezcladas de DDGS<sup>1</sup>**

Fuente de DDGS	$L^{*b}$	$a^{*b}$	$b^{*b}$	NIAD, %	GDP, g <sup>a</sup>	CDPA, g <sup>a</sup>	A/G <sup>a</sup>
A	29.0	6.5	12.7	27.1	218	1,103	5.05
E	31.1	6.1	13.1	36.9			
G	38.8	6.8	16.5	16.0	291	1,312	4.52
I	41.8	6.5	18.8	26.4			
B	53.2	4.7	21.8	8.8	390	1,416	3.61
D	51.7	7.1	24.1	12.0			

<sup>1</sup>Cromwell et al., 1993.

<sup>a</sup> Diferencias significativas entre dietas ( $P < 0.01$ )

<sup>b</sup>  $L$  = claridad del color (0 = negro, 100 = blanco). Mientras mayores sean los valores  $a^*$  y  $b^*$ , mayor el grado de rojo y amarillo, respectivamente.

Algunas plantas de etanol de molienda en seco utilizan modificaciones del proceso para producir etanol y DDGS. Por ejemplo, algunas plantas utilizan cocedores para añadir calor a la fermentación y como resultado, usan menos enzimas, mientras que otras usan más enzimas y no se basan en el uso de cocedores para facilitar la fermentación. Teóricamente, el uso de menos calor podría mejorar la digestibilidad de los aminoácidos de los DDGS, pero no se han llevado a cabo estudios que determinen el impacto de estos procesos sobre la composición final de nutrientes y su digestibilidad.

## Olor

Los DDGS dorados de alta calidad tienen un olor dulce fermentado. Las fuentes de DDGS de color oscuro que se han sobrecalentado tienen un olor a quemado o ahumado.

## Tamaño de partícula y pH

El tamaño y uniformidad de las partículas de los ingredientes de alimentos son consideraciones importantes para el nutriólogo o nutricionista de ganado y aves al seleccionar fuentes y determinar la necesidad de mayor procesamiento en la fabricación de alimentos completos o de suplementos de alimentos. El tamaño de partícula afecta la digestibilidad de nutrientes, eficiencia de mezclado, cantidad de segregación de ingredientes durante el transporte y el manejo, calidad del pélet, densidad de masa, palatabilidad, clasificación de las harinas o dietas en harina y la incidencia de úlceras gástricas en cerdos.

La densidad de masa es un factor importante a considerar cuando se determina el volumen de almacenamiento de los vehículos de transporte, barcos, contenedores, tambores y sacos. La densidad de masa afecta los costos de transporte y de almacenamiento. Los ingredientes con una densidad de masa baja tienen un mayor costo por unidad de peso. También afecta la cantidad de segregación del ingrediente que pueda haber durante el manejo de alimentos completos. Las partículas de densidad de masa mayor se van al fondo de la carga durante el transporte mientras que las de densidad menor suben a la parte superior de la carga.

Varios estudios sin publicar realizados en la University of Minnesota han mostrado que es altamente variable el tamaño de partícula entre las fuentes de DDGS. En un estudio de 2001, el tamaño de partícula promedio entre las 16 plantas de etanol fue de 1,282 micrones (Desv. Est. = 305, CV= 24%) y varió entre 612 micrones y 2,125 micrones. En 2004 se llevaron a cabo dos estudios adicionales de análisis de nutrientes y características físicas de DDGS por parte de los investigadores de la University of Minnesota (34 muestras de plantas de etanol en 11 estados diferentes), así como en 2005 (con 35 muestras). Como se muestra en los **cuadros 4 y 5**, los intervalos de partícula promedio fueron de 665 a 737  $\mu\text{m}$ , pero el intervalo de tamaño de partícula es sumamente amplio, de 73 a 1,217  $\mu\text{m}$ . El pH de las fuentes de DDGS promedia 4.1, pero puede variar de 3.6 a 5.0.

**Cuadro 4. Tamaño de partícula, densidad de masa y pH de 34 fuentes de DDGS analizadas en 2004.**

	Promedio	Intervalo	Desv. Est.	CV, %
Tamaño de partícula, $\mu\text{m}$	665	256 - 1087	257.48	38.7
Densidad de masa, $\text{lb}/\text{pie}^3$	31.2	24.9 - 35.0	2.43	7.78
pH	4.14	3.7 - 4.6	0.28	6.81

**Cuadro 5. Tamaño de partícula, densidad de masa y pH de 35 fuentes de DDGS analizadas en 2005.**

	Promedio	Intervalo	Desv. Est.	CV, %
Tamaño de partícula, $\mu\text{m}$	737	73 - 1217	283	38.0
Densidad de masa, $\text{lb}/\text{pie}^3$	25.2	22.8 - 31.5	8.6	34.2
pH	4.13	3.6 - 5.0	0.33	7.91

