



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

**MODELACIÓN DEL SISTEMA DE DESCASCARADO Y
LIMPIEZA DE UN PROTOTIPO DESCASCARADOR
ESTACIONARIO DE CÁPSULAS DE HIGUERILLA
(*Ricinus communis* L.)**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

M.I. PEDRO CRUZ MEZA

Chapingo México, Diciembre de 2014



**MODELACIÓN DEL SISTEMA DE DESCASCARADO Y LIMPIEZA DE UN
PROTOTIPO DESCASCARADOR ESTACIONARIO DE CÁPSULAS DE
HIGUERILLA (*Ricinus communis* L.)**

Tesis realizada por Pedro Cruz Meza bajo la dirección del Comité Asesor indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado
de:

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR: _____


DR. SAMUEL GARCÍA SILVA

ASESOR: _____


DR. GILBERTO DE JESÚS LÓPEZ CANTEÑS

ASESOR: _____


DR. CONRADO MÁRQUEZ ROSANO

LECTOR EXTERNO: _____


DRA ROCÍO CERVANTES OSORNIO

DEDICATORIA

Deseo dedicar este trabajo a:

A mis hijos Ángel Isaac, Guillermo y Alondra (†) que dios la tenga en su gloria por ser mi motivación.

A mi esposa Ana Soriano Vaquero por su apoyo y paciencia

A mis padres Ángel Cruz Galván y Rosa Elvia Meza (†) quienes me dieron la vida y educaron con principios.

A mis hermanos Rosa Aurora, María de los Ángeles, José Alfredo y Eliseo que se encuentran en Oaxaca.

A mis amigos y compañeros de profesión por compartir los momentos más importantes de mi estancia en la universidad

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, en especial al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por otorgarme la oportunidad de estudiar y crecer profesionalmente.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo por el apoyo académico brindado para la realización de mis estudios de doctorado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero brindado.

Al Dr. Samuel García Silva, Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs y Dr. Conrado Márquez Rosano miembros del comité asesor por las observaciones y aportaciones realizadas al presente trabajo.

Al Dr. Pedro Paneque Rondón y Dra. Rocío Cervantes Osornio por su valiosa contribución científica en la revisión de la presente tesis doctoral.

Al Dr. Eugenio Romanchik Kriuchkova por las asesorías y consejos brindados para el desarrollo de la presente investigación.

Al M.C. Omar Reséndiz Cantera por su valiosa asesoría en la instrumentación en laboratorio y sobre todo por su amistad.

A los trabajadores académicos y administrativos del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola por sus valiosos aportes y sugerencias para el término con éxito del presente trabajo de investigación.

A los trabajadores del taller de Diseño de Máquinas por su apoyo en la construcción y prueba de las maquetas experimentales, en especial a los Señores Juan Antonio Hernández González, Mauro Sánchez Sánchez, Alberto Toledo Tapia y José Luis Hernández Rodríguez.

DATOS BIBLIOGRÁFICOS

El autor del presente trabajo realizó la licenciatura en la universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el título de Ingeniero Agrónomo Especialista en Maquinaria Agrícola. En el 2001 con la creación del Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral de Agua entre los Departamentos de enseñanza e investigación de Ingeniería Mecánica Agrícola e Irrigación, ingresó a estudiar la maestría en la orientación de Mecanización Agrícola, en donde desarrolló el tema de investigación denominado “Diseño, construcción y evaluación de una máquina para deshojar la mazorca de maíz” y obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería.

Actualmente es profesor investigador de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Se ha dedicado durante 20 años a la docencia e investigación. Ha impartido varios cursos a nivel licenciatura y maestría en Maquinaria Pesada, Maquinas de Transporte y Elevación, Maquinaria Agrícola, Propiedades de los Materiales Biológicos, Materiales y Manufactura, Diseño de Maquinaria Agrícola, Diseño en Ingeniería entre otros. Además ha impartido cursos de capacitación en Maquinaria Pesada a los Distritos de Temporal Tecnificado en los Estados de Veracruz, Tabasco, Chiapas y San Luis Potosí.

En cuanto a investigación se refiere ha participado en el diseño y la construcción de varias máquinas agrícolas como son: deshojadoras desgranadoras de maíz, despicaadora de jamaica, picadores de forraje acoplados a empacadoras, desespinaadora de nopal verdura, descascaradoras de haba, entre otras.

Ha participado en los congresos internacionales VII, VIII, IX y XI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola (CLIA) celebrado en Chile, Nicaragua, Brasil y México respectivamente. Es miembro de la Asociación Mexicana de Ingeniería Agrícola (AMIA) y actualmente funge como presidente.

Contenido

INDICE DE CUADROS	III
INDICE DE FIGURAS	IV
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	5
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Introducción	1
1.2. Descripción del trabajo	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivo específico	6
1.4. Literatura citada	7
CAPITULO 2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS PARA EL DESCASCARADO DE LAS CÁPSULAS DE HIGUERILLA (<i>Ricinus communis</i> L.)	8
2.1. Resumen.....	8
2.2. Abstract.....	9
2.3. Introducción	9
2.4. Materiales y métodos	12
2.5. Resultados y discusión.....	16
2.6. Conclusiones	20
2.7. Literatura citada	21
CAPITULO 3. PROPIEDADES AERODINÁMICAS DE LA SEMILLA NO DESCASCARADA, GRANO Y CÁSCARA DE LA HIGUERILLA.....	24
3.1. Resumen.....	24
3.2. Abstract.....	25
3.3. Introducción	26
3.4. Materiales y métodos	28
3.5. Resultados y discusión.....	33
3.6. Conclusiones	41
3.7. Literatura citada	42
CAPITULO 4. MODELO MATEMÁTICO DE UN DESCASCARADOR DE HIGUERILLA PARA PREDECIR LA EFICIENCIA DEL DESCASCARADO	45

4.1.	Resumen.....	45
4.2.	Abstract.....	46
4.3.	Introducción	47
4.4.	Materiales y métodos	49
4.6.	Conclusiones	67
4.7.	Literatura citada.....	67
CAPITULO 5. MODELACIÓN DE LA MEZCLA GRANO-CÁSCARA EN UNA MÁQUINA LIMPIADORA DE HIGUERILLA (<i>Ricinus communis</i> L.)		70
5.1.	Resumen.....	70
5.2.	Abstract.....	71
5.3.	Introducción	71
5.4.	Materiales y métodos	73
5.5.	Resultados y discusión.....	84
5.6.	Conclusiones	88
5.7.	Literatura citada.....	89
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		93
6.1.	Conclusiones	93
6.2.	Recomendaciones.....	95

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estadígrafos de las principales propiedades físico-mecánicas de la higuera tipo I (criolla).	16
Cuadro 2. Estadígrafos de las principales propiedades físico-mecánicas de la higuera tipo II (roja).	17
Cuadro 3. Estadígrafos de las dimensiones de las semillas de la higuera tipo I y II.	17
Cuadro 4. Ángulo de reposo del fruto de higuera tipo II (roja) en diferentes superficies de fricción.	18
Cuadro 5. Módulo de Young de la higuera tipo I.	20
Cuadro 6. Tratamientos para evaluar la velocidad crítica con sus respectivos materiales y combinaciones de sus dimensiones.	28
Cuadro 7. Propiedades físicas del grano, valva y cáscara de la higuera.	34
Cuadro 8. Cálculo del diámetro geométrico y la superficie proyectada del grano, la valva y la cáscara. ..	34
Cuadro 9. Variantes de la velocidad terminal media de la valva, el grano y la cáscara.	36
Cuadro 10. Número de Reynolds promedio del material de estudio.	36
Cuadro 11. Variantes del coeficiente de arrastre medio de la valva, el grano y la cáscara.	38
Cuadro 12. Variantes del coeficiente aerodinámico medio de la valva, el grano y la cáscara.	40
Cuadro 13. Propiedades físicas de la cápsula, el grano y la cáscara de la higuera roja.	58
Cuadro 14. Datos del disco y cóncavo de la descascaradora de granos de higuera.	59
Cuadro 15. Eficiencia del descascarado estimado y experimental.	62
Cuadro 16. Grano no descascarado estimado y experimental.	64
Cuadro 17. Grano dañado estimado y experimental.	65
Cuadro 18. Parámetros de validación de los modelos de la eficiencia del descascarado, grano no descascarado y dañado con los datos experimentales de la descascaradora de higuera en el nivel de significación $p \leq 0.05$	66
Cuadro 19. Propiedades principales del aire.	79
Cuadro 20. Condiciones de frontera para el modelo k-ε del sistema de limpieza de la descascaradora de higuera.	80
Cuadro 21. Condiciones de frontera del modelo k-ε para la trayectoria de la cáscara de higuera.	80
Cuadro 22. Propiedades para el grano y la cáscara de la higuera del DPM del sistema de limpieza.	81
Cuadro 23. Parámetros de validación del modelo CFD con los datos experimentales de la limpiadora de higuera en el nivel de significación $p \leq 0.05$	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 . Descascarado manual utilizando un "banquito"	11
Figura 2. Determinación de las dimensiones de la cápsula y de la semilla.	13
Figura 3. Determinación de la masa de la cápsula y de la semilla.	13
Figura 4. Determinación del ángulo de reposo de las cápsulas de higuera tipo II.	14
Figura 5. Compresión del fruto de la higuera tipo I: posición vertical y horizontal.....	15
Figura 6. Diagrama de compresión del fruto de la higuera tipo I en posición horizontal.	19
Figura 7. Diagrama de compresión del fruto de la higuera tipo I en posición vertical.	19
Figura 8. Máquina descascaradora de frutos de higuera.....	29
Figura 9. Dispositivo para determinar la velocidad crítica del aire.....	31
Figura 10. Tipos de materiales de higuera; a) cápsulas; b) valva; c) granos y d) cáscara.	33
Figura 11. Gráfica de la velocidad crítica del material contra número de Reynolds.	37
Figura 12. Gráfica del coeficiente de arrastre del material contra número de Reynolds.	39
Figura 13. Gráfica del coeficiente aerodinámico del material contra número de Reynolds	41
Figura 14. Diagrama esquemático de los componentes principales de la descascaradora..	50
Figura 15. Descripción del modelo del descascarado del carpelo de higuera entre el disco y el cóncavo.	52
Figura 16. Maqueta experimental para el descascarado de cápsulas de higuera (<i>Ricinus communis</i> L.).	54
Figura 17. Eficiencia del proceso de descascarado a 120 rpm.....	60
Figura 18. Grano no descascarado en el órgano descascarador a 120 rpm.....	60
Figura 19. Grano dañado del proceso de descascarado.	61
Figura 20. Eficiencia del descascarado estimado y experimental.	62
Figura 21. Grano no descascarado estimado y experimental.	63
Figura 22. Grano dañado estimado y experimental.	65
Figura 23. Diagrama de flujo de granos y cáscaras de la higuera para la realización del modelo.	77
Figura 24. Sistema de limpieza de la máquina descascaradora de higuera.	77
Figura 25. Banco de prueba del sistema de limpieza y estructura para la colecta de la cáscara.	82
Figura 26. Puntos de lectura de la presión dinámica.	83
Figura 27. Vector de la velocidad. a) derecha, b) izquierda, c) frontal, y d) inferior.	85
Figura 28. Comparación de la velocidad estimada por el modelo k- epsilon realizable y datos experimentales.....	86
Figura 29. Velocidad estimada vs experimental para la limpiadora de granos de higuera.	86
Figura 30. Detalle de la acumulación del material en la entrada al ducto de limpieza principal. a) Modelo CFD, y b) Experimento.	88

**MODELACIÓN DEL SISTEMA DE
DESCASCARADO Y LIMPIEZA DE UN PROTOTIPO
DESCASCARADOR ESTACIONARIO DE
CÁPSULAS DE HIGUERILLA (*Ricinus communis*
L.)**

Pedro Cruz Meza¹; Samuel García Silva²

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es modelar el proceso de descascarado y la limpieza de un prototipo descascarador de las cápsulas de higuera (*Ricinus communis* L.). Dos bancos de pruebas se construyeron e instrumentaron para evaluar el comportamiento de los sistemas principales del prototipo. Tres modelos matemáticos se desarrollaron para el dispositivo descascarador: la eficiencia del descascarado de las cápsulas, la cantidad de grano no descascarado y el grano dañado. Los modelos fueron validados con los datos experimentales a 120 rpm. La variable utilizada fue la holgura del disco y el cóncavo. El modelo de la predicción de la eficiencia del descascarado de las cápsulas y el grano no descascarado se ajustaron apropiadamente al valor experimental ($R^2 = 93\%$) y error estándar de 4.74. Mientras que el modelo de predicción del grano dañado se ajustó adecuadamente al experimental ($R^2 = 95\%$) con un error estándar de 0.39. El ducto para el sistema de limpieza es muy importante, debido a que el diseño correcto debe asegurar una distribución homogénea del caudal del aire y el material. El análisis numérico se realizó mediante la técnica de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para determinar la velocidad mínima adecuada. Los modelos k-epsilon y DPM (Modelo de fase discreta) se utilizaron para el análisis de la mezcla aire y grano-cáscara como un flujo en fase diluida. La comparación de los resultados experimentales y los computacionales mostró una buena concordancia cualitativa y cuantitativa ($R^2 = 82\%$) en el perfil de la velocidad a un nivel de significancia del 5%, con error estándar de 0.82. La velocidad estimada y experimental fue 5.98 ± 1.85 y $5.09 \pm 1.63 \text{ ms}^{-1}$ respectivamente. Además en CFD se identificaron los puntos críticos en la entrada de la mezcla al ducto, que coincide con lo observado en pruebas realizadas sobre el banco de ensayos, por lo cual se tiene que aumentar el ángulo de reposo de la caja de vacío para la construcción del nuevo prototipo.

