ESTUDIO DE VARIABLES DEL PROCESO DE DESCASCARADO DE GRANOS: OBTENCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

A.K. de Figueiredo, L.M. Rodríguez, I.C. Riccobene y S.M. Nolasco
Grupo TECSE - Facultad de Ingeniería (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires) Av. del Valle 5737 Olavarría - Argentina.
E-mail: kdfiguer@fio.unicen.edu.ar, lucianamrodriguez@gmail.com, iriccobe@fio.unicen.edu.ar, snolasco@fio.unicen.edu.ar

Área temática: Aplicaciones de la matemática.
Palabras claves: descascarado, modelado matemático, cártamo

Resumen
Se empleó un diseño central compuesto para analizar el efecto de dos variables del proceso de descascarado de granos, contenido de humedad y velocidad de impacto, sobre dos respuestas de interés aptitud al descascarado y porcentaje de finos. Los modelos de regresión desarrollados, lineal para la aptitud al descascarado y cuadrático para el porcentaje de finos, fueron altamente significativos ($p<0,001$), con un elevado coeficiente de determinación R^2 = 0,9724 y 0,9561, respectivamente. Ambos modelos presentaron una falta de ajuste no significativa ($p>0,05$), indicando una buena correlación con los datos experimentales por lo que permitirían predecir y optimizar valores de las respuestas dentro del rango de las variables de operación estudiado.

Introducción

El cártamo es una oleaginosa altamente adaptada a condiciones de aridez y semi-aridez. El fruto de cártamo es un grano que consta de un pericarpio (cáscara), el cual representa entre un 20-60% del peso seco del fruto, y de una semilla (pepa) que contiene entre 35-50% de aceite. Este cultivo provee de aceite para consumo humano, industria de pinturas y biocombustible, y de harina de extracción para alimentación animal.
El descascarado parcial de los granos influye en la calidad del aceite (disminuyendo la cantidad de ceras y pigmentos) y de su harina residual (incrementando su contenido proteico y disminuyendo el contenido de fibra). El equipamiento que se utiliza en la industria para realizar el descascarado se basa en hacer impactar los frutos, por efecto centrífugo y a alta velocidad, contra una superficie rígida donde se fracturan. Los finos producidos durante el descascarado de granos (material de tamaño menor de 2 mm), constituidos de cáscara y pepa, pueden eliminarse conjuntamente con la cáscara durante el proceso de aspiración de esta última, determinando la pérdida de material con contenido lipídico. A fin de minimizar pérdidas en el rendimiento de aceite es deseable lograr el menor porcentaje de finos durante el proceso de descascarado. En nuestro país el descascarado de los frutos de cártamo es un tema en discusión, debido a las dificultades técnicas que presenta el proceso como consecuencia de la dureza del pericarpio y su adherencia a la semilla. La necesidad de determinar la variabilidad en la aptitud al descascarado (relación entre el porcentaje de cáscara extraído mecánicamente y el porcentaje total de cáscara) en granos de cártamo ha impulsado incipientes estudios acerca del efecto sobre dicha propiedad de diferentes variables del proceso tecnológico. El empleo de herramientas matemáticas y estadísticas facilitan el estudio de estas variables y sus interacciones. En este sentido, el objetivo fundamental del presente trabajo fue analizar el efecto de algunas variables del proceso de descascarado de granos de cártamo sobre dos respuestas de interés (aptitud al descascarado y el porcentaje de finos) y encontrar modelos matemáticos que ayuden a determinar las condiciones óptimas de operación.

Desarrollo

Métodos y técnicas empleadas

Se trabajó con el híbrido CW 99 OL (Criadero CAL WEST, USA, California) cultivado en la estación experimental de INTA- Hilario Ascasubi (Pcia. Bs. As, Argentina).
La operación de descascarado se efectuó por impacto mediante un equipo piloto de descascarado basado en un proceso centrífugo cuyo principio de funcionamiento es similar al utilizado en la industria aceitera. Luego del descascarado mecánico de la muestra, el producto resultante se clasificó en cáscara, pepas, resto (granos entero y granos parcialmente descascarados) y finos, entendiendo por tal a las partículas de tamaño < 2,00 mm. Cada parte se llevó a estufa de aire forzado durante 3 horas a 130ºC, para determinar el peso seco de cada fracción. A partir de los datos se calculó el porcentaje de cáscara y finos obtenidos mecánicamente mediante las Ecs. (1) y (2), respectivamente, ambos expresados como porcentajes en base seca.