Se han analizado estudios recientes para evaluar la variación del tamaño de partícula y las características en los DDGS. Liu (2009) realizó un estudio para evaluar el efecto de la distribución del tamaño de partícula de maíz molido y sus efectos sobre la distribución del tamaño de partícula en los DDGS. Para hacer esto, analizó 6 muestras de maíz molido y sus correspondientes DDGS en cuanto a la distribución del tamaño de partícula con una serie de 6 cribas US standard: Números 8, 12, 18, 35, 60 y 100, y una bandeja. Las muestras individuales de maíz y DDGS presentaron diámetro de partículas promedio geométrico variable, mientras que el diámetro promedio de las partículas de DDGS fue mayor que el del maíz (0.696 vs. 0.479 mm), lo que indica que durante la conversión de maíz a DDGS, algunas partículas se hicieron más grandes. La relación entre el diámetro y la frecuencia de masa de las categorías del tamaño de partícula individuales varió, pero la distribución de éstas de la muestra entera se correlacionó entre ellas ( $r = 0.81$ ). Al comparar la composición de nutrientes del maíz con los DDGS, la proteína cruda, aceite, cenizas, carbohidratos totales no almidonosos se concentraron 3.59, 3.40, 3.32, 2.89 veces más que lo que se encontró en el maíz. Aunque hubo correlaciones positivas entre los valores de color  $L^*$  del contenido de proteína y el de carbohidratos no almidonosos, entre el maíz y los DDGS, la variación de nutrientes y los atributos de color fueron mayores en los DDGS que en el maíz. La variación fue mayor en las fracciones separadas que en la fracción completa, tanto en el maíz como de los DDGS. Liu (2009) concluyó que las características físicas y químicas en la materia prima (maíz), método de procesamiento y adición de levaduras se encuentran entre los principales factores que causan grandes variaciones en el tamaño de partículas entre las fuentes de DDGS.

Liu (2008) obtuvo 11 muestras de DDGS de maíz de diferentes plantas de etanol en el Medio Oeste de EUA y determinó la distribución del tamaño de partícula en cada muestra mediante una serie de seis cribas seleccionadas US standard: Números 8, 12, 18, 35, 50, y 100, y una bandeja. El tamaño de partícula entre y dentro de muestras de DDGS fue altamente variable, con un promedio de 0.660 mm de una media geométrica del diámetro de partículas y media geométrica del promedio de desviación estándar de 0.440 mm de diámetro de partícula por masa. La mayoría tenía una distribución de tamaño de partícula unimodal con un moda en la clase del tamaño entre 0.5 y 1.0 mm. La distribución del tamaño de partícula y el color se correlacionaron muy mal con la composición de nutrientes de las muestras de DDGS, pero la distribución de nutrientes y los valores de color se correlacionaron ampliamente con la distribución del tamaño de partícula. En varias fracciones separadas de DDGS, el contenido en proteínas y los valores de color  $L^*$  y  $a^*$  se correlacionaron negativamente, mientras que el contenido de aceite y el total de CHO se correlacionaron positivamente con el tamaño de partícula. Estos resultados indican que es posible fraccionar los DDGS para concentrar ciertos nutrientes con base en el tamaño de partícula y que la distribución de ésta se puede usar como un índice para un posible fraccionamiento de los DDGS.



Clementson et al. (2009) investigaron la aparición de la segregación de partículas dentro de pilas de DDGS formadas por descarga por gravedad y sus efectos sobre la variabilidad de nutrientes espacial subsiguiente. Se realizaron pruebas de segregación de partículas con pilas

de DDGS que se habían formado en un laboratorio con muestras de DDGS de plantas de etanol "antiguas" y "modernas". Las pruebas también se realizaron en un estudio de planta creando pilas de DDGS formadas de las mismas dos plantas de etanol para combustible. En ambos estudios, las pilas de DDGS se formaron mediante descarga por gravedad y se muestrearon en varios lugares desde el centro de la pila hacia la periferia. Los resultados muestran que la segregación de partículas si resulta en diferencias significativas en el tamaño de partícula en los lugares muestreados de la pila y que el tamaño de partícula (diámetro promedio geométrico) aumentó del centro hacia la periferia de la pila. El contenido de proteína cruda y humedad fueron los únicos nutrientes que estuvieron correlacionados con el tamaño de partícula, pero no fue consistente la correlación de la proteína cruda con el tamaño de partícula, al tiempo que hubo una correlación fuerte y positiva del tamaño de partícula con la humedad. Estos autores concluyeron que debe desarrollarse un protocolo de muestreo estándar para garantizar una determinación de nutrientes precisa en las fuentes de DDGS, con base en un contenido variable de proteína cruda y humedad entre diferentes porciones de una pila de DDGS.

## Capacidad de flujo

Desafortunadamente, los DDGS pueden tener algunas características indeseables de manejo que se relacionan con una mala capacidad de flujo bajo ciertas condiciones. La reducción de la capacidad de flujo o el potencial para reducir esta capacidad de los DDGS, ha causado que las compañías de fletes ferroviarios no permitan el uso de carros de ferrocarril para transportar esta materia prima (NCERC, 2005). Por lo tanto, los comercializadores de DDGS deben usar sus propios carros de ferrocarril para transportarlos. La capacidad de flujo reducida y el puenteo de los DDGS en los contenedores de almacenamiento a granel y los vehículos de transporte limitan la aceptabilidad de algunas fuentes de DDGS por parte de algunos clientes, porque las plantas de alimento balanceado no quieren tener que enfrentarse con la incomodidad y el gasto de manejar un ingrediente que no fluye a través de los sistemas de la planta.

La capacidad de flujo se define como la capacidad de los sólidos granulares y polvos de fluir durante la descarga del transporte o de los recipientes de almacenamiento. La capacidad de flujo no es una propiedad natural inherente al material, sino más bien una consecuencia de varias propiedades que interactúan, que de manera simultánea influyen el flujo del material (Rosentrater, 2006b). Los problemas de capacidad de flujo pueden surgir a partir de una serie de factores que actúan sinérgicamente, entre los que se incluye la humedad del producto, distribución del tamaño de partícula, temperatura de almacenamiento, humedad relativa, tiempo, distribución de la presión de compactación dentro de la masa del producto, vibraciones durante el transporte y variaciones en los niveles de estos factores durante el proceso de almacenamiento (Rosentrater, 2006b). Además, entre otros factores que pueden afectar la capacidad de flujo se incluyen los niveles de constituyentes químicos, proteína, grasa, almidón y carbohidratos, así como la adición de agentes de flujo.