Palabras clave: *Ricinus communis*, simulación, CFD,

**MODELING A DEHULLING AND CLEANING
SYSTEM FOR A STATIONARY CASTOR NUT
(*Ricinus communis* L.) DEHULLING PROTOTYPE**

Pedro Cruz Meza³; Samuel García Silva⁴

ABSTRACT

The objective of this work was to model a process of dehulling and cleaning castor nut (*Ricinus communis* L.) for a stationary prototype machine. Two test stands were built and instrumented for assessing the behavior of the machine systems. Three mathematical models were developed for the dehulling device: capsule hulling efficiency, quantity of unhulled seeds and damaged seeds. The models were validated with experimental data at 120 rpm. The variable used was clearance of the disk and the concave. The models for predicting capsule hulling efficiency and unhulled grains were properly fit to the experimental data ($R^2 = 93\%$) and a standard error of 4.74, while the prediction model of damaged grains was properly adjusted to experimental data ($R^2 = 95\%$) with a standard error of 0.39. The pipeline for the cleaning system is very important since a proper design should assure homogeneous distribution of air and material flow. The numerical analysis was performed using the technique of computational fluid dynamics (CFD) to determine the appropriate minimum speed. The k-epsilon and DPM (discrete phase) models were used to analyze the mixture of seeds, husks and air flow as a dilute phase. Comparison of experimental against computational results showed good qualitative and quantitative agreement ($R^2 = 82\%$) in the velocity profile at a level of significance of 5%, with a standard error of 0.82. The predicted and experimental data were 5.98 ± 1.85 and $5.09 \pm 1.63 \text{ ms}^{-1}$, respectively. Also, in CFD critical points were identified at the entrance of the mixture to the pipeline, which coincides with that observed in tests performed on the test bench; thus, the vacuum box angle of repose should be increased for construction of the new prototype.

Key words: *Ricinus communis*, simulation, CFD

¹ Autor de la tesis

² Director de tesis

³ Thesis author

⁴ Thesis advisor

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

El sector agrícola de México es completamente dependiente del combustible diesel para el uso de maquinaria automotriz y estacionaria. El aumento de la mecanización agrícola en la agricultura genera la necesidad de consumir mayores cantidades de diesel. Los combustibles alternativos como biogás, etanol y aceites vegetales se han evaluado como un sustituto parcial o total del combustible diesel. El biodiesel se puede utilizar directamente en motores como combustible, debido a que su valor calórico y viscosidad son similares a los del diesel. La tecnología de producción, recolección, extracción del aceite vegetal de las semillas de los cultivos y oleaginosas, es muy conocida en la actualidad, pero existen deficiencias y problemas para el manejo de cultivos nuevos, es por ello que surge la necesidad de desarrollar maquinaria adecuada, principalmente en el proceso de cosecha y postcosecha. Es urgente incentivar la mecanización de la cosecha de higuera para ser competitivos en éste cultivo, la cual es manual, costosa y demorada. Para la higuera se señalan tres dificultades principales para el agricultor: 1) Bajo valor de la semilla sin decorticar (descascarar), altos costos de cosecha y decorticación manual, 2) Falta de maquinaria adecuada para la cosecha y decorticación y 3) Escasez de mano de obra para el cultivo y la cosecha (Stachetti *et al.*, 2009).

Existe un gran interés por los aceites no comestibles provenientes de higuera (Kalbande y Vikhe, 2008). Esta especie pertenece a la familia *Euphorbiaceae*. Aunque

es originaria del África tropical, por la importancia económica del aceite contenido en su semilla hoy se cultiva en muchos lugares del planeta. Se le conoce en México con los nombres de “Higuerilla”, “Palma Cristi” e “Higuera Infernal”. De las variedades cultivadas en México las principales corresponden a *Ricinus communis minor*, *Ricinus communis mayor* y *Ricinus sanguineus*.

Actualmente la higuerilla se cultiva por lo menos en 30 países y se producen alrededor de 500 mil toneladas de aceite de ricino a nivel mundial (COIL, 2010). El mercado del aceite de ricino es muy diverso e incluye industrias como la farmacéutica, de cosméticos, de alimentos, textil, lubricantes, telecomunicaciones, entre otras. El creciente interés en aceites vegetales para la producción de combustibles líquidos ha provocado un incremento en la demanda de *ricinus* y su producción se encuentra en plena expansión.

Aunque el cultivo de higuerilla se practica en el país por lo menos desde la época colonial, su producción ha sido marginal y actualmente está desapareciendo. La región más importante en cuanto a superficie sembrada fue Valles Centrales de Oaxaca. Uno de los pocos estudios sobre producción de higuerilla menciona que la región llegó a tener unas 10 mil ha sembradas con este cultivo, lo que la colocaba como la principal abastecedora de semilla de ricino a nivel nacional (INIA, 1980 citado por Ruíz, 2009). La producción de la higuerilla se concentraba principalmente en los distritos de Miahuatlán, Ejutla, Ocotlán, Zimatlán, Etla y Zaachila. El aceite que se producía se destinaba principalmente a cubrir la demanda de aceite para iluminación de la ciudad de Oaxaca y los pueblos vecinos antes de la entrada de la electricidad.

La higuera normalmente se cosecha y descascara en una sola operación con maquinaria especial para este propósito. Sin embargo, en Brasil, hasta ahora no ha habido desarrollo de máquinas para la cosecha, se utiliza solamente adaptaciones para las cosechadoras de grano (Silva y Milani, 2001, citado por Fanan et al, 2009).

En el caso específico de México no existe la tecnología para el descascarado de la higuera, todo el proceso se realiza de forma manual, por lo que existe la necesidad de desarrollar un equipo para el descascarado y limpieza de las cápsulas.

Para la mejora de la cosecha mecánica, se necesita información adicional sobre las características agronómicas y mecánicas del cultivo.

La construcción de las máquinas descascaradoras de higuera en Brasil se desarrolla en su mayoría por métodos empíricos. En ese contexto, las técnicas de modelación y simulación han demostrado ser una herramienta de gran utilidad en el diseño, análisis, optimización y perfeccionamiento de máquinas agrícolas (Souza *et al.*, 2003). Estas técnicas permiten la construcción de prototipos virtuales, la simulación de su desempeño en diferentes condiciones de funcionamiento, la animación de la dinámica del sistema y posibilitan alteraciones en el proyecto inicial, atendiendo necesidades específicas.

Con el empleo de la simulación, se prevé y estudia el comportamiento del sistema en desarrollo, se reducen los riesgos durante la toma de decisión, e identifican los problemas antes de que ocurran. Además es posible reducir los costos en las evaluaciones y revelar así la integridad y viabilidad de un determinado proyecto en términos técnicos y económicos. Técnicas modernas de computación como el análisis

por elementos finitos y la simulación de sistemas mecánicos, cada vez son más utilizadas en proyectos de diseño de máquinas agrícolas, por lo tanto, los modelos matemáticos y sistemas de simulación se pueden aplicar en la mejora y optimización de las máquinas empleadas en el descascarado de las cápsulas de higuera, y en el estudio del comportamiento dinámico de estos sistemas durante el procedimiento de limpieza del grano.

La investigación que se utiliza en las ciencias agrícolas, sea cual fuere la índole de su especialidad, basada en la observación de fenómenos colectivos respecto a uno en particular, debe de representarse numéricamente para lograr una comprobación experimental. Permite, así mismo, hacer predicciones, sobre todo de aquellos fenómenos cuya variación es grande que difícilmente se pueden expresar con ecuaciones matemáticas rígidas. En los últimos tiempos, se ha manifestado una fuerte tendencia en las ciencias hacia la formulación de modelos matemáticos que consisten en la representación numérica de los elementos que forman un sistema en la naturaleza, los que permiten conocer sus interrelaciones y predecir su comportamiento, ya que constituyen la única forma de manejar situaciones muy complicadas y de probar hipótesis científicas básicas. Sin embargo, todavía no se cuenta con modelos matemáticos satisfactorios en relación con los fenómenos que se presentan en la trilla o descascarado de productos agrícolas. En esa búsqueda y con el progreso de la computación, se desarrollaron los modelos matemáticos, permitiendo modelar fenómenos físicos por medio de ecuaciones matemáticas, por lo que este método es más económico, con poco personal, sin la construcción a escala de modelos. Lo único que necesita la persona es una computadora.

Por otra parte, a pesar de los considerables avances en las tecnologías de la agricultura, la mayoría de los agricultores sigue utilizando herramientas manuales ineficientes. Hay así una disparidad en la productividad entre los diferentes sistemas agrícolas. De acuerdo con la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos y dada la caída paulatina de las reservas nacionales y mundiales del petróleo; se considera de interés público la promoción, siembra y procesamiento de cultivos para la producción de biocombustibles. La higuierilla es un cultivo energético con alto potencial para la producción de aceite y por lo tanto de biodiesel, requiere tecnología para mejorar su manejo agronómico (cosecha) y agroindustrial (decorticado y secado), para obtener rendimientos estandarizados en calidad.

Por ello en este trabajo se desarrolla y valida un modelo matemático del proceso de trilla o descascarado y un modelo en dinámica de fluidos computacional (CFD) de una máquina estacionaria de higuierilla (*Ricinus communis* L.).

1.2. Descripción del trabajo

El primer capítulo del trabajo describe el estado del arte sobre el cultivo de la higuierilla, los objetivos general y específicos para el desarrollo de los modelos que simule el conjunto de variables que intervienen en la trilla o descascarado de las cápsulas de higuierilla.

El segundo capítulo describe y analiza las propiedades físico-mecánicas de las cápsulas de higuierilla que intervienen en el proceso de descascarado y limpieza del

producto. En el tercer capítulo se determinan las propiedades aerodinámicas principales que intervienen en la limpieza de los granos como son: velocidad crítica, coeficiente de arrastre y el coeficiente de vuelo.

En el cuarto capítulo se desarrollan y validan tres modelos matemáticos para describir: la eficiencia del descascarado, la cantidad de grano no descascarado y el grano dañado de una maqueta experimental para descascarar las cápsulas de higuera.

En el quinto capítulo se simula el flujo del aire en el ducto del sistema de limpieza de los granos de higuera, mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizando los modelos viscosos $k-\epsilon$ y DPM (modelo de fase dispersa) en fase diluida.

Finalmente en el sexto capítulo se realizan las conclusiones y recomendaciones generales del trabajo de investigación.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar y validar un modelo matemático para predecir la eficiencia del descascarado (granos trillados, no trillados, dañados, etc.) de las cápsulas de higuera (*Ricinus communis L.*) y modelar en CFD el comportamiento de la mezcla grano-cáscara en un prototipo descascarador estacionario.

1.3.2. Objetivo específico

1) Determinar experimentalmente las propiedades físico-mecánicas del fruto de la higuera (*Ricinus communis L.*).