$$H_{mec} = \frac{\text{cáscara extraída (g)}}{\text{cáscara extraída (g)} + \text{pepas (g)} + \text{resto (g)} + \text{finos (g)}} \cdot 100 \qquad (1)$$

$$\text{Finos (\%)} = \frac{\text{finos (g)}}{\text{cáscara extraída (g)} + \text{pepas (g)} + \text{resto (g)} + \text{finos (g)}} \cdot 100 \qquad (2)$$

La “aptitud al descascarado”, (A.D., %) se obtuvo como la relación porcentual entre el porcentaje de cáscara extraído mecánicamente con respecto la cantidad de cáscara total, Ec. (3).

$$A.D.(\%) = \frac{H_{mec}}{H_{total}} \times 100 \qquad (3)$$

El porcentaje total de cáscara (Htotal) se obtuvo por separación manual de la cáscara a partir de una muestra de 10 gramos y posterior secado de la misma.
La humedad de la muestra se cuantificó en una estufa de aire forzado (ASAE, 1999), expresándose en base seca.
La velocidad de impacto de los granos dentro del equipo se reguló mediante un variador de energía eléctrica que permite ajustar la velocidad del rotor (rpm).
El porcentaje de finos producido durante el proceso de descascarado se determinó por separación de los mismos mediante un tamiz estandarizado (A.S.T.M. No: 10).
El acondicionamiento de las muestras a la humedad necesaria se realizó por secado, en estufa de circulación forzada (velocidad del aire: 0,15m/s, a 42ºC), o por rociado de las muestras con una cantidad de agua pre-calculada. Para lograr una homogeneización de la humedad, se estacionó las muestras por un período mayor a las 72 horas (Baümler et al., 2006).

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Los factores estudiados, es decir, las condiciones del proceso que influyen sobre la variable respuesta (aptitud al descascarado o producción de finos) fueron el contenido de humedad de grano y la velocidad de impacto del mismo.
Para el estudio del efecto de variables de proceso sobre la aptitud al descascarado y producción de finos se seleccionó un diseño central compuesto (factorial completo 2^2 más puntos con configuración estrella) con cuatro réplicas del centro. Se trabajó con las variables codificadas dado que las conclusiones que se obtienen sobre éstas pueden extrapolarse a las variables naturales (reales). La codificación de los valores reales de las variables independientes (factores) es muy común en la construcción de modelos, dado que las distancias medidas sobre los ejes de las variables codificadas se convierten en estándar facilitando considerablemente los cálculos para obtener el modelo de aproximación e incrementando el ajuste en la estimación de los coeficientes (Ramis Ramos, G. y García Álvarez-Coque). El diseño estadístico considerado y los valores de las variables independientes y codificadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Programa experimental para las variables estudiadas

Corrida	*Variables Codificadas*		*Variables Naturales*	
	X_1	*X_2*	*Contenido de Humedad (%, bs)*	*Velocidad de impacto (rpm)*
1	-1	-1	5	2900
2	-1	1	5	3700
3	1	-1	9	2900
4	1	1	9	3700
5	-1,4	0	4,17	3300
6	1,4	0	9,83	3300
7	0	-1,4	7	2734
8	0	1,4	7	3865
9-10-11	0	0	7	3300

Los resultados experimentales se interpretaron a fin de evaluar la variación de la respuesta en función de los factores seleccionados. Los valores obtenidos se relacionaron con las variables codificadas X_1(contenido de humedad) y X_2 (velocidad de impacto de los granos) mediante un polinomio de segundo orden según la Ec. (4).

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2 \qquad (4)$$

Donde los coeficientes del polinomio fueron representados por b_0 (término constante), b_1 y b_2 (efectos lineales) b_{11}, b_{22} (efectos cuadráticos) y b_{12} (efectos de interacción). Las variables dependientes (Y_i) fueron la aptitud al descascarado de los granos y el porcentaje de finos generados.

Para el análisis estadístico de las respuestas, desarrollar modelos por regresión múltiple a partir de los datos experimentales, construir superficies de respuesta y predecir las condiciones que maximizan la aptitud al descascarado y minimizan la producción de finos, se empleó el programa Statgraphics para Windows, con una probabilidad de error de 0,05.

Resultados

Modelos de regresión

Los datos experimentales obtenidos fueron ajustados a un polinomio de segundo orden como una función de las variables dependientes. En la Tabla 2 se presentan los valores estimados de los coeficientes y la significancia estadística de cada efecto.