Debido a que es multidimensional el comportamiento de flujo de un material de alimentos balanceados, no existe una sola prueba que mida por completo la capacidad de fluir de un material (Rosentrater, 2006). El equipo de pruebas de corte es el principal equipo utilizado para medir las propiedades de fuerza y flujo de materiales a granel. También miden la cantidad de compactación, así como la fortaleza de masa de los materiales (Rosentrater, 2006). Otro método de medir la capacidad de flujo de los materiales granulados implica la medición de cuatro propiedades físicas principales: ángulo de deslizamiento, compresibilidad, ángulo de espátula y el coeficiente de uniformidad (por ejemplo cohesión) (Rosentrater, 2006b).

Se han publicado varios estudios recientes con respecto a las causas de los problemas de capacidad de flujo de los DDGS y las posibles soluciones para mejorar este flujo. En una revisión de datos de investigación sobre la capacidad de flujo y las características de manejo de sólidos y polvos a granel, Ganesan et al. (2008a), indicaron que se puede ver afectada la capacidad de flujo de los DDGS por la humedad del almacenamiento, temperatura, humedad relativa, tamaño de partícula, tiempo o variaciones de temperatura, entre otros factores. Bhadra et al. (2008) evaluaron características de la superficie y capacidad de flujo de los DDGS



mediante una tinción del corte transversal de partículas de DDGS y mostraron que una mayor cantidad de grosor de proteína comparado con el grosor de carbohidratos en las capas de la superficie de los DDGS presentaba un menor índice de función de flujo y una mayor cohesividad, lo que indica posibles problemas de flujo. También observaron que aparecía mayor grasa de superficie en las muestras con los peores problemas de flujo.

Ganesan et al. (2007a) utilizaron datos obtenidos de trabajos previos mediante técnicas de análisis de datos exploratorios para desarrollar un modelo integral para predecir la capacidad de flujo de los DDGS. Se desarrolló un modelo sencillo y robusto ( $R^2 = 0.93$ ,  $SE = 0.12$ ), pero el modelo se basó exclusivamente en los DDGS de una planta de etanol. Dado que las propiedades de flujo de los DDGS varían entre fuentes, indicaron utilizar esta metodología para desarrollar modelos similares que predigan la capacidad de flujo de los DDGS de otras plantas. En un estudio subsiguiente, Bhadra et al. (2009) midieron las características de capacidad de flujo de muestras de DDGS de cinco plantas de etanol en la región norte central de EUA mediante las pruebas de Carr y Jenike, y los datos resultantes se compararon matemáticamente con un modelo empírico previamente desarrollado. Su evaluación de la capacidad de flujo total indicó que las muestras de DDGS sí presentan el potencial de problemas de flujo, aunque ninguna de ellas presentó puenteo.

Ganesan et al. (2008b) realizaron entonces un estudio para determinar el efecto del contenido de humedad y el nivel de solubles sobre las propiedades físicas, químicas y de flujo de los DDGS. Determinaron el efecto de cinco niveles de humedad (10, 15, 20, 25 y 30%) sobre las propiedades físicas y químicas resultantes de los DDGS que contenían 4 niveles de solubles (10, 15, 20 y 25%). Los resultados de este estudio mostraron que el nivel de solubles y de

contenido de humedad presenta efectos significativos sobre las propiedades físicas y de flujo (por ejemplo: la densidad de masa aireada, densidad de masa empacada y compresibilidad). La dispersabilidad, índice de capacidad de flujo y el índice de desbordamiento se utilizaron para mostrar que la capacidad de flujo generalmente baja conforme aumenta el contenido de humedad en la mayoría de los niveles de solubles evaluados. También se vieron afectados el color y el contenido de proteína de los DDGS conforme aumentaron los niveles de solubles.

En un estudio subsiguiente, Ganesan et al. (2008c) evaluaron las propiedades de flujo de los DDGS con diversos contenidos de solubles y humedad con la prueba de Jenike. Los resultados de este estudio mostraron que en función del nivel de solubles en los DDGS y de un contenido de humedad arriba de cierto nivel, es que la humedad en realidad empezaba actuar como lubricante, facilitando el flujo de los DDGS. También observaron que con la adición de niveles más altos de solubles y humedad, aumentaba la compresibilidad de los DDGS. Concluyeron que los DDGS son un material cohesivo, y que es probable que produzcan problemas de arqueo de cohesividad.