- 2) Determinar las propiedades aerodinámicas y térmicas de la valva, grano y cáscara de la higuera.
- 3) Construcción de las maquetas experimentales de los sistemas de descascarado y limpieza.
- 4) Desarrollar y validar el modelo matemático para predecir la eficiencia del descascarado de las cápsulas de higuera.

1.4. Literatura citada

- Brigham, R. 1993. Castor: Return of an old crop. In: Janick J, Simon JE (Eds) *New Crops*, Wiley, New York, pp 380-383.
- Kalbande, S.R.; Vikhe, S.D. 2008. Jatropha and Karanj bio-fuel: An alternate fuel for diesel engine. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 3(1):7–13.
- Olaoye, J.O. 2000. Some Physical Properties of Castor Nut Relevant to the Design of Processing Equipment. *J. agric. Engng Res.* 77(1): 113-118.
- Stachetti, G.; Aparecida, I.; de Almeida, C.C.; Ligo, M.A. and Moreno, A. 2009. Local Productive Arrangements for Biodiesel Production in Brazil– Environmental Assessment of Small-holder's Integrated Oleaginous Crops Management. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics* 110(1): 61-73

CAPITULO 2.

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS PARA EL DESCASCARADO DE LAS CÁPSULAS DE HIGUERILLA (*Ricinus communis* L.)⁵

DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES FOR DEHULLING OF CASTOR NUT (*Ricinus communis* L.)

2.1. Resumen

El descascarado de la higuera en el país se realiza de forma manual, por lo que existe una baja productividad en la realización de esta labor, aspecto que debe mejorarse en el futuro por el incremento en la demanda de este producto para la producción de biodiesel. Como parte del proyecto de investigación dirigido al diseño de una máquina descascaradora de higuera, se determinó un conjunto de propiedades físico-mecánicas de la variedad roja, cultivada en Valles Centrales de Oaxaca. Estas propiedades constituyen datos de entrada imprescindibles para la evaluación de los modelos físico-matemáticos que posibilitan calcular los principales parámetros de diseño y explotación de las máquinas descascaradoras de higuera. Las propiedades objeto de estudio fueron las dimensiones ecuatorial, polar y espesor de la cáscara de la cápsula, así como las dimensiones de la semilla, la masa del fruto y sus partes componentes, el ángulo de reposo en madera, acero y hule; y la determinación de la carga máxima a compresión que soporta el fruto en posición horizontal y vertical. Como resultado de la investigación se determinaron los principales estadígrafos que caracterizan la variabilidad de dichas propiedades.

PALABRAS CLAVE: higuera, propiedades físico-mecánicas.

⁵ Pedro Cruz Meza, Samuel García Silva, Conrado Márquez Rosano y Gilberto de Jesús López Canteñs. Artículo publicado en la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. ISSN: 2007-0934. Publicación especial (4). 01 de diciembre – 31 de diciembre de 2012.

2.2. Abstract

The shelling of the castor in our country is done manually, using lots of labor, so there is low productivity in carrying out this work, an aspect that should be improved in future by the great demand for this product for the production of biodiesel. As part of a research project aimed at designing a hulling machine Castor, it was determined a set of physical and mechanical properties of the red variety, grown in the Central Valleys of Oaxaca. These properties are essential inputs for the assessment of physical and mathematical models that enable calculation of the main design parameters and operation of hulling machines castor. The properties under consideration were the dimensions equatorial, polar and thickness of the capsule shell and the size of the seed, the mass of the fruit and its component parts, the angle of repose in wood, steel and rubber, and the determination the compressive load bearing fruit in horizontal and vertical. As a result of research statisticians identified the key characteristic variability of these properties.

KEY WORDS: castor, physical-mechanical properties.

2.3. Introducción

La higuera es, una planta que crece silvestre en muchas latitudes del mundo, incluido México. Sin embargo, las variedades silvestres no son susceptibles de aprovechamiento. Esta planta oleaginosa produce, racimos de bellotas que contienen compartimentos donde almacena sus semillas y éstas producen un aceite que puede llegar a tener hasta 500 aplicaciones diferentes en la industria de los biocombustibles, farmacéutica, lubricantes, surfactantes, pinturas, plásticos, detergentes y tintes (Goytia et al., 2011; Vázquez, 1993; Guzmán, 1970; Martínez, 1970). Uno de sus productos

principales es el biodiesel, el cual es obtenido por países como Brasil a manera de alternativa y prevención ante la futura escasez del petróleo (Soares et al., 2009).

El creciente desarrollo de la aviación y el constante empleo de motores de altas revoluciones, le dan gran demanda al aceite como lubricante por su alta densidad, porque conserva su viscosidad a altas temperaturas y porque solo se congela a los 10°C bajo cero (Scholz y Da Silva, 2007; Tobar, 1981).

La cosecha de esta planta se inicia normalmente a los 120 días, cuando las variedades son precoces y a los 150 días en las más tardías. En las variedades cuyo fruto no se abre (indehiscente), la cosecha se hace cuando todos los frutos están secos, por lo que la mayoría de las veces se hace una sola recolección (Fanan et al., 2009). La cosecha mecanizada requiere variedades enanas y uniformes tanto en crecimiento como en ramificaciones, con cápsulas indehiscentes y las hojas deben eliminarse, ya sea natural o artificialmente con defoliantes. La cosechadora típica de granos, sirve para cosechar este cultivo con simples ajustes y cambio en la velocidad del cilindro (Hussain et al., 1980; Schoenleber y Bouse, 1964).

El **beneficiado** de la higerilla puede ser manual o mecanizada y tiene tres etapas básicas: secado, separación, limpieza y ensacado de las semillas. El secado puede ser natural o mediante secadoras. La separación a través de la máquina descascaradora y la limpieza puede ser manual (aventado) o por abanicos mecánicos. Para los frutos indehiscentes el proceso de separado debe ser mecanizado. Dos de los métodos manuales son:

Método de impacto. Consiste en sujetar y golpear con un ladrillo la punta del diámetro polar del fruto, para que se desprendan las 3 semillas de éste. Este método es lento y

tedioso. Otra variante de este método es que los frutos se colocan en el lugar a descascarillar y mediante una tabla o banquito (Figura 1) se golpean estos para posteriormente limpiarlos mediante una corriente de aire. Este método es más rápido, pero se puede dañar mecánicamente la semilla, lo que ocasiona que se rancie ésta.

Método de pisoteado. Los frutos se colocan en el lugar a descascarillar y con los pies se pisotean en sentido horario proporcionándole sobre la superficie de éstos un ligero giro para que se separe la semilla y posteriormente se ventea. Este es un método masivo de descascarillado.



Figura 1 . Descascarado manual utilizando un "banquito".

En el Estado de Oaxaca se cultiva la higuera asociado con el maíz. Para el descascarado se realiza el desprendimiento del raquis del racimo. El descascarado se realiza después del mediodía, para facilitar el desprendimiento de la semilla del fruto, en forma manual.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar las propiedades físicas y mecánicas para el diseño del órgano de trabajo de la descascaradora de higuierilla.

2.4. Materiales y métodos

El material fue recolectado en la población de San Bernardino Texcoco, Estado de México, y en la población de Santa María Roaló, Oaxaca. De un lote de alrededor de 3000 frutos se seleccionaron al azar, además que no tuvieran daño mecánico y biológico.

El material de estudio fueron de dos tipos: tipo I (diferenciado en campo como “criolla” o silvestre, frutos de forma esférica, de semilla pequeña, colectada en el Estado de México) y tipo II (diferenciado en campo como “roja”, frutos de forma ovoide, de semilla grande, colectada en el Estado de Oaxaca).

La metodología presente fue desarrollada a partir de diferentes investigaciones que se han realizado a diversos cultivos por diferentes autores (Almeida et al., 2007; Bouza et al., 2007; Ferreira et al., 2007; García et al., 2003; López et al., 2011; Mayorga et al., 2004; Souza et al., 1998; Valdés et al., 2008).

Dimensiones y masa de la cápsula

Para determinar las dimensiones y la masa de las cápsulas se escogen de manera aleatoria 100 cápsulas y utilizando un vernier digital marca Mitutoyo serie 500 de 6 pulgadas de longitud, con valor de división de 0.01 mm, se mide el diámetro polar y

ecuatorial del fruto de la higuierilla (Figura 2). Para la medición de la masa se utiliza una balanza analítica Ohaus Explorer de 4200 g de capacidad, con un valor de precisión de 0.01 g (Figura 3). Para ello se toman 4 muestras de 25 cápsulas. Determinar el promedio y la desviación estándar según la metodología propuesta por Canavos (1999) e Infante y Zárate (2000).



Figura 2. Determinación de las dimensiones de la cápsula y de la semilla.



Figura 3. Determinación de la masa de la cápsula y de la semilla.

Dimensiones de los granos

Para determinar las dimensiones del grano es necesario seleccionar 100 granos de las muestras utilizadas en la determinación de la densidad del grano, para ello es necesario tomar 25 granos de forma aleatoria en cada muestra. El valor de la longitud, ancho y espesor del grano, corresponden a los valores máximos medidos en la semilla para cada caso, y su valor se especifica en milímetros. Calcular la media y la desviación estándar de los granos.

Ángulo de reposo

Para la determinación del ángulo de reposo se seleccionaron al azar un grupo de cápsulas de higuierilla tipo II o de granos para posteriormente colocarlo sobre un plano inclinado (Figura 4) con diferentes superficies de madera, caucho y metal. Posteriormente se comienza a levantar la superficie hasta que comienzan a deslizarse el primer fruto y se toma la lectura indicada por la aguja en el transportador.



Figura 4. Determinación del ángulo de reposo de las cápsulas de higuierilla tipo II.

Resistencia a la compresión.

Se seleccionaron 30 frutos de higuera tipo I por tratamiento (una por cada intervalo de longitud) eligiendo 2 tratamientos (posición horizontal y vertical del fruto), que se montaron en una máquina universal Instron modelo 3382 (Figura 5) accionada por medio de una computadora equipada con el software BLUEHILL, utilizando dos platos paralelos de 15 cm de diámetro, con una capacidad de 100 kN y una velocidad de cruceta de 25 mm·min⁻¹. La prueba se realizó a 25 °C y 65% de humedad relativa, determinando la carga máxima soportada por la cascara del fruto y el módulo de Young.

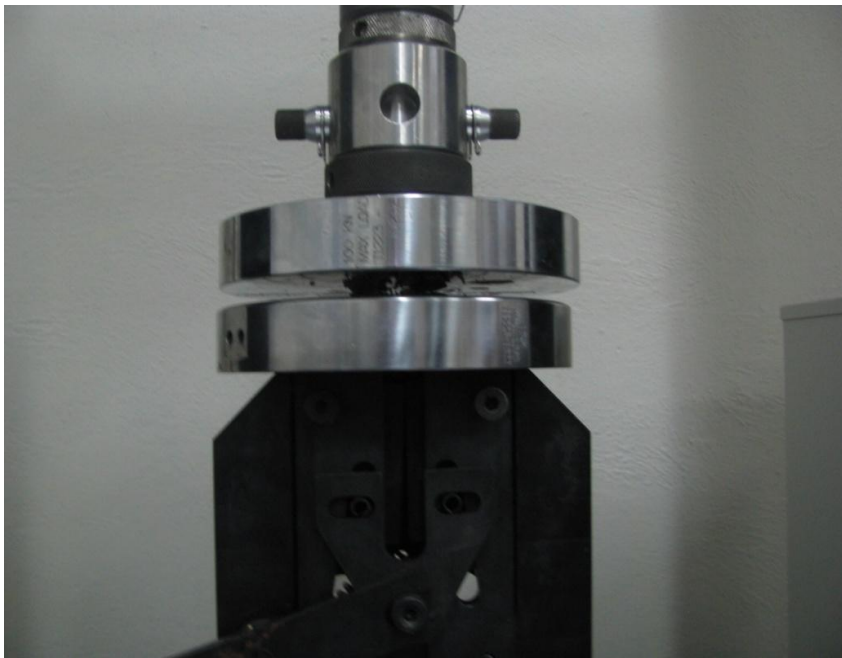


Figura 5. Compresión del fruto de la higuera tipo I: posición vertical y horizontal.

2.5. Resultados y discusión

En los Cuadro 1, 2 y 3 se muestran las principales propiedades dimensionales de las cápsulas y granos de la higuera, en las cuales se aprecia que el tipo I (criolla) presenta menores dimensiones con respecto al tipo II (roja). El material I presenta la forma de una esfera, mientras que el material II, es un elipsoide. En el material silvestre el espesor de la cáscara es mayor comparado con la roja, por lo cual se puede descascarar a mayores revoluciones por minuto del órgano de trabajo.