Tabla 2. Coeficientes de regresión del modelo establecido para la aptitud al descascarado de los granos

	b_o	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
b_i	32,68	-18,98	13,60	2,51	0,85	-1,33
valor-p		0,0031	0,0060	0,1878	0,4673	0,5719

Los correspondientes valores-p muestran que tanto el contenido de humedad (X_1) como la velocidad de impacto de los granos (X_2) presentan efectos lineales estadísticamente significativos sobre la aptitud al descascarado de los granos. Por otra parte, los términos cuadráticos y de interacción entre las variables independientes seleccionadas resultaron no significativos. El modelo de predicción fue por lo tanto modificado, reescribiendo el polinomio con los términos significativos. La Ec. (5) representa el modelo codificado desarrollado para la aptitud al descascarado de los granos y las variables independientes X_1 y X_2.

$$Y = 35{,}10 - 18{,}98X_1 + 13{,}60X_2 \tag{5}$$

En la Tabla 3 se presenta el análisis estadístico de varianza para la mencionada respuesta.

Tabla 3. Análisis de varianza del modelo ajustado para la aptitud al descascarado

	Suma de Cuadrados	*G.l.*	*Cuadrado medio*	*Valor-F*	*Valor-p*
Modelo	4317,61	2	2158,81	140,80	0,0001
Falta de ajuste	104,81	6	17,47	1,96	0,3762
Error puro	17,85	2	8,93		
Total corregido	4440,28	10			
R^2 = 0,9724					
R^2 ajustado = 0,9655					

El coeficiente de regresión R^2 denota una buena correlación entre los valores observados y los predichos por el modelo, lo que significa que más del 97% de la variabilidad de la respuesta puede ser explicada por el modelo. Para el análisis estadístico de modelos de regresión se suele descomponer el término de error total en error puramente aleatorio y error debido a la falta de ajuste del modelo. En este sentido, dado que la falta de ajuste resultó no significativa en relación con el error puro ($p > 0{,}05$), lo cual representa una prueba de la bondad de ajuste del modelo propuesto (Walpole et al., 2007), puede sugerirse que el modelo simplificado planteado es adecuado para explicar la variabilidad observada en la aptitud al descascarado de los granos. La Fig. 1 presenta la comparación de los valores experimentales y predichos obtenidos en el ajuste del modelo desarrollado para la aptitud al descascarado de los granos (A.D.,%).

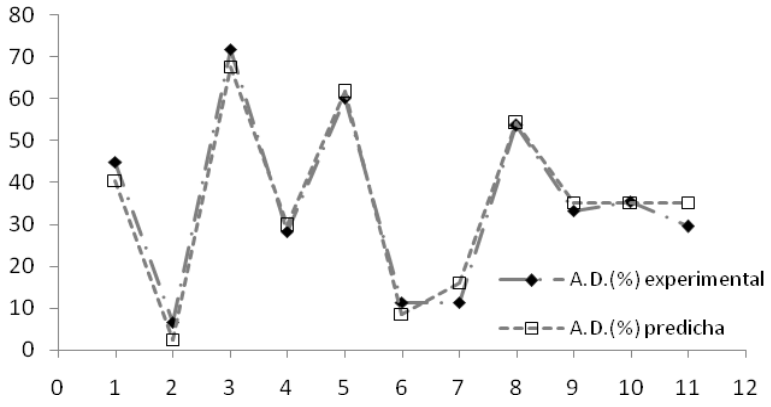

Fig.1. Valores experimentales y predichos por el modelo ajustado para la aptitud al descascarado.

En la Tabla 4.se presentan los valores estimados de los coeficientes del modelo polinómico cuadrático obtenido con respecto al porcentaje de finos y la significancia estadística de cada efecto.

Tabla 4. Coeficientes de regresión del modelo establecido para la respuesta porcentaje de finos generados

	b_o	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
b_i	2,63	-4,79	2,71	2,16	0,89	-2,59
valor-p		0.0029	0.0088	0.0197	0.1018	0.0189

Los correspondientes valores-p muestran una significancia de todos los efectos, lineales, cuadráticos y de interacción, con excepción del término cuadrático de la correspondiente a la variable velocidad de impacto de los granos (X_2). Modificando el modelo e incluyendo solo los coeficientes significativos el mismo queda expresado mediante la Ec. (6).

$$Y = 3{,}46 - 4{,}79X_1 + 2{,}71X_2 + 1{,}91X_1^2 - 2{,}59X_1X_2 \qquad (6)$$

Por lo tanto, un modelo polinomial de segundo orden permitiría predecir el porcentaje de finos de granos de cártamo, frente a variaciones en el contenido de humedad y velocidad de impacto de los mismos. A fin de evaluar la bondad del ajuste se verificaron tanto el coeficiente de determinación (R^2) como la falta de ajuste para el modelo propuesto. En la Tabla 5 se presenta el análisis estadístico de varianza para la mencionada respuesta.