Con la intención de mejorar la capacidad de flujo de los DDGS, se realizaron dos estudios para determinar los efectos de añadir ciertos agentes del flujo a los DDGS (Ganesan et al., 2008d; Johnston et al., 2009). Ganesan et al. (2008) evaluaron el efecto de 0, 1 y 2% de adición de carbonato de calcio a los DDGS con contenidos variables de humedad y niveles de solubles. La capacidad de flujo de los DDGS se redujo cuando aumentó el porcentaje de solubles y el contenido de humedad. La adición de un agente ( $\text{CaCO}_3$ ) no mejoró las propiedades de flujo de los DDGS, lo cual se pudo haber debido a la falta de afinidad de superficie de los DDGS y las partículas del agente de flujo, o a la muy poca inclusión de este agente. De la misma forma, Johnston et al. (2009) realizaron un estudio para evaluar la adición de un agente de control de migración de humedad a razón de 2.5 kg/tonelada métrica (DMX-7), carbonato de calcio al 2% o zeolita clinoptilolita al 1.25%. El experimento se realizó en una planta de etanol comercial de molienda en seco con DDGS en dos diferentes niveles de humedad (9 vs. 12%). La tasa de flujo de los DDGS a la descarga fue mayor para el nivel de humedad de 9% en comparación con el de 12% (620 vs. 390 kg/min). Las tasas de flujo de los DDGS en la descarga fueron: 509 (control), 441 (DMX-7), 512 (carbonato de calcio) y 558 (zeolita) kg/min. Ninguno de los ACA produjo tasas de flujo que difirieran significativamente del control. Estos investigadores concluyeron que el aumento del contenido de humedad de 9% al 11.6% disminuyó la capacidad de flujo de los DDGS y que los agentes de flujo probados en este estudio, en las concentraciones seleccionadas, no mejoró la capacidad de flujo de este material.

## **Estabilidad en el almacenamiento**

### **Humedad**

Los conservadores y los inhibidores de hongos comúnmente se añaden a los granos de destilería húmedos (~50% de humedad) para prevenir el deterioro y aumentar la vida de anaquel. Sin embargo, ya que por general el contenido de humedad de los DDGS es de 10% a 12%, hay un riesgo mínimo de que se deterioren durante el tránsito y el almacenamiento, a menos de que haya goteras de agua en los barcos o en las bodegas. Está completamente aceptado en el manejo de granos y la industria de alimentos balanceados que el contenido de

humedad del grano y de sus subproductos debe de ser menor a 15% para prevenir el calentamiento y la descomposición (por ejemplo: hongos y micotoxinas) durante el transporte y el almacenamiento. Por lo tanto, a menos que el contenido de humedad de los DDGS exceda el 15%, la vida de anaquel de éstos parece ser de varios meses. No se han llevado a cabo estudios de investigación para demostrar que son necesarios los conservadores e inhibidores de hongos para prevenir el deterioro y aumentar la vida de anaquel de los DDGS.

Puede haber “formación de terrones” o “apelmazamiento” como resultado de la descarga de DDGS en camiones, carros de ferrocarril o contenedores, si no se ha enfriado y “curado” adecuadamente antes de la descarga. A menudo, esto causa problemas de flujo y dificultad en la descarga de los DDGS. La adición de agentes no mejoró la capacidad de flujo de los DDGS.. pero el bajo contenido de humedad (9%) mejoró esta capacidad en comparación con los DDGS que contenían 12% de humedad (Johnston et al., 2009).

## Oxidación de las grasas

En el pasado, la mayoría de las fuentes de DDGS de maíz contenían de 11 a 12% de grasa (aceite de maíz) con base en MS, pero con la implementación amplia de las tecnologías de extracción de aceite de maíz, el contenido de grasa cruda ahora puede estar en un intervalo de 5 al 12%. Sin importar el contenido de grasa cruda, el perfil de ácidos grasos y las características del aceite de maíz no cambian perceptiblemente, lo cual se muestra en los **cuadros 7 y 8**.

Los aceites vegetales, como el de maíz, son altos en ácidos grasos insaturados. Como resultado, los aceites vegetales tienen una relación más alta de ácidos grasos insaturados a saturados (I:S), en comparación con las grasas (de origen animal). La relación I:S afecta el punto de fusión y el valor de energía de la grasa, así como la composición de ácidos grasos en el hígado, grasa, carne y leche de cerdos y aves. El valor de yodo es un método de estimar la relación I:S. Cada doble ligadura en un ácido graso tiene la capacidad de tomar dos átomos de yodo. Con la reacción de los ácidos grasos con el yodo, es posible determinar el grado de insaturación de la grasa o el aceite. El número de yodo se define como los gramos de yodo absorbidos por 100 gramos de grasa. Debido a que las grasas insaturadas tienen más dobles ligaduras, van a tener valores de yodo más altos que las grasas saturadas. Se puede usar el valor de yodo para estimar los perfiles de ácidos grasos de varias fuentes de grasa.

Las grasas son susceptibles a la descomposición por oxidación para formar peróxidos, que son compuestos inestables y que se pueden enranciar. También se conoce el valor de peróxido como un valor de peróxido inicial, porque se determina en una muestra al someterse a análisis. El valor de peróxido de 5.0 mEq de peróxido/kg o menor es un indicio de poco o nada de rancidez. Un contenido alto de ácidos grasos libres puede indicar oxidación o descomposición de la grasa y una posible rancidez. Los ácidos grasos libres son los que no están unidos al glicerol por un enlace éster, pero que se encuentran de forma libre. La oxidación de la grasa produce ácidos grasos libres como subproducto. La humedad en las grasas y los ingredientes altos en grasa puede aumentar la rancidez. Sin embargo, esto es de poca preocupación en los DDGS, relativamente hablando, porque el contenido de humedad es por lo general de 10 a 11%.

**Cuadro 7. Ácidos grasos seleccionados (% de ácidos grasos totales) en el aceite de maíz<sup>1</sup>.**

	<C16:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	>C:20
<b>Aceite de maíz</b>	0.0	10.9	0.0	1.8	24.2	59.0	0.7	---

<sup>1</sup> Swine NRC, 1998.