Los resultados del procesamiento estadísticos de los datos obtenidos durante la determinación del ángulo de fricción estático de las cápsulas sobre acero, madera y hule se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 1. Estadígrafos de las principales propiedades físico-mecánicas de la higuera tipo I (criolla).

Parámetro	Diámetro ecuatorial, mm	Diámetro polar, mm	Espesor cáscara, mm	Masa fruto, g	Masa semillas, g	Masa cáscara, g
Promedio	16.83	17.42	1.25	1.25	0.67	0.59
Desv. est.	0.86	0.89	0.21	0.27	0.20	0.17
Máximo	18.83	19.5	1.84	1.7	1	0.9
Mínimo	13.7	15.36	0.8	0.5	0.2	0.3

Cuadro 2. Estadígrafos de las principales propiedades físico-mecánicas de la higuera tipo II (roja).

Parámetro	Diámetro ecuatorial, mm	Diámetro polar, mm	Espesor cáscara, mm	Masa fruto, g	Masa semillas, g	Masa cáscara, g
Promedio	21.81	25.59	0.76	3.32	2.10	1.22
Desv. est.	1.43	2.06	0.16	0.87	0.68	0.26
Máximo	25.57	30.54	1.23	5.5	3.4	2.1
Mínimo	18.21	18.45	0.36	1.1	0.5	0.5

Cuadro 3. Estadígrafos de las dimensiones de las semillas de la higuera tipo I y II.

Parámetro	Tipo I			Tipo II		
	Longitud, mm	Ancho, mm	Espesor, mm	Longitud, mm	Ancho, mm	Espesor, mm
Promedio	11.92	7.62	5.40	17.76	11.71	7.90
Desv. est.	0.81	0.40	0.23	1.29	0.95	0.67
Máximo	13.6	8.38	6.14	20.04	13.55	9.98
Mínimo	9.94	6.69	4.87	11.9	8.59	5.25

Cuadro 4. Ángulo de reposo del fruto de higuera tipo II (roja) en diferentes superficies de fricción.

Superficies	Media, grado	Desviación estándar	Error estándar, %	Coef. de variación, %
Metal	21.58	2.34	21.35	10.84
Madera	25.35	1.55	14.13	6.11
Hule	23.39	1.55	14.12	6.61

Para la búsqueda de las condiciones y regímenes de trabajo de las máquinas, con las cuales se realiza la compresión del material de trabajo, es necesario estudiar correctamente las propiedades físico-mecánicas, con el fin de hacerlo con el mínimo gasto de energía. Los diagramas de trabajo de compresión del fruto de la higuera en las posiciones horizontales y verticales de los ejes de coordenadas: fuerza de compresión (N) por la vertical y la extensión (mm) por la horizontal se muestra en la Figura 6 y 7. En estas se observa que se requiere una mayor fuerza de compresión para romper la cascarilla del fruto en la posición del fruto vertical (diámetro polar del fruto) que en la posición horizontal (diámetro ecuatorial). Además en esta última posición es más alta la posibilidad de dañar la semilla mecánicamente. En el Cuadro 5 se muestra la variación del módulo de Young de la cápsula de higuera.

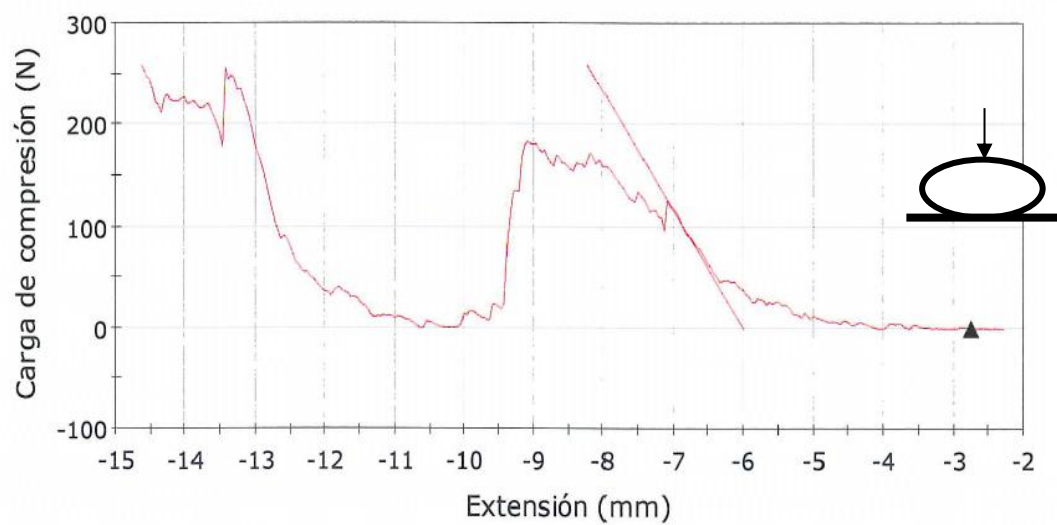


Figura 6. Diagrama de compresión del fruto de la higuera tipo I en posición horizontal.

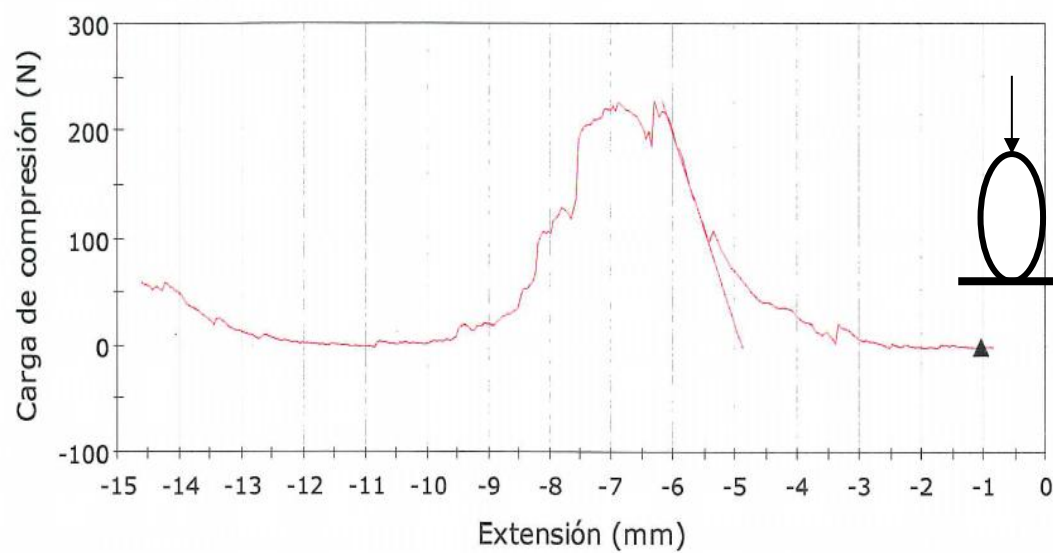


Figura 7. Diagrama de compresión del fruto de la higuera tipo I en posición vertical.

Cuadro 5. Módulo de Young de la higuera tipo I.

No	Parámetro	Módulo de Young, Pa
1	Valor máximo	18000000
2	Valor mínimo	2700000
3	Valores medios	11.778x10 ⁶
4	Desviación estándar	3169363.43

2.6. Conclusiones

Como resultado de la investigación fueron determinadas las principales propiedades dimensionales y físico-mecánicas de los frutos de la higuera (*Ricinus communis L.*), requeridas para los estudios relacionados con la postcosecha mecanizada de este producto.

Se determinó la carga máxima que soporta el fruto a compresión en dos posiciones para el descascarado del fruto de la higuera tipo I, siendo menor la carga aplicada en el diámetro ecuatorial, pero existe mayor riesgo de dañar mecánicamente la semilla. Lo ideal para efectuar el descascarado es orientar el fruto en la posición polar, para no dañar mecánicamente el grano.

2.7. Literatura citada

- Almeida, F. A. C; M.E.C., Oliveira; P.G.J., Pereira; J.P.G, Pereira; R.F., Costa; A.F., Neto; F.M.M., Oliveira. 2007. Avaliação da debulha mecânica em sementes de milho. *Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 11(2): 217-221.
- Bouza M., Y.; A. Martínez R.; D. Mederos L.; P. Pérez B. 2007. Determinación de propiedades físico-mecánicas de los frutos del Nim relacionadas con la cosecha mecanizada por vibración. *Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 16(3): 37-42.
- Canavos, G.C. 1999. Probabilidad y estadística. Ed Mc Graw Hill. México. 651 p.
- Fanan, S.; Fratin, M. P.; Paes de Camargo, M. B. e Galbieri, R. 2009. Descrição de características agronômicas e avaliação de épocas de colheita na produtividade da mamoneira cultivar IAC 2028. *Bragantia*. 68(2):415-422.
- Ferreira, I. C.; Silva, R. P.; Lopes, A. e Furlani, C. E. A. 2007 .Perdas quantitativas na colheita de soja em função da velocidade de deslocamento e regulagens no sistema de trilha. *Engenharia na Agricultura*. 15(2): 141-150.
- García, R. F.; Queiroz, D. M.; Fernandes, H. C. e Miyagaki, O. H. 2003. Simulação do comportamento dinâmico de um conjunto trator-colhedora de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 7(3): 565-571.
- Goytia, J. M. A.; Gallegos, G. C. H. y Núñez, C. C. A. 2011. Relación entre variables climáticas con la morfología y contenido de aceite de semillas de higuierilla (*Ricinus communis* L.) de Chiapas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17(1): 41-48.

- Guzmán, S. E. 1970. El cultivo de la higuera en Oaxaca. Dirección General de Agricultura. Departamento de Extensión Agrícola. Sección de divulgación. Chapingo, Texcoco, Edo de México. 5 p.
- Hussain, A. A. M.; Sabur, M. A. and Rahman, M. M. 1980. Design and construction of a manually operated castorbean-cum-sunflower seed dehuller. Agricultural Mechanization in Asia. 11(2): 83-84.
- Infante, G. S. y Zárate de, L. G. P. 2000. Métodos estadísticos. Ed. Trillas. México. 643 p.
- López, B. V.; Villaseñor, P. C. A. y Pérez, L. A. 2011. Propiedades mecánicas y respuesta fisiológica de frutos de chicozapote bajo compresión axial. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 20(3): 73-80.
- Martínez B., E. 1970. Prueba comparativa de adaptación y rendimiento de 2 variedades y 4 híbridos de higuera enana en el municipio de General Escobedo N. L. Tesis Profesional. Universidad de Nuevo León. Facultad de agronomía. Monterrey, N. L. 102 p.
- Mayorga, H. E; Rössel, K. D.; Ortiz, L. H.; Quero, C. A. R. y Amante, O. A. 2004. Análisis comparativo en la calidad de fibra de *agave lechuguilla* torr., procesada manual y mecánicamente. Agrociencia. 38 (2): 219 – 225.
- Severino, L.S.; Albuquerque, W. G.; M.A.O, Freire; J.A., Gomes; M. Milani. 2009. Variabilidade no percentual de tegumento da semente de mamona e sua importância para o melhoramento. Revista Ciência Agronômica. 40(1): 94-98.
- Souza, A. C.M.; Pinto, de C. F. de A.; Mantovani, Ch. E. e Queiroz, D.M. 1998. Simulação e análise do processo de trilha e separação mecânica do milho-pipoca. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2(2): 212-218.

- Scholz, V. e Da Silva, N. J. 2007. Óleo de mamona como combustível: fatos, perspectivas e riscos. *Engenharia na Agricultura*. 15(2): 168-172.
- Schoenleber, L. G.; Bouse, L. F. 1964. Mechanized Harvesting of Castor Beans. *Transactions of the ASABE*. 7(2): 97-99.
- Tobar, H. J. R. 1981. Evaluación de tres densidades de siembra en variedades guatemaltecas e híbridos sur africanos del cultivo de higuerillo (*Ricinus communis* L.). Tesis Profesional. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, Centro América. 152 p.
- Valdés, H. P.A.; González, C. D. y Martínez, R. A. 2008. Determinación experimental de propiedades físico-mecánicas de la caña de azúcar para su procesamiento en picadoras de forraje. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 17(2): 1-6.
- Vázquez, G. F. 1993. El cultivo de la higuerilla (*Ricinus communis* L.) en México. Tesis Profesional. Chapingo, México. 165 p.