Tabla 5. Análisis de varianza del modelo ajustado para el porcentaje de finos

	Suma de Cuadrados	*Gl*	*Cuadrado Medio*	*Razón-F*	*Valor-p*
Modelo	288,15	4	72,04	32,67	0,0003
Falta de ajuste	12,1886	4	3,04715	5,85	0,1513
Error puro	1,0422	2	0,5211		
Total corregido	301,382	10			
R^2= 0,9561					
R^2 ajustado = 0,9268					

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 95,61% de la variabilidad en el porcentaje de finos de los granos en función de las variables independientes seleccionadas (contenido de humedad del grano y velocidad de impacto de los mismos). Asimismo, el valor no significativo obtenido para la falta de ajuste permite establecer que el modelo matemático ajustado podría ser usado como buen indicador de predicción de la respuesta estudiada.

La Fig. 2 presenta la comparación de los valores experimentales y predichos obtenidos en el ajuste del modelo desarrollado para el porcentaje de finos.

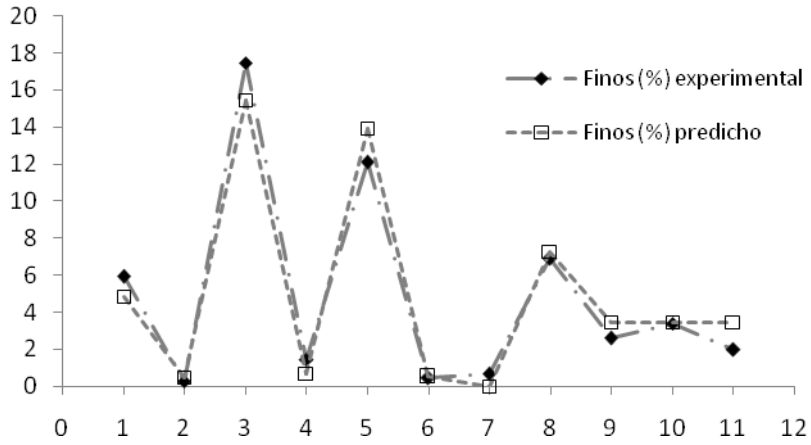

Fig. 2. Valores experimentales y predichos por el modelo ajustado para el porcentaje de finos.

Superficies de respuesta

El efecto de las variables independientes seleccionadas en la aptitud al descascarado y porcentaje de finos se presenta en las Figuras 3 y 4 respectivamente.

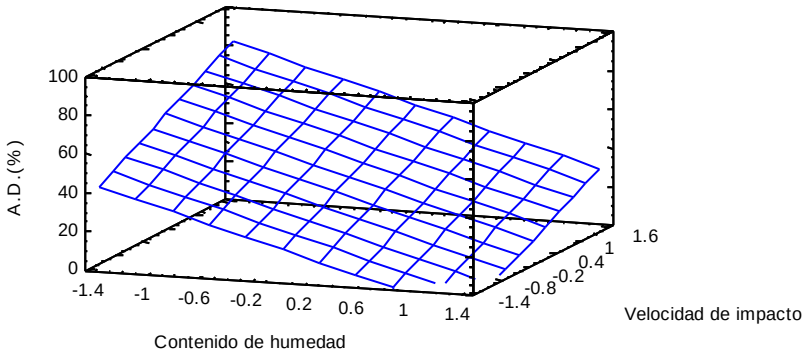

Fig. 3. Superficie de respuesta para la aptitud al descascarado de los granos en función de los valores codificados para la velocidad de impacto y contenido de humedad.

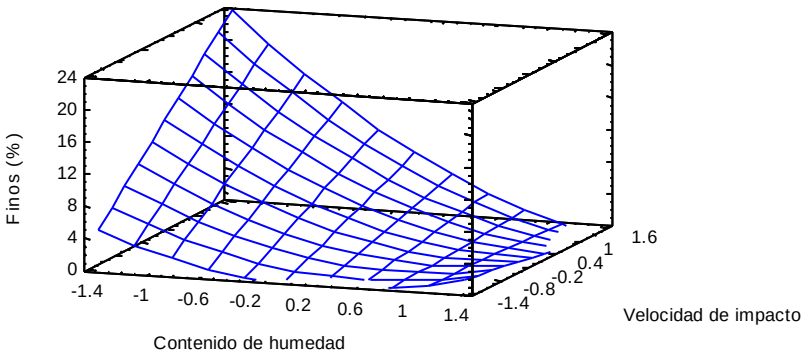

Fig. 4. Superficie de respuesta para el porcentaje de finos de los granos en función de los valores codificados para la velocidad de impacto y contenido de humedad.