**Cuadro 8. Características químicas y valor energético del aceite de maíz<sup>1</sup>.**

	Total saturados, %	Total insaturados, %	Relación I/S	Valor de yodo	Total $\sum$ N-6	Total $\sum$ N-3	ED, kcal/kg	EM, kcal/kg
<b>Aceite de maíz</b>	13.3	86.7	6.53	125	58.0	0.7	8755	8405

<sup>1</sup> Swine NRC, 1998.

En una prueba de campo realizada por el Consejo Norteamericano de Granos se evaluó la estabilidad de la grasa de DDGS de EUA bajo condiciones de almacenamiento en granjas, cálidas y húmedas subtropicales en Taiwán. Este estudio se realizó en una granja lechera comercial en la parte central del país. Los DDGS se produjeron en una planta de etanol de Dakota del Sur y se exportaron a Taiwán en un contenedor de 40 pies. A la llegada a Taiwán, los DDGS se reempacaron en sacos de alimento de 50 kg con un recubrimiento de plástico. Las bolsas de DDGS se almacenaron en un establo cubierto de acero durante diez semanas en el transcurso del estudio. El estudio se realizó de septiembre a noviembre de 2003, bajo condiciones de temperatura y humedad altas. Se obtuvo una muestra al azar de los DDGS a la semana del almacenamiento y se almacenaron en un congelador hasta su análisis de valor de peróxido y de ácidos grasos libres. Los resultados analíticos se muestran en el **cuadro 9**. Los valores de peróxido iniciales y de la semana 10 de los DDGS no fueron diferentes y estuvieron muy por debajo del máximo de 5.0 mEq de peróxido/kg, que es el valor umbral de la rancidez. Aunque el nivel de ácidos grasos libres en el aceite extraído de los DDGS aumentó ligeramente de la semana 1 a la 10, no hay pruebas de que se hubiera dado la oxidación de lípidos (rancidez) en los DDGS. Esto indica que es estable la grasa en los DDGS durante un periodo de al menos 10 semanas de almacenamiento en climas cálidos y húmedos, donde la temperatura promedio es de 25.4°C (un intervalo de 17.1°C a 32.4°C) y el promedio de % de humedad relativa es de 79.9% (intervalo de 41.2% a 99.5%).

**Cuadro 9. Valor de peróxido de los DDGS y concentración de ácidos grasos libres del aceite extraído de los DDGS a la semana 1 y semana 10 de almacenamiento.**

Análisis	Muestra semana 1	Muestra semana 10
Valor de peróxido, mEq/kg	0.70	0.60
Ácidos grasos libres, % de oleico	11.2	16.2

Minnesota Corn Growers Association en 2003 ([www.ddgs.umn.edu](http://www.ddgs.umn.edu)) patrocinó otra prueba de campo para evaluar muestras de DDGS, obtenidas semanalmente del almacenamiento de una planta de alimentos balanceados comerciales en Jalisco, México en cuanto a humedad (materia seca), micotoxinas (aflatoxina, ocratoxina, toxina T-2, fumonisina y zearalenona), y la

medición de la oxidación de la grasa (rancidez). La temperatura ambiental promedio durante el periodo de almacenamiento de 16 semanas fue de 17.0°C, y varió un promedio bajo de 9.3°C a un promedio de temperatura alta de 24.7°C. No hubo un cambio detectable en la rancidez oxidativa durante el periodo de almacenamiento de 16 semanas ni presencia de micotoxinas.

Se supone que la estabilidad aparente de los DDGS de maíz se debe a la presencia de altas concentraciones de antioxidantes naturales. El maíz contiene una alta concentración de compuestos que presentan actividad antioxidante natural. Adom y Liu (2002) encontraron que el maíz tiene la actividad antioxidante total más alta en comparación con el trigo, la avena y el arroz, y que tiene el porcentaje más alto de antioxidantes ligados. Es posible que la presencia de cantidades significativas de antioxidantes naturales encontrados en el maíz sean muy probablemente responsables de la excelente estabilidad de los DDGS durante varias semanas de almacenamiento, incluso bajo condiciones cálidas y húmedas.

## Propiedades de absorción de agua de los DDGS

Hay poca información con respecto a la higroscopicidad (capacidad de absorber humedad) de los DDGS. Sin embargo, el Consejo Norteamericano de Granos patrocinó una prueba de campo con pollos de engorda en Taiwán, en la que se monitoreó el contenido de humedad de los DDGS durante el almacenamiento en una planta comercial del 16 de marzo al 10 de junio de 2004. Se obtuvo una muestra al azar de DDGS a la semana del almacenamiento en la planta de alimentos, en la cual se analizó la humedad en un período de 13 semanas de almacenamiento. El contenido de humedad de los DDGS aumentó de 9.05% al inicio, a 12.26% al final del periodo de almacenamiento de 13 semanas (**cuadro 6**). Como era de esperarse, no cambió la concentración de proteína cruda en los DDGS y no hubo aflatoxinas presentes al inicio o al final del periodo de almacenamiento. Por lo tanto, parece que bajo condiciones climáticas húmedas, los DDGS aumentan el contenido de humedad durante el almacenamiento a largo plazo.