CAPITULO 3.

PROPIEDADES AERODINÁMICAS DE LA SEMILLA NO DESCASCARADA, GRANO Y CÁSCARA DE LA HIGUERILLA⁶

AERODYNAMIC PROPERTIES OF THE CAPSULE, THE GRAIN AND THE HUSK OF CASTOR BEAN (*Ricinus communis L.*)

3.1. Resumen

El objetivo del presente estudio fue determinar las propiedades aerodinámicas de las semillas con cáscara (valva), el grano y la cáscara del sistema de limpieza de una máquina descascaradora de higuera (*Ricinus communis L.*), mediante una corriente de aire de flujo vertical, utilizando un diseño experimental de bloques al azar, con método factorial de 3x3 y 30 réplicas. Los datos se analizaron mediante el análisis de varianza y las medias de los tratamientos se compararon por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), para los casos que presentaron diferencias significativas de los efectos principales. Las variables fueron la velocidad crítica, el coeficiente de arrastre y el aerodinámico del aire para la valva, el grano y la cáscara en el tubo de separación. Los resultados muestran que la velocidad crítica de las semillas con cáscara en el flujo de aire fue de 8.55 a 9.15 ms^{-1} , el grano 10.29 a 11.43 ms^{-1} y la cáscara desde 4.55 hasta 5.03 ms^{-1} , existiendo diferencias significativas entre estos. El coeficiente aerodinámico promedio de las valvas fueron de 0.08 a 0.14 m^{-1} , el grano desde 0.08 a 0.09 m^{-1} y la cáscara de 0.39 a 0.48 m^{-1} , siendo estadísticamente significativos. Por lo tanto, es

⁶ Pedro Cruz Meza, Samuel García Silva, Gilberto de Jesús López Canteñs, Conrado Márquez Rosano. Artículo enviado a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. ISSN: 2007-0934.

posible separar los granos, valvas y cáscaras utilizando la velocidad del aire de las pruebas experimentales en tubos cilíndricos de separación.

Palabras clave: *Ricinus communis*, coeficiente de arrastre, coeficiente aerodinámico, velocidad terminal.

3.2. Abstract

The aim of this study was to determine the aerodynamic properties of seeds in shell (valve), grain and husk for cleaning system a sheller castor machine (*Ricinus communis* L.), by an air stream of vertical flow using a randomized block design experimental with factorial method 3 x 3 and 30 replications. Data obtained was used to perform analysis of variance and means were compared by the Tukey test ($p \leq 0.05$) for cases that showed significant differences in the main effects. The variables were the critical velocity, the air drag coefficient and the sailing coefficient of seeds in shell, the grain and the husk. The results show that the critical speed of the seeds in shell were 8.55 to 9.15 ms^{-1} , the grain 10.29 to 11.40 ms^{-1} and the husk from 4.55 to 5.03 ms^{-1} , with significant differences between these. The air drag coefficient average of seed in shell was 0.08 and 0.14 m^{-1} , the grain from 0.08 to 0.09 m^{-1} and the husk of 0.39 to 0.48 m^{-1} , being statistically significant. Therefore, it should be possible to separate the grains, the seeds in shell and husk using air velocity of experimental tests in to separation cylindrical tubes.

Key words: *Ricinus communis*, air drag coefficient, sailing coefficient, terminal velocity.

3.3. Introducción

En los últimos años la producción de biocombustibles cobra importancia, pues se está en la búsqueda de nuevas fuentes de energía y donde la planta de higuera (*Ricinus communis* L.) parece ser una opción viable en términos económicos, de la cual se obtiene el aceite de ricino, que presenta gran densidad y conserva su viscosidad a diferentes temperaturas y sólo se congela a los -10 °C (Goytia *et al.*, 2011). Para abatir los costos de producción es necesario mecanizar el sistema de cosecha y poscosecha del cultivo, ya que demanda mucha mano de obra (Duraismy y Manian, 1990; Cruz *et al.*, 2012; Cabral- de França *et al.*, 2013).

El material descascarado es una mezcla de granos enteros y partidos a causa de defectos mecánicos y biológicos, y con diferentes tipos de materias extrañas. En la preparación del grano para su conservación y utilización es necesario separar las materias extrañas y seleccionarlo. La limpieza y selección consiste en la separación de la mezcla en diferentes fracciones que se distinguen por varias propiedades o índices del grano: dimensiones geométricas, sus propiedades aerodinámicas, peso específico, características de su superficie, forma, color y otros. Durante la limpieza del material cosechado se separan diferentes materias extrañas, tales como semillas de malezas y otros cultivos, así como partículas minerales y orgánicas.

El conocimiento de las propiedades físicas, mecánicas y aerodinámicas de los granos es esencial para el diseño, construcción y operación de los equipos para limpieza, secado y almacenamiento de materiales agrícolas (Teixeira *et al.*, 2003). Esto es muy importante, para la fabricación de maquinaria de alta eficiencia, bajo costos y tiempo corto en el desarrollo del producto (Ueka *et al.*, 2014).

El conocimiento de la velocidad terminal de un producto y la fuerza de arrastre de las partículas situadas en el movimiento de un fluido son necesarios en aplicaciones ingenieriles, tales como en el transporte neumático e hidráulico de un producto y en la separación y clasificación de materiales agrícolas.

Existen pocos trabajos de investigación en cuanto a las propiedades aerodinámicas de los productos agrícolas. Bosoi *et al.* (1991) reportó la velocidad terminal ($8.9 - 11.5 \text{ ms}^{-1}$), el coeficiente de arrastre ($0.184 - 0.265$) y el coeficiente aerodinámico ($0.075 - 0.12 \text{ m}^{-1}$) del grano de trigo. Kram y Szot (1999) determinó la velocidad crítica ($3.10 - 4.25 \text{ ms}^{-1}$), el coeficiente de arrastre ($0.6143 - 1.0245$) y el coeficiente aerodinámico ($0.5432 - 1.0208 \text{ m}^{-1}$) del amaranto. La velocidad terminal El-Sayed *et al.* (2001) la determinó para tres variedades de cacahuate (fruto: $7.7 - 12.9 \text{ ms}^{-1}$, cáscara: $3.1 - 4.1 \text{ ms}^{-1}$), mientras que Teixeira *et al.* (2003) lo hizo para los granos de maíz ($8.25 - 8.92 \text{ ms}^{-1}$) y Couto *et al.* (2003) lo determinó para el café ($10.2 - 16.8 \text{ ms}^{-1}$). Konno *et al.* (2010) investigó sobre la velocidad crítica y el coeficiente de arrastre de la hoja y la baya del arándano en dos posiciones. La falta de conocimiento en las propiedades aerodinámicas de la higuierilla motivó el desarrollo del presente trabajo.

Según Couto *et al.* (2003) y Couto *et al.* (2004) las determinaciones experimentales de la velocidad terminal o crítica de algunos tipos de granos y semillas son objeto de investigación para cultivos no comerciales.

El objetivo del presente estudio fue determinar las propiedades físicas y aerodinámicas de los granos, cáscaras y semillas sin descascarar (valvas) de higuierilla (*Ricinus communis L.*), con la finalidad de su separación en una corriente de aire para el sistema de limpieza de una máquina descascaradora.

3.4. Materiales y métodos

Los frutos de higuera fueron recolectados en la población de Santa María Roaló, Estado de Oaxaca, México, y se clasificaron en tres tamaños: chicos, medianos y grandes. El diseño experimental fue de bloques al azar, con método factorial de 3x3 (tres materiales y tres tamaños), tuvo nueve variantes y 30 réplicas. Las variantes se formaron por la combinación del tipo de material (la valva, el grano y la cáscara) y tres combinaciones de sus dimensiones (chico, mediano y grande) (Cuadro 6). Las cápsulas se descascararon mediante una máquina (Figura 8) y se tomaron aleatoriamente muestras de granos, cáscaras y semillas con cáscara (valvas).

Cuadro 6. Tratamientos para evaluar la velocidad crítica con sus respectivos materiales y combinaciones de sus dimensiones.

Tratamiento	Tipo de material	Combinación de sus dimensiones
T ₁	Semillas con cáscara	Chico
T ₂	Semillas con cáscara	Mediano
T ₃	Semillas con cáscara	Grande
T ₄	Granos	Chico
T ₅	Granos	Mediano
T ₆	Granos	Grande
T ₇	Cáscara	Chico
T ₈	Cáscara	Mediano
T ₉	Cáscara	Grande



Figura 8. Máquina descascaradora de frutos de higuera.

Propiedades físicas de la semilla no descascarada, grano y cáscara

Las propiedades físicas de los granos, cáscaras y valvas analizadas y determinadas fueron longitud, anchura, espesor, masa, diámetro geométrico medio y área proyectada. Para la medición de las dimensiones de los granos, cáscaras y valvas se utilizó un vernier digital marca Mitutoyo con precisión de 0.01 mm. Para la medición de la masa se utilizó una balanza (Ohaus) con precisión de 0.01 g.

Para la determinación del contenido de humedad de los granos, cáscaras y valvas se tomaron aproximadamente 50, 25 y 10 g respectivamente de cada muestra, se pesaron y colocaron en la estufa marca Lab-Line Instruments a 75 °C por 24 h. Las muestras secas se pesaron y el contenido de humedad se determinó por diferencia de pesos, usando la fórmula siguiente:

$$H = \frac{W_1 - W_2}{W_1} 100 \quad (1)$$

donde H- contenido de humedad, %; W_1 -masa de la muestra húmeda, g; y W_2 - masa de la muestra seca, g.

El diámetro geométrico medio (D_g) y superficie proyectada (S_p), se calcularon mediante las siguientes ecuaciones (Mohsenin, 1986; Tabak *et al.* 2002; Ghafori *et al.*, 2011):

$$D_g = \sqrt[3]{L \cdot W \cdot T} \quad (2)$$

$$S_p = \pi \frac{D_g^2}{4} \quad (3)$$

donde L- longitud del espécimen, mm; W- anchura del espécimen, mm; T- espesor del espécimen, mm.

Propiedades aerodinámicas de la semilla no descascarada, grano y cáscara

La velocidad crítica o terminal de los granos, cáscaras y carpelos v_t , se midió utilizando una columna de aire (Figura 9). Un ventilador centrífugo se utilizó para generar la corriente de aire hacia un tubo de acrílico de 152.4 mm de diámetro, colocado en posición vertical. El caudal de aire se reguló ajustando la velocidad del motor marca Siemens de 1 hp del ventilador, mediante un variador de frecuencia marca Danfoss modelo VLT y mediante una compuerta colocada a la entrada de éste.

Una muestra de material se colocó en la parte inferior del tubo, para cada ensayo. El fluido de aire se aplicó para suspender el espécimen en la corriente. La velocidad del fluido para la suspensión del grano, la cáscara y la valva se midió con un anemómetro electrónico digital de antena de hilo caliente marca Lutron modelo YK-2005AH (Tabak y Wolf, 1998).

Las lecturas de la velocidad se comprobaron, al instalar un medidor de presión marca Comark modelo C9955 en la salida del tubo de acrílico. La velocidad crítica se calculó mediante la siguiente expresión (Kram y Szot, 1999):

$$v_t = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{din}}{\rho}} \quad (4)$$

donde v_t - velocidad terminal o crítica, ms^{-1} ; ρ - densidad del aire, kg m^{-3} ; P_{din} - carga dinámica o presión dinámica, Nm^{-2} .



Figura 9. Dispositivo para determinar la velocidad crítica del aire. 1 –variador de velocidad, 2- ventilador, 3- anemómetro de hilo caliente, 4- manómetro diferencial de presión, 5- tubo de Prandtl.

El número de Reynolds (R_e) se calculó mediante la siguiente expresión (Konno *et al.*, 2010):

$$R_e = \frac{D_g \cdot v_t}{\mu} \quad (5)$$

donde μ - viscosidad cinemática del aire, m^2s^{-1} .

En el cálculo del número de Reynolds se utilizó la densidad de 1.2 kgm^{-3} y la viscosidad cinemática de $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2s^{-1}$ del aire a una temperatura de 20°C (Konno *et al.*, 2010).