La Fig. 3 muestra la superficie estimada a partir del modelo desarrollado para la aptitud al descascarado. A partir de la misma, es posible observar un aumento en la aptitud al descascarado con la disminución en el contenido de humedad del grano y con el aumento de la velocidad de impacto del mismo, representando el efecto significativo de los términos lineales de las variables independientes sobre la mencionada respuesta. Dentro del rango de operación analizado la aptitud al descascarado de granos de cártamo presentó un máximo a una velocidad de impacto de 3865 rpm (X_2 = 1,4) y un contenido de humedad del grano de 4,17% bs (X_1 = -1,4). Este último representa un valor muy bajo como para poder ser alcanzado en forma experimental o industrial, por lo que se sugiere trabajar a menores velocidades y/o mayores contenidos de humedad de los granos.

En la Fig. 4 se muestra el efecto de las variables independientes sobre el porcentaje de finos generados. En general, se observa una disminución en el porcentaje de finos con el aumento en el contenido de humedad y con la disminución en la velocidad de impacto de los granos. Asimismo, se presenta una leve curvatura como resultado del efecto cuadrático significativo del contenido de humedad del grano. Es sabido que durante el proceso de descascarado de granos es deseable lograr el menor porcentaje de finos con el objeto de minimizar pérdidas en el rendimiento de aceite. Los resultados obtenidos para los factores estudiados presentaron un coeficiente negativo de interacción significativo sobre dicha respuesta. Por lo tanto, a fin de optimizar el proceso de descascarado de granos de cártamo los resultados experimentales se evaluaron en términos de minimizar el porcentaje de finos. Dentro del rango de operación evaluado la respuesta presentó un mínimo a un contenido de humedad 6,83%,bs (X_1 = -0,087) y una velocidad de impacto de 2770 rpm (X_2 = -1,325). Trabajando con estos valores de las variables del proceso se alcanzaría una aptitud al descascarado de los granos sumamente baja como para satisfacer los requerimientos industriales (alrededor de 18,73%). Por otro lado, la optimización de la de esta última respuesta conduce a valores altamente satisfactorios para esta variable (80,71%) pero alcanzando un porcentaje de finos sumamente elavado (22,78%) y consecuentemente pérdidas considerables de material lipídico en el proceso. Los resultados obtenidos muestran la necesidad de adoptar una decisión de compromiso desde el punto de vista industrial. Sería conveniente efectuar futuras investigaciones tendientes a la optimización conjunta de ambas variables.

Conclusiones

Modelos matemáticos estadísticamente significativos, lineal para la aptitud al descascarado y cuadrático para el porcentaje de finos, podrían ser usados para predecir valores de dichos parámetros para un rango de contenido de

humedad del grano desde 4,17 a 9,83%,bs y una velocidad de impacto de los mismos desde 2734 a 3865 rpm. Los resultados de la técnica de optimización para la aptitud al descascarado sugieren descascarar los granos de cártamo con un contenido de humedad sumamente bajo como para ser alcanzado industrialmente, pero al mismo tiempo conducen a valores muy elevados en el porcentaje de finos generados disminuyendo el rendimiento de aceite en la industria. Asimismo, la técnica de minimización de finos conduciría a valores de aptitud al descascarado sumamente bajos como para poder satisfacer los requerimientos industriales.
Por lo tanto, sería necesario encontrar herramientas matemáticas a fin de optimizar conjuntamente las respuestas de interés en el proceso de descascarado de granos. El logro de dicho objetivo sería especial aporte para una continua mejora del proceso de descascarado.

Agradecimientos
Para el desarrollo del presente trabajo se contó con el aporte de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA). Los autores agradecen a la empresa Oleaginosa Moreno Hermanos S.A por la provisión de la muestra de granos.

Referencias Bibliográficas
ASAE Standars Engineering Practices Data. (1999). American Society of Agricultural Engineering, USA (46th ed.).
Baümler, E., Cuniberti, A., Riccobene, I., Nolasco, S. (2006). Moisture Dependent Physical and Compression Properties of Safflower Seed. Journal of Food Engineering, 72(2), 134-140.
Ramis Ramos, G. y García Álvarez-Coque M. C. Quimiometría. Editorial Síntesis, S.A. ISBN: 84-7738-904-7.
Walpole R. E., Myers R. H., Myers S.L. y Ye K. (2007). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. 8va. edición. Pearson. Prentice Hall.