**Cuadro 6. Resultados del análisis de laboratorio de humedad proteína cruda y aflatoxinas de los DDGS durante el almacenamiento en una planta comercial de alimentos balanceados en Taiwán.**

Fecha de la muestra	Número de la muestra	Humedad, %	Proteína cruda, %	Aflatoxinas, ppb
16-Mar-04		9.05	27.60	0.00
17-Mar-04		10.17	27.61	0.00
24-Mar-04	1	10.65	27.59	0.00
31-Mar-04	2	10.70	27.63	0.00
7-Abr-04	3	10.71	27.62	0.00
14-Abr-04	4	10.76	27.73	0.00
21-Abr-04	5	10.93	27.71	0.00
28-Abr-04	6	11.02	27.62	0.00
5-May-04	7	11.28	27.54	0.00

12-May-04	8	11.16	27.61	0.00
19-May-04	9	11.70	27.63	0.00
27-May-04	10	11.88	27.61	0.00
3-Jun-04	11	12.13	27.50	0.00
10-Jun-04	12	12.26	27.53	0.00

La humedad parece ser un factor importante que afecta la capacidad de flujo de los DDGS durante el almacenamiento y el transporte, en el que la humedad, temperatura, humedad relativa, tamaño de partícula y variación de tiempo del almacenamiento pueden interactuar para determinar las características de flujo. Ganesan et al. (2008e) realizaron un estudio para desarrollar isotermas de sorción de los DDGS con niveles variables de solubles, para poder brindar a diseñadores y operadores de la planta la información relevante de almacenamiento y transporte. Determinaron el contenido de humedad en equilibrio de los DDGS con cuatro diferentes niveles de solubles (10, 15, 20 y 25% en base seca) con el uso de un método gravimétrico estático a 10°C, 20°C, 30°C y 40°C en niveles de humedad relativa en equilibrio de 60, 70, 80 y 90%. Observaron que la capacidad de sorción de los DDGS aumentó con el aumento a la temperatura y el nivel de los solubles, y le siguió una isoterma tipo III, que comúnmente se observa en alimentos altos en azúcares. El contenido de humedad en equilibrio de los DDGS con 10, 15, 20 y 25% de solubles (base seca) estuvo de 8.61 a 47.07% (base seca), 11.58 a 83.49% (base seca), 13.72 a 90.70% (base seca) y 15.03 a 132.01% (base seca), respectivamente. Estos investigadores aplicaron 9 modelos para ajustar los datos de la isoterma, pero aprendieron que ningún modelo común podría predecir de manera precisa las isotermas de sorción de los DDGS con varios niveles de solubles. Como resultado, desarrollaron un nuevo modelo de contenido de humedad en equilibrio (modelo Ganesan-Muthu-Rosentrater) que incluía los niveles de solubles en los DDGS como uno de los efectos, junto con la temperatura y el contenido de humedad. Este modelo, junto con un nuevo modelo modificado exponencial 2, produjo los mejores ajustes para DDGS con diversos niveles de solubles, que se pueden usar para predecir el comportamiento de la sorción de humedad en equilibrio de los DDGS bajo una gran variedad de condiciones de almacenamiento (Ganesan et al., 2007b).

## Peletizado

El peletizado de los DDGS y alimentos completos presenta una serie de ventajas en comparación con la forma granulada, entre los que se incluyen una mejor capacidad de flujo, una mayor densidad de masa, se reduce el desperdicio, el polvo y la segregación de partículas, así como una posible mejora de la palatabilidad y digestibilidad de la energía cuando se alimenta al ganado.

Rosentrater (2007) realizó dos estudios a escala laboratorio y comercial para determinar la factibilidad de peletizar los DDGS. Los resultados positivos obtenidos en el estudio de escala a laboratorio se reprodujeron en el estudio a escala comercial. En el estudio a escala comercial, utilizó una sola fuente de DDGS y utilizó dos líneas de procesamiento que representaban dos

diferentes fabricantes de equipo (Fabricante A y Fabricante B). Las condiciones de procesamiento se describen en el **cuadro 7**. Las principales diferencias entre los dos procesos de peletizado fueron la longitud del dado del pélet, relación de la longitud y diámetro del del dado, temperatura de acondicionamiento de la harina, temperatura de salida de la peletizadora y contenido de humedad de la harina acondicionada, humedad de salida de la peletizadora y humedad de salida del enfriador.

Como se muestra en los **Cuadros 8 y 9**, la composición de nutrientes y aminoácidos estuvo en su mayor parte sin cambios antes y después del peletizado y fue insignificante el daño térmico a la proteína. Los investigadores sí observaron algunas ligeras diferencias de desempeño entre los procesos de fabricación.

**Cuadro 7. Condiciones de proceso utilizadas para peletizar DDGS<sup>1</sup>**

Parámetro	Fabricante A	Fabricante B
Diámetro del dado del pélet, pulgadas.	11/64	11/64
Longitud del dado del pélet, pulgadas.	1 3/4	2 5/8
Relación longitud/diámetro	10.2	15.3
Temperatura ambiente, °F	49	49
Temperatura de la harina acondicionada, °F	175	155
Temperatura de salida peletizadora, °F	190	160
Temperatura de salida del enfriador, °F	56	55
Humedad de los DDGS, %	11.34	11.34
Humedad de la harina acondicionada, %	17.73	16.08
Humedad de salida de la peletizadora, %	17.57	16.62
Humedad de salida del enfriador, %	13.49	12.80

<sup>1</sup> Rosentrater, 2007.