El coeficiente aerodinámico C_a , se expresa por la siguiente expresión (Bosoi *et al.*, 1991; Kram y Szot, 1999; El-Sayet *et al.*, 2001):

$$C_a = \frac{g}{v_t^2} \quad (6)$$

donde C_a - coeficiente aerodinámico, m^{-1} ; g - aceleración de la gravedad, $m \text{ s}^{-2}$.

El coeficiente de arrastre C_D , caracteriza la interacción entre la partícula y el flujo de aire y se expresa mediante la siguiente ecuación (Bosoi *et al.*, 1991; El-Sayet *et al.*, 2001):

$$C_D = \frac{C_a \cdot m}{\rho \cdot S_p} \quad (7)$$

donde m - masa de la partícula, kg ; S_p — área o superficie proyectada, m^2 .

Análisis de datos

Los datos experimentales obtenidos fueron procesados estadísticamente en Microsoft Excel 2010, realizando un análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo. Las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey, para los casos que presentaron diferencias significativas de los efectos principales. En todos los

casos el cálculo se efectuó con un nivel de confianza del 95 % y un error permisible de la media del 5%.

3.5. Resultados y discusión

Propiedades físicas de la semilla no descascarada, el grano y la cáscara

En la Figura 10 se muestran los diferentes tipos de materiales utilizados en la determinación de las propiedades aerodinámicas de la higuera.

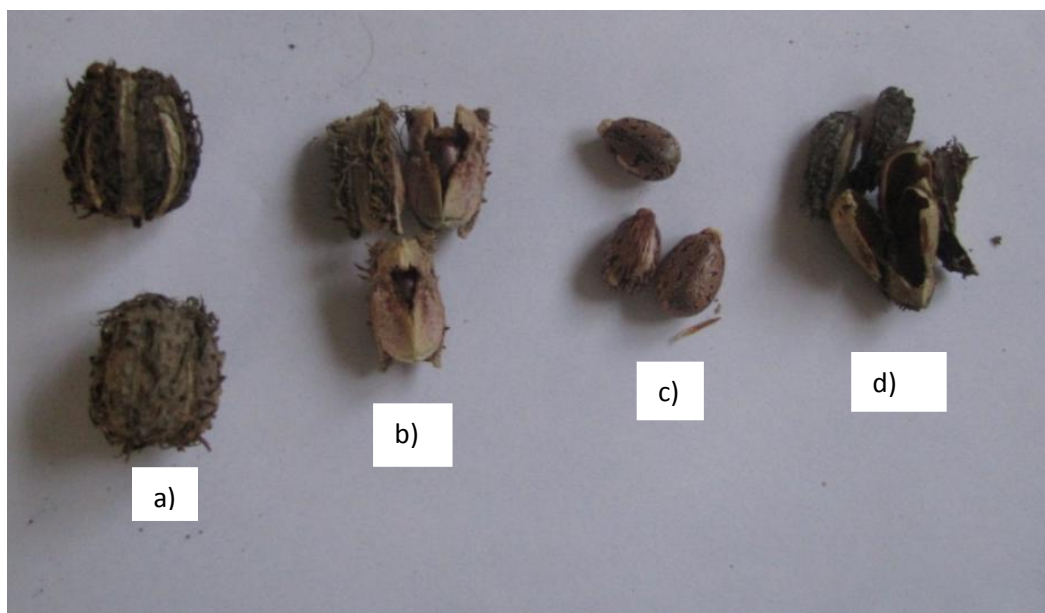


Figura 10. Tipos de materiales de higuera; a) cápsulas; b) valva; c) granos y d) cáscara.

En los Cuadros 7 y 8 se muestran los principales estadígrafos tales como los valores promedios y la desviación estándar de los materiales de estudio.

Cuadro 7. Propiedades físicas del grano, valva y cáscara de la higuera.

Material	Longitud, mm		Anchura, mm		Espesor, mm		Masa, g	
	Prom	D. Est.	Prom.	D. Est.	Prom.	D.	Prom	D.
	.					Est.	.	Est.
Valva chico	16.31	0.66	9.73	0.06	7.76	0.11	0.42	0.05
Valva mediano	17.76	0.45	11.18	0.17	7.66	0.44	0.7	0.01
Valva grande	20.11	1.58	11.86	0.99	8.98	0.86	0.65	0.18
Grano chico	12.12	0.42	7.32	0.42	5.27	0.34	0.24	0.03
Grano mediano	14.52	1	8.85	0.6	6.2	0.45	0.4	0.08
Grano grande	17.76	0.45	11.18	0.17	7.66	0.44	0.7	0.01
Cáscara chica	16.88	0.34	7.31	0.42	5.21	0.23	0.1	0.02
Cáscara mediana	18.85	1.26	7.72	0.33	5.74	0.57	0.11	0.02
Cáscara grande	24.11	0.79	9.14	0.29	6.93	0.1	0.19	0.01

Cuadro 8. Cálculo del diámetro geométrico y la superficie proyectada del grano, la valva y la cáscara.

Material	Diámetro geométrico (D_g), mm		Superficie proyectada (S_p), mm ²	
	X	DS	X	DS
Valva	12.79	3.68	128.49	74.48
Grano	9.51	2.92	71.06	45.24
Cáscara	9.89	3.21	76.88	50.00

La humedad promedio de las valvas, el grano y la cáscara fueron 6.27 ± 0.30 , 4.64 ± 0.26 y 7.40 ± 0.24 respectivamente.

Los resultados experimentales son similares para los granos chicos de higuierilla con los de la variedad BRS Energía al de Cabral- de França *et al.* (2013), mientras que las valvas chicas coinciden ligeramente con las variedades Ojji y Evahura reportadas por Olaoye (2000).

Propiedades aerodinámicas de la valva, el grano y la cáscara

La propiedad aerodinámica más importante es la velocidad crítica o terminal (Cuadro 9), la cual fue para el grano, la valva y la cáscara de la higuierilla de 10.87 , 8.90 y 4.72 ms^{-1} respectivamente, mientras que con el tubo de Prandtl, en la parte superior de la columna de aire de 10.58 , 8.75 y 4.92 ms^{-1} para los mismos materiales. La velocidad terminal media para los materiales chicos, medianos y grandes fue de 7.96 , 8.14 y 8.39 ms^{-1} .

En el cálculo del número de Reynolds de la expresión (5) se tomó el promedio del diámetro geométrico de los especímenes chico, mediano y grande para la cáscara, la valva y el grano. El número de Reynolds caracteriza la pérdida de energía causada por los efectos viscosos, es decir, el tipo de flujo dentro de una tubería, si es laminar o turbulento.

Cuadro 9. Variantes de la velocidad terminal media de la valva, el grano y la cáscara.

Variante	Medias de los tratamientos, ms ⁻¹
Valva -chico	8.55
Valva - mediano	8.99
Valva - grande	9.15
Grano - chico	10.29
Grano - mediano	10.89
Grano - grande	11.43
Cáscara - chico	5.03
Cáscara - mediano	4.55
Cáscara - grande	4.58

En el Cuadro 10 se muestra los valores del número de Reynolds en función de las dimensiones del material de estudio.

Cuadro 10. Número de Reynolds promedio del material de estudio.

Tipo de material	Chico	Mediano	Grande
Valva	6.08E+03	7.72E+03	8.76E+03
Grano	5.33E+03	6.73E+03	8.76E+03
Cáscara	2.89E+03	2.81E+03	3.51E+03
Promedio total	4.77E+03	5.76E+03	7.01E+03

En la Figura 11 se muestra la variación de la velocidad terminal de los diferentes materiales en función del número de Reynolds de estos.

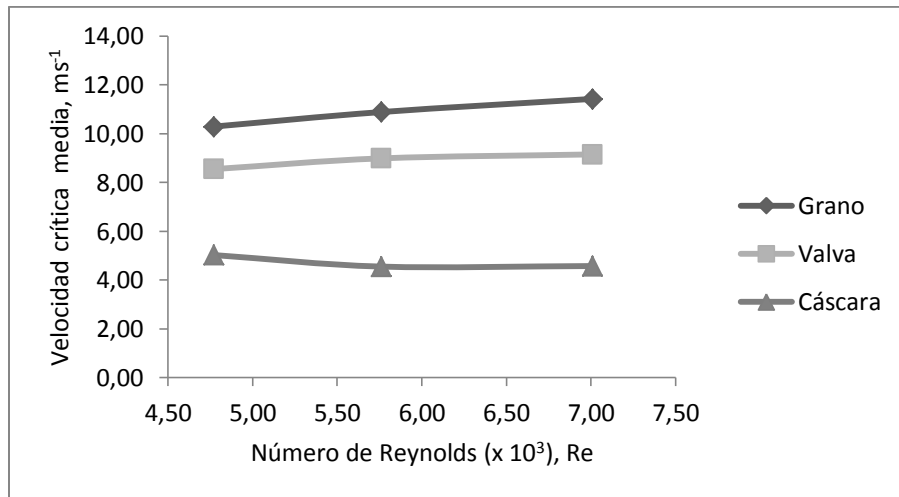


Figura 11. Gráfica de la velocidad crítica del material contra número de Reynolds.

Según el análisis de varianza sobre la velocidad crítica en la columna de aire, da como resultado que existen diferencias significativas entre los tratamientos. El análisis de las medias de la cáscara, la valva y el grano por el método de Tukey muestra que difieren significativamente en las diferentes combinaciones. Mientras que, las dimensiones de las partículas chicas y medianas no parecen diferir una de otra en cuanto al efecto en la velocidad crítica, pero ambas difieren de la mayor, es decir, se demuestra la evidencia de que es posible separar los componentes de la mezcla mediante la corriente de aire. Los resultados experimentales del grano de higuierilla, coincide con el promedio obtenido por El-Sayed *et al.* (2001) para las variedades Egipcia, Americana y China de cacahuete. Los valores experimentales de la cáscara de higuierilla varían ligeramente con el encontrado por El-Sayed *et al.* (2001) para la cáscara del cacahuete, pero

difieren aproximadamente dos veces de los encontrados por Konno *et al.* (2010) para las hojas del arándano. Los datos de la velocidad crítica de las valvas de higuera son semejantes a los obtenidos por Teixeira *et al.* (2003) para los granos de maíz de las variedades AG401 y HMD7479.

El coeficiente de arrastre C_D , se calcula con la expresión (7). En el Cuadro 11 se muestra el coeficiente de arrastre de la valva, el grano y la cáscara, los valores promedio fueron 0.48, 0.40 y 0.68, respectivamente.

Cuadro 11. Variantes del coeficiente de arrastre medio de la valva, el grano y la cáscara.

Variante	Medias de los tratamientos, adim.
Valva -chico	0.52
Valva - mediano	0.50
Valva - grande	0.42
Grano - chico	0.38
Grano - mediano	0.40
Grano - grande	0.42
Cáscara - chico	0.54
Cáscara - mediano	0.79
Cáscara - grande	0.70

En la Figura 12 se muestra la variación del coeficiente de arrastre de los diferentes materiales en función del número de Reynolds.

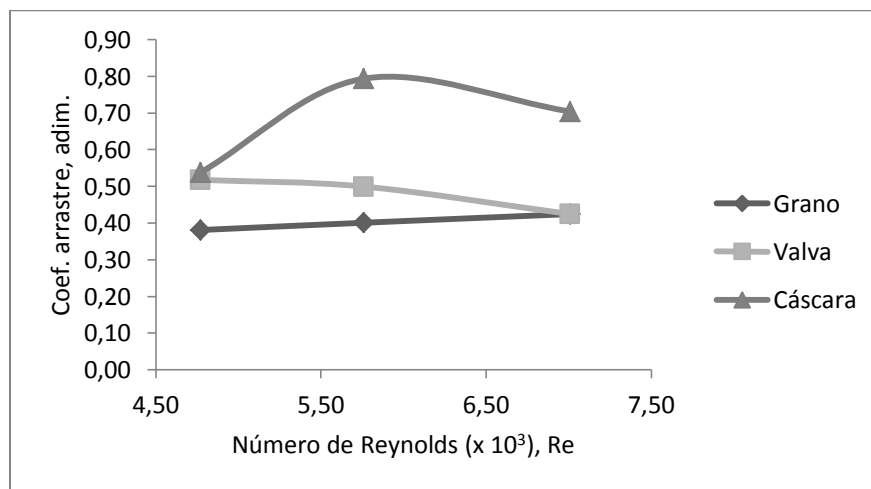


Figura 12. Gráfica del coeficiente de arrastre del material contra número de Reynolds.

El análisis de las medias del tipo de material (grano, valva y cáscara) y el número de Reynolds por el método de Tukey ($p \leq 0.05$) muestran que las diferentes combinaciones de pares difieren significativamente en los tamaños chicos y medianos pero no, en la valva y el grano grande, de ahí de que no se puedan separar por corriente de aire las valvas de los granos. Los resultados experimentales del coeficiente de arrastre para el grano y la valva son el doble del obtenido por Bosoi *et al.* (1991) para el trigo. Mientras que la cáscara presentó un C_D 3.5 veces menor que la hoja del arándano (Konno *et al.*, 2010). El Coeficiente aerodinámico de la cáscara fue aproximadamente 3 veces mayor que el reportado por Molina–Aiz *et al.* (2006) para las hojas de los cultivos de tomate, pimiento, berenjena y frijol. Esto se debe a que presentan mayor área de contacto.

El coeficiente aerodinámico o de vuelo se calcula con la expresión (6). En el Cuadro 12 se muestra el coeficiente aerodinámico siendo la media de 0.11, 0.08 y 0.45 m⁻¹ para la valva, el grano y la cáscara respectivamente.

Cuadro 12. Variantes del coeficiente aerodinámico medio de la valva, el grano y la cáscara.

Variante	Medias de los tratamientos, adim.
Valva -chico	0.14
Valva - mediano	0.12
Valva - grande	0.08
Grano - chico	0.09
Grano - mediano	0.08
Grano - grande	0.08
Cáscara - chico	0.39
Cáscara - mediano	0.48
Cáscara - grande	0.48

En la Figura 13 se muestra la variación del coeficiente aerodinámico de los diferentes materiales en función del número de Reynolds. El coeficiente aerodinámico del grano y la valva son similares, sobre todo para las dimensiones mayores de ahí, lo difícil de separar la mezcla por medio de una corriente de aire.

El análisis de las medias del tipo de material (grano, valva y cáscara) por el método de Tukey ($p \leq 0.05$) muestra que las diferentes combinaciones de pares difieren

significativamente. El número de Reynolds para frutos chicos y grandes difieren significativamente uno de otro, pero ambos de los medianos en cuanto al coeficiente aerodinámico promedio. Los resultados experimentales del grano y la valva son semejantes a los obtenidos por Bosoi *et al.* (1991) para el trigo.

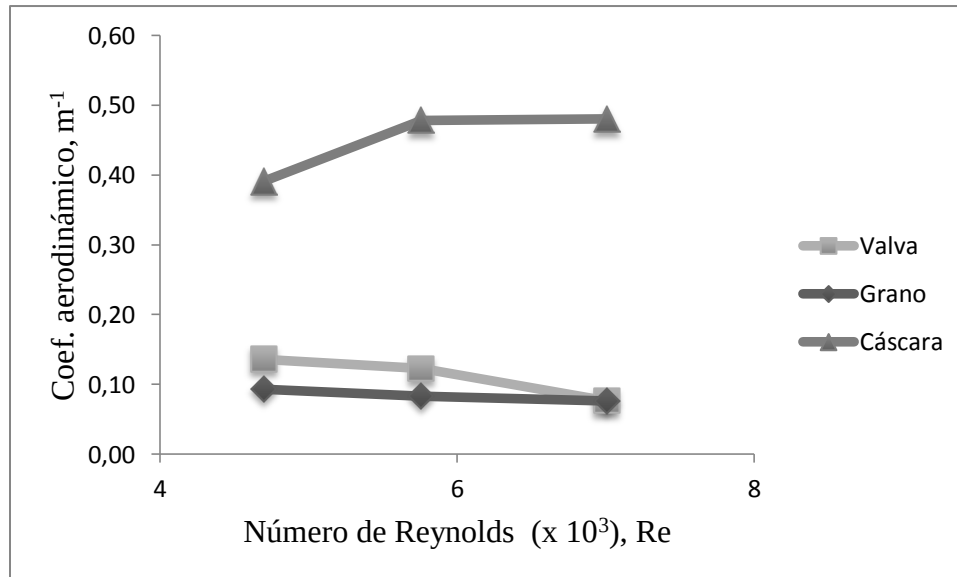


Figura 13. Gráfica del coeficiente aerodinámico del material contra número de Reynolds

3.6. Conclusiones

Las principales propiedades aerodinámicas del material biológico depende de los parámetros siguientes: superficie, longitud y masa. El valor de la velocidad crítica de las cáscaras de la higerilla son menores a la de las valvas y los granos. El coeficiente de arrastre y aerodinámico son menores para las valvas y granos, por lo cual es posible separar por medio de la corriente de aire las cáscaras y esto es útil para el diseño de los sistemas de limpieza de granos en las máquinas descascaradoras de higerilla o

para los centros de beneficiado de semillas. La velocidad más adecuada de la corriente de aire en la columna, para efectos de separación de valvas, granos y cáscaras es de 6 a 7 ms⁻¹. La mezcla de granos y valvas se puede separar por otros medios mecánicos como son las cribas vibrátiles.

3.7. Literatura citada

- Bosoi, E. S.; Verniaev, O. V.; Smirnov I. I. and Sultan-Shakh, E. G. 1991. Theory, construction and calculation of agricultural machines. Volume two. Russian Translations Series. Ed. Balkema/ Rotterdam. pp: 576-583.
- Cabral-de França, P. R.; Ribeiro-Ferreira, S. O. R.; Cardoso-Almeida, F. A.; Ferreira-Jerônimo, J. y Cárdenas-Olivier, N. 2013. Desarrollo y evaluación de un prototipo descascarador de frutos de *Ricinus communis* L. Agrociencia. 47(4): 361-371.
- Couto, S. M.; Magalhães, A. C.; Queiroz D. M. e Bastos, I. T. 2003. Parâmetros relevantes na determinação da velocidade terminal de frutos de café. Rev. Bras. Enge. Agríc. e Ambiental. 7(1):141-148.
- Couto, S. M.; Santos, A. E. O.; Vieira, S. M. J. e Silva, D. J. P. 2004. Determinação da força de arrasto e da velocidade terminal de frutos de café pela técnica de elementos finitos. Rev. Bras. Enge. Agríc. e Ambiental. 8(2-3):274-283.
- Cruz, M. P.; García, S. S.; Márquez, R. C. y López, C. G. 2012. Determinación de las propiedades físico-mecánicas para el descascarado de las cápsulas de la higuierilla (*Ricinus communis* L.). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Especial (4): 644-649.

- Duraisamy, V. M. and Manian, R. 1990. Design, development and evaluation of castor bean sheller. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 21(2): 41-45.
- El-Sayed, A. S.; Yahayá, R.; Wacker, P. And Kutzbach, H. D. 2001. Characteristic attributes of the peanut (*Arachis hypogaea* L.) for its separation. *International Agrophysics*. 15(4): 225-230.
- Ghafori, H.; Hemmat, A.; Borghaee, A. M. and Minaei, S. 2011. Physical properties and conveying characteristics of corn and barley seeds using a suction-type pneumatic conveying system. *African Journal of Agricultural Research*. 27(4): 5972-5977.
- Goytia, J. M. A., Gallegos, G. C. H. y Núñez, C. C. A. 2011. Relación entre variables climáticas con la morfología y contenido de aceite de semillas de higuera (*Ricinus communis* L.) de Chiapas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17(1): 41 – 48.
- Kram, B. and Szot, B. 1999. Aerodynamic and geometric properties of amaranth seeds. *International Agrophysics*. 13: 227-232.
- Konno, S.; Araya, K.; Teramoto, C.; Wakita, Y.; Nishino, T.; Suzuki, K. and Nakata, R. 2010. Haskaop harvester. Part 1: Air drag coefficient of haskaop berry and leaf. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 3(2):38-41.
- Mohsenin, N. N. 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. New York. Gordon and Breach. 742 p.
- Molina – Aiz, F. D.; Valera D. I.; Alvarez, A. J. and Maduen, A. 2006. Wind Tunnel Study of Airflow through Horticultural Crops: Determination of the Drag Coefficient. *Biosystems Engineering*. 93 (4): 447–457.

- Olaoye, J.O. 2000. Some Physical Properties of Castor Nut relevant to the Design of Processing Equipment. J. Agric. Engng Res. 77(1): 113-118.
- Tabak, S. I.; Biran, A. B.; Tabak, I. and Manor G. 2002. Airflow induced by falling cottonseed particles. Biosystems Engineering. 81(4): 395-405.
- Tabak, S. y Wolf, D. 1998. Aerodynamic properties of cottonseeds. Journal of Agricultural Engineering Research.70: 257-265.
- Teixeira, M. M; Martyn, P. J.; Hara, T. e Cunha, J. P. A. R. 2003. Propriedades físicas e aerodinâmicas aplicadas ao projeto de máquinas de limpeza para grãos de milho. Engenharia e Agricultura. 11(1-4): 52-57.
- Ueka, Y.; Matsui, E.; Inoue, E.; Mitsuoka, M. and Okayasu, T. 2014. Shape model of grain and straw using coupling elements and flight simulation of threshing unit of combine by discrete element method. Engineering in Agriculture, Environment and Food. 7: 34-39.

CAPITULO 4.

MODELO MATEMÁTICO DE UN DESCASCARADOR DE HIGUERILLA PARA PREDECIR LA EFICIENCIA DEL DESCASCARADO⁷

MATHEMATICAL MODEL OF A DEHULLING PROTOTYPE FOR PREDICTING THE HULLING EFFICIENCY OF CASTOR (*Ricinus communis* L.)

4.1. Resumen

Los modelos matemáticos contribuyen a una mejor comprensión del problema a resolver en este caso, el proceso de descascarado de los productos agrícolas y el cálculo de los principales parámetros de diseño y explotación de las máquinas agrícolas. El comportamiento de éstas, se simula en diferentes condiciones de funcionamiento antes de que entre en la producción en serie, se reducen los costos, el tiempo necesario en el desarrollo, el número de prototipos que se construyen, las pruebas y evaluaciones experimentales por realizar. Por lo tanto, se pueden desarrollar y luego optimizar, equipos más eficientes técnicamente y a menor costo. En el presente trabajo se desarrollaron tres modelos matemáticos para describir: la eficiencia del descascarado, la cantidad de grano no descascarado y el grano dañado de una maqueta experimental para descascarar las cápsulas de higuera (*Ricinus communis* L.). El modelo fue validado con los datos experimentales. La variable del modelo fue la holgura del disco y el cóncavo. Se determinó además el contenido de humedad de la cápsula, con una media de 6.27 %. Un alto coeficiente de correlación entre los valores estimados y experimentales ($R^2 = 0.9297$) a un nivel de significancia del 5% indicó que

⁷ Pedro Cruz Meza, Gilberto de Jesús López Canteñs, Samuel García Silva y Conrado Márquez Rosano. Artículo enviado a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. ISSN: 2007-0934.

la combinación de las ecuaciones mediante la suma de los componentes es apropiada para los modelos de eficiencia del descascarado y grano no dañado, mientras que para el caso del grano dañado fue muy cercano a $R^2 = 0.95$.

Palabras clave: *Ricinus communis*, simulación, modelación, maquinaria agrícola.

4.2. Abstract

Mathematical models contribute to a better understanding of the problem to solve in this case, the shucking process of agricultural products and the calculation of the main design parameters and operation of agricultural machines. The latter behavior is simulated in different operating conditions before entering mass production, reducing costs, the time required to develop, the number of prototypes are built, testing and experimental evaluations done. Therefore, can be developed and then optimize, technically more efficient and less costly equipment. Shelling efficiency, the amount of grain and not shelling damaged in an experimental model to shell capsules of castor (*Ricinus communis* L.) grain: In this paper we describe three mathematical models were developed. The model was validated with experimental data. The variable model was clearance of the disk and the concave. The moisture content of the capsule, with a mean of 6.27 % was also determined. A high correlation coefficient between estimated and experimental values ($R^2 = 0.9297$) to a level of significance of 5% indicated that the combination of equations using the sum of the components is appropriate for efficiency models shelling and grain undamaged , whereas in the case of damaged grain was very close to $R^2 = 0.95$.

Key words: *Ricinus communis*, simulation, modeling, agricultural machinery.