**Cuadro 8. Contenido de nutrientes (en base a materia seca) de los DDGS antes y después del peletizado<sup>1</sup>.**

Nutriente	DDGS	Fabricante A	Fabricante B
Humedad, %	10.8	12.1	12.1
Materia seca, %	89.3	87.9	88.0
Proteína cruda, %	28.8	28.1	28.6
Proteína térmicamente dañada, %	2.9	2.8	2.8
Proteína disponible, %	26.0	25.3	25.8
FAD %	14.3	13.0	15.4
FND, (%)	31.4	30.3	28.9
Fibra cruda, %	7.1	5.9	6.6
Grasa cruda, %	11.0	11.1	11.5
Cenizas, %	3.84	3.98	4.00
Almidón total, %	11.7	13.9	12.5

<sup>1</sup> Rosentrater, 2007

**Cuadro 9. Contenido de aminoácidos (base a materia seca) de los DDGS antes y después del peletizado<sup>1</sup>.**

Aminoácido	DDGS	Fabricante A	Fabricante B
Alanina, %	2.50	2.15	2.24
Arginina, %	1.08	1.08	1.29
Ácido aspártico, %	1.66	1.68	1.71
Cistina, %	0.80	0.83	0.82
Ácido glutámico, %	4.61	4.63	4.69
Glicina, %	1.05	1.01	1.01
Histidina, %	0.76	0.74	0.74
Isoleucina, %	1.00	0.83	0.84
Leucina, %	3.18	3.00	3.10
Lisina, %	0.80	0.81	0.81
Metionina, %	0.59	0.58	0.54
Fenilalanina, %	1.34	1.33	1.37
Prolina, %	2.12	2.13	2.15
Serina, %	1.24	1.36	1.30
Treonina, %	0.92	1.01	0.99

Tirosina, %	1.07	1.11	1.07
Triptofano, %	0.28	0.24	0.28
Valina, %	1.41	1.08	1.18

<sup>1</sup>Rosentrater, 2007

La peletización de los DDGS sí causó daños en las propiedades físicas (**cuadro 10**). La peletización de los DDGS resultó en un color más oscuro, sin importar el equipo del fabricante utilizado, pero aumentó la densidad de masa (9 a 20%) y disminuyó el ángulo de deslizamiento (una medición de la capacidad de flujo) del 18 a 19%, lo que indica una mejora sustancial de la capacidad de flujo de los DDGS peletizados. La durabilidad del pélet fue alta (de 89 a 94%), sin importar el equipo de fabricación utilizado. Estos resultados indican que se pueden fabricar pélets de DDGS de alta calidad sin el uso de aglutinantes. Sin embargo, las condiciones del peletizado pueden necesitar modificarse (por ejemplo: relación entre la longitud y el diámetro del dado del pélet), en función de la fuente de DDGS utilizada.

**Cuadro 10. Propiedades físicas de los DDGS antes y después de la peletización<sup>1</sup>.**

Propiedad	DDGS	Fabricante A	Fabricante B
Actividad acuosa, -	0.474	0.538	0.534
Color L*	40.66	33.26	34.19
Color a*	9.48	5.15	6.01
Color b*	20.00	13.64	15.17
Tamaño de partícula DMG, mm	0.93	-	-
Tamaño de partícula DSG, mm	1.61	-	-
Conductividad térmica, W/m°C	0.07	-	-
Difusividad térmica, mm <sup>2</sup> /s	0.15	-	-
Densidad de masa, kg/m <sup>3</sup>	476.14	571.93	519.50
Ángulo de deslizamiento, °	20.06	16.36	16.21
Densidad unitaria, kg/m <sup>3</sup>	-	1035.25	938.44
Durabilidad, %	-	93.93	88.87
Fortaleza mecánica, MPa	-	0.51	0.30
Elasticidad, MPa	-	5.24	2.41

<sup>1</sup> Rosentrater, 2007

Xu et al. (2008) realizaron un estudio para evaluar la peletización de DDGS de maíz (3.5 cm de longitud, 1.5 cm de diámetro) con un dado cerrado bajo estrés axial de un pistón vertical aplicado por una máquina de prueba universal Instron. Las condiciones de peletizado incluían el contenido de humedad de los DDGS de 25 a 35%, temperatura del procesamiento de 100 a 120°C, presión de 12.5 a 37.5 MPa, y tiempo de residencia de 5 a 15 segundos. Midieron la densidad del pélet, durabilidad y estabilidad, y observaron que el contenido de humedad, temperatura y presión afectaron significativamente las propiedades de los pélets de DDGS, aunque fue insignificante el impacto del tiempo de residencia. También observaron que al aumentar la temperatura, inicialmente se incrementaba y luego disminuía la densidad unitaria, pero la alta humedad y presión tuvieron efectos positivos sobre la densidad unitaria y la durabilidad del pélet. Conforme aumentaba la presión y el contenido de humedad, la relación de densidad también aumentó. Los resultados de este estudio apoyan las conclusiones del estudio de Rosentrater (2007) que indica se pueden peletizar los DDGS de manera eficaz

en una amplia gama de variables evaluadas. En este estudio, las condiciones óptimas de peletización fueron de 34.6% de contenido de humedad (mucho más alto que el encontrado en los DDGS), 107°C de temperatura de presión y 36.8 MPa de presión, lo que resultó en una durabilidad y densidad máximas, y estabilidad dimensional aceptable.

## Conclusiones

Las características físicas de los DDGS son similares a otros ingredientes granulados secos, tales como la harina de soya y la harina de gluten de maíz, pero el contenido de humedad, tamaño de partícula y la pegajosidad afectan las propiedades térmicas, densidad de masa y capacidad de flujo. El tamaño de partícula, temperatura y tiempo de calentamiento durante el proceso de secado varían entre las plantas de etanol y afectan la digestibilidad de nutrientes de los DDGS. El uso de datos convencionales de pélets y procesos en las plantas de alimentos comerciales puede resultar en una reducción de la durabilidad del pélet y de la producción de las peletizadoras cuando se fabrican dietas que contienen DDGS. Sin embargo, la modificación de las condiciones de peletizado de acuerdo con los lineamientos resumidos en este capítulo puede resultar en una calidad de pélet aceptable cuando los DDGS se incluyen en alimentos para animales.

## Bibliografía

- Adom, K.K., and R.H. Liu. 2002. Antioxidant activity of grains. *J. Agric. Food Chem.* 50:6182-6187.
- Bhadra, R., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Flowability Properties of Commercial Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 86(2):170-180.
- Bhadra, R., K.A. Rosentrater and K. Muthukumarappan. 2008. Surface Characteristics and Flowability of Distillers Dried Grains with Solubles. Paper No. 083811.
- Bhadra, R., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2007. Characterization of chemical and physical properties of distillers dried grains with soluble (DDGS) for value added uses. Paper No. 077009. 2007 ASABE Annual International Meeting, Minneapolis, MN.
- Clementson, C., K.E. Ileleji and R.L. Strohshine. 2009. Particle Segregation Within a Pile of Bulk Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS) and Variability of Nutrient Content. *Cereal Chem.* 86(3): 267-273.
- Cromwell, G.L., K.L. Herkleman, and T.S. Stahly. 1993. Physical, chemical, and nutritional characteristics of distillers dried grains with solubles for chicks and pigs. *J. Anim. Sci.* 71:679-686.
- Ergul, T., C. Martínez-Amezcuca, C.M. Parsons, B. Walters, J. Brannon and S.L. Noll. 2003. Amino acid digestibility in corn distillers dried grains with solubles. *Poultry Sci.* 82 (Suppl. 1):70.
- Ferrer, E., A. Algria, Farre', G. Clemente, and C. Calvo. 2005. Fluorescence, browning index, and color in infant formulas during storage. *J. Agric. Food Chem.* 53:4911-4917.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2008a. Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders - a review with implications for DDGS. *Biosystems Engineering.* 101:4, 425-435.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008b. Effect of moisture content and soluble level on the physical, chemical, and flow properties of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 85(4). 466-472.

- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008c. Flow properties of DDGS with varying soluble and moisture contents using Jenike shear testing. *Powder Technology*. 187(2) p. 130-137.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008d. Effect of flow agent addition on the physical properties of DDGS with varying moisture content and soluble levels. *Transactions of the ASABE*. 51:2, 591-601.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008e. Sorption isotherm characteristics of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Transactions of the ASABE*. 51: 1, 169-176.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007a. Modeling the flow properties of DDGS. *Cereal Chem.* 84(6):556-562.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007b. Dynamic water adsorption characteristics of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 84(6):548-555.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2005. Effect of moisture content and soluble levels on the physical and chemical properties of DDGS. ASAE paper No. 056110. St. Joseph, MI.
- Johnston, L.J., J. Goihl, and G.C. Shurson. 2009. Selected additives did not improve flowability of DDGS in commercial systems. *Appl. Eng. Agric.* 25:1, 75-82.
- Liu, K. 2009. Effects of particle size distribution, compositional and color properties of ground corn on quality of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Bioresource Technol.* 100(19):4433-40.
- Liu, K. 2008. Particle size distribution of distillers dried grains with solubles (DDGS) and relationships to compositional and color properties. *Bioresource Technol.* 99(17):8421-8428.
- National Corn to Ethanol Research Center (NCERC). 2005. Website at: [www.ethanolresearch.com/](http://www.ethanolresearch.com/). Accessed June 13, 2006.
- Noll, S., C. Parsons, and B. Walters. 2006. What's new since September 2005 in feeding distillers co-products to poultry. In: *Proceedings 67<sup>th</sup> Minnesota Nutrition Conference*, St. Paul, MN. pp. 149-154.
- NRC. 1998. *Nutrient requirements of swine*. 10<sup>th</sup> ed. Nat'l Acad. Press, Washington, D.C..
- Pederson, C., A. Pahm, and H.H. Stein. 2005. Effectiveness of *in vitro* procedures to estimate CP and amino acid digestibility coefficients in dried distillers grain with solubles by growing pigs. *J. Anim. Sci. (Suppl. 2)* 83:39.
- Rosentrater, K.A. 2012. Physical properties of DDGS. In: *Distillers Grain Production, Properties, and Utilization*, ed. K. Liu and K.A. Rosentrater, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 121-142.
- Rosentrater, K.A. 2007. Can you really pellet DDGS? *Distillers Grains Quarterly*, Third Quarter, pp. 26-31.
- Rosentrater, K.A. 2006a. Some physical properties of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Appl. Eng. Agric.* 22:4, 589-595.
- Rosentrater, K.A. 2006b. Understanding Distiller's grain Storage, Handling, and Flowability Challenges. *Distiller's Grains Quarterly*. First Quarter 2006. pp. 18-21.
- Stein, H.H. C. Pedersen, A.R. Wirt and R.A. Bohlke. 2005. Additivity of values for apparent and standardized ileal digestibility of amino acids in mixed diets fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 83(10):2387-95.
- Urriola, P.A. 2007. Digestibility of Dried Distillers Grains with Solubles, *In vivo* Estimation and *In vivo* Prediction. M.S. Thesis. University of Minnesota.
- Xu, Y., M.A. Hanna, and R. Weber. 2008. Compaction of corn distillers dried grains. *Cereal Chem.* 85(2):158-164.