4.3. Introducción

La higuera (*Ricinus communis L.*) es un cultivo industrial, cuyo aceite (45-50 %) de las semillas se utiliza para producir biocombustibles a nivel internacional. En México, se cultiva desde la época colonial en la región de los Valles Centrales de Oaxaca. El cultivo tiene un bajo rendimiento de 500 a 650 kg ha⁻¹, se necesitan anualmente para la pizca y el descascarado 10.5 y 6 jornales ha⁻¹ respectivamente.

En los últimos años la producción de biodiesel cobra importancia, pues se está en la búsqueda de nuevas fuentes de energía y donde el cultivo de la higuera parece ser una opción viable en términos económicos. Para abatir los costos de producción es necesario mecanizar el sistema de cosecha y poscosecha, ya que demanda mucha mano de obra (Duraismy y Manian, 1990; Cruz *et al.*, 2012; Cabral- de França *et al.*, 2013). Específicamente en la labor del descascarado de las cápsulas de higuera. Según Shyeh *et al.* (1980) el descascarado se refiere a la eliminación de la cubierta exterior o la cáscara de las semillas. También es sinónimo de la trilla, es decir la separación de las semillas de las vainas y cápsulas secas, de algunos cultivos como soya, cacahuate, nuez e higuera. De acuerdo con Mieszkalski (1997) en el diseño conceptual de un descascarador deberán de tomarse en cuenta las características morfológicas y físicas de las semillas a descascarar, así como el órgano de trabajo de la máquina que estará en contacto con éstas.

La calidad de trabajo de los órganos descascaradores se evalúa por el número de granos sin descascarar y por los daños mecánicos que éstos sufren en el proceso de descascarado. Finalmente, y de gran importancia resulta el tener en consideración algunos aspectos relacionados con la capacidad de procesamiento del órgano

descascarador y con la energía que el proceso consume, la cual debe estar en correspondencia con el punto crítico de menor costo del descascarado para orientarse a lograr la productividad deseada. El grano dañado durante el descascarado está relacionado con la energía absorbida por este durante su impacto con el órgano de trabajo (Huynh *et al.*, 1982).

Hay pocas investigaciones sobre el modelado matemático del descascarado de los granos, como en el caso del arroz mediante dos rodillos y disco centrífugo (Shitanda *et al.*, 2001a; Shitanda *et al.*, 2001b), la palma africana con discos centrífugos con salientes (Ndukwu y Asoegwu, 2010), el cártamo y el girasol con discos centrífugos (Nolasco *et al.*, 2002; Baümler *et al.*, 2004).

El modelado matemático es una herramienta necesaria en el desarrollo de una máquina agrícola. El comportamiento de ésta se simula en diferentes condiciones de funcionamiento antes de que entre en la línea de producción, se reducen los costos, el tiempo necesario en el diseño, el número de prototipos que se construyen y las pruebas experimentales por realizar. Por lo tanto, se pueden desarrollar y luego optimizar, equipos más eficientes técnicamente y a menor costo (Alves *et al.*, 2005; Magalhães, *et al.*, 2006).

Un modelo matemático es una descripción aproximada, expresada en lenguaje numérico, de alguna clase de fenómenos del mundo exterior (Singh, 2008). La simulación matemática es un método de conocimiento, pronóstico y control (Tarasiévich, 2004). La construcción de un modelo matemático consta de cuatro etapas: 1) la formulación de las leyes que relacionan a los objetos principales del modelo; 2) la investigación del problema matemático; 3) la comprobación de la coherencia del modelo con la realidad; y 4) el análisis del modelo y su modificación.

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar y evaluar un modelo, para predecir la eficiencia del descascarado, la cantidad de cápsulas no descascaradas y el daño mecánico del grano en un prototipo de máquina descascaradora de higuierilla (*Ricinus communis* L.).

4.4. Materiales y métodos

Los modelos matemáticos se desarrollaron en el Laboratorio de Cómputo del Postgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) de la Universidad Autónoma Chapingo y la evaluación se realizó en las instalaciones del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Desarrollo teórico de los modelos

El descascarado de granos y semillas implica toda acción y ocurrencia en el tránsito del material biológico desde la entrada por la tolva, hacia la cámara de descascarado, dentro de ella y hasta la salida (Figura 14). Los parámetros físicos que afectan el proceso de descascarado incluyen las propiedades físicas de la cápsula son: la variedad, la edad, el contenido de humedad, la densidad aparente y el diámetro geométrico medio del fruto; 2) los parámetros de la máquina: el diámetro de la cámara de descascarado, la velocidad del disco y la holgura entre el disco y el cóncavo.

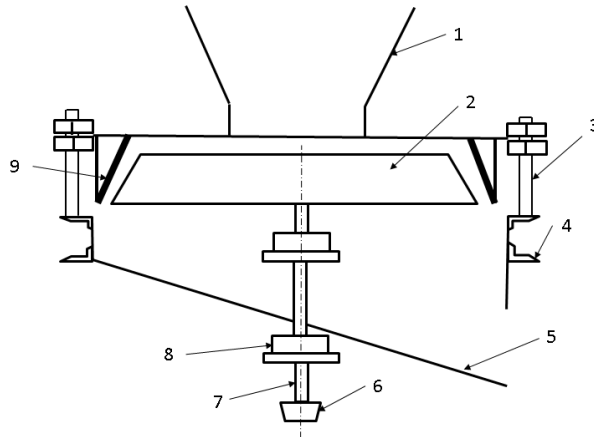


Figura 14. Diagrama esquemático de los componentes principales de la descascaradora. 1- tolva de alimentación, 2- disco giratorio liso, recubierto con caucho, 3- tornillo de regulación del disco y cóncavo, 4-Estructura de soporte, 5- tolva de salida del material, 6- piñón motriz, 7- flecha motriz, 8- chumacera, 9- cono o cóncavo recubierto de caucho de acabado liso.

En el desarrollo del modelo de la máquina se hicieron los siguientes supuestos: 1) el contenido de humedad de la cáscara y de la semilla es el mismo; 2) las dimensiones de la cápsula son constantes y comparten el mismo contenido de humedad; 3) el grosor de la cáscara es constante y su contenido de humedad es uniforme; el diámetro de la cámara de descascarado (cóncavo) es variable; 5) la distancia u holgura entre el disco de descascarado y el cóncavo se fija para las dimensiones promedio de las cápsulas; 6) la edad de las cápsulas es la misma; 7) el peso individual y el volumen de la cápsula son constantes con un contenido de humedad particular; 8) la velocidad del órgano de descascarado es la misma que la de su eje motriz; 9) la velocidad del eje es fija; 10) la

carga de compresión de los frutos es uniforme en toda la superficie del órgano de descascarado.

A partir de los supuestos anteriores las principales variables de importancia son: el contenido de humedad de la cápsula, la densidad aparente del fruto, la densidad de la cáscara, la velocidad de descascarado y la separación u holgura entre el disco y el cóncavo. En el modelo únicamente se consideró la holgura del disco y el cóncavo como el parámetro más importante, para el estudio.

Modelo de la eficiencia del descascarado

La principal función del órgano de descascarado es separar la cáscara del grano, esta magnitud del trillado se calcula con:

$$ED = -a \cdot x + b \quad (1)$$

donde: ED- eficiencia del descascarado, %; a y b – coeficiente de la ecuación para la alimentación de los granos aleatoriamente, adim; y x- holgura entre el disco y el cóncavo, mm.

Para el descascarado del grano sin que el órgano de trabajo le provoque daño mecánico, se debe de cumplir la condición:

$$C \geq A_{m\acute{a}x} \quad (2)$$

donde: C- holgura entre el disco y el cóncavo, mm; y $A_{m\acute{a}x}$ - anchura máxima del grano de higuera, mm.

En la Figura 15 se esquematiza el proceso de descascarado del fruto entre la periferia del disco y la holgura del cóncavo variable.

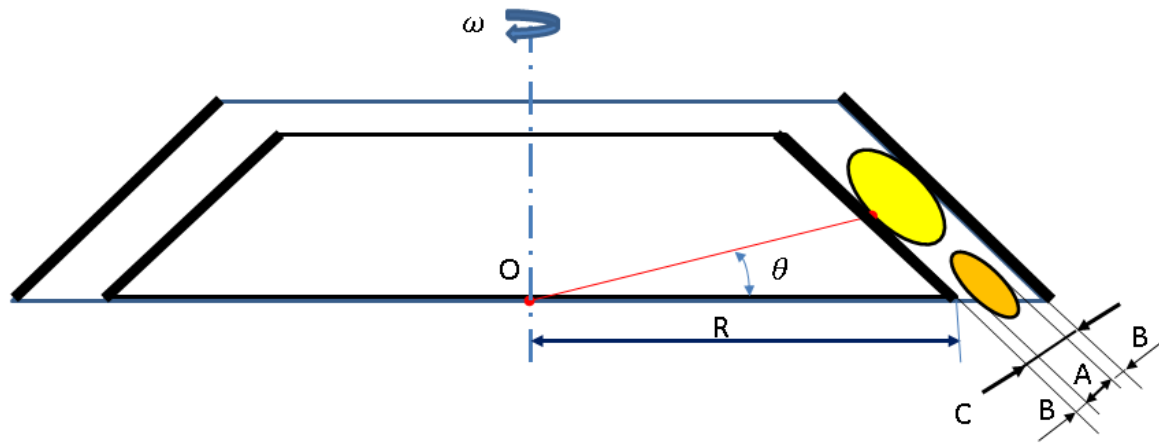


Figura 15. Descripción del modelo del descascarado del carpelo de higuera entre el disco y el cóncavo. R- radio mayor del disco, C- holgura entre el disco y el cóncavo, A- anchura del grano de higuera, y B- espesor de la cáscara del carpelo de la higuera.

Modelo del grano no descascarado

Debido a la deficiente calibración del órgano de trabajo o bien a la variabilidad en las dimensiones de la cápsula no todo el material se descascara. Según Cabral - de França *et al.* (2013), el límite máximo permitido de grano no descascarado de higuera es del 10 %.

El modelo de grano no descascarado propuesto:

$$GN = a \cdot x - b \quad (3)$$

donde: GN- grano no descascarado, %; a y b – coeficiente de la ecuación para la alimentación de los granos aleatoriamente, adim; y x- holgura entre el disco y el cóncavo, mm.

Modelo del grano dañado

La presencia del daño mecánico en los granos cosechados mecánicamente es inevitable. Según Cabral - de França *et al.* (2013) el rango permisible de grano quebrado o dañado de higuierilla es de hasta 3 %. Si los porcentajes superan estos límites, la calidad del aceite es baja, debido a que aumenta su acidez, sobre todo si se almacena por un largo periodo.

El modelo de grano dañado propuesto es:

$$GD = A \cdot x^{-n} \quad (4)$$

donde: GD- grano dañado, %; A- coeficiente de la ecuación de potencia, adim.; n- exponente de la ecuación, adim.; y x- holgura entre el disco y el cóncavo, mm.

Calibración y validación del modelo

Los modelos de la eficiencia del descascarado y grano dañado se verificaron con el fin de confirmar su coherencia con los resultados experimentales de una descascaradora. El estudio se llevó a cabo en una maqueta experimental descascaradora de higuierilla (Figura 16) y los valores, obtenidos con el modelo, se compararon con los datos experimentales.



Figura 16. Maqueta experimental para el descascarado de cápsulas de higuera (*Ricinus communis* L.).

Determinación de los parámetros de validación

Para la validación del modelo se tomarán en cuenta los siguientes parámetros:

Contenido de humedad: La validación del modelo se realizó con un solo contenido de humedad de la cápsula de higuera, debido a la dificultad de conseguir el material con los productores, con diferentes humedades. El contenido de humedad del grano se determinó en una estufa a una temperatura de 75 °C durante 24 h. el contenido de humedad se calculó en base húmeda.

$$CH = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \cdot 100 \quad (5)$$

donde: CH - contenido de humedad, %; W_1 - masa de la muestra húmeda, g; y W_2 - masa de la muestra seca, g.

Eficiencia del descascarado: Es la relación de la masa de cápsulas completamente descascaradas, y de las no descascaradas, entre la masa total de las cápsulas introducidas en la tolva. Se calcula como:

$$ED = \frac{WT-x}{WT} \cdot 100 \quad (6)$$

donde: ED - eficiencia del descascarado, %; WT - masa total de las cápsulas de higuerilla que se introducen en la tolva, kg; y x - masa de las cápsulas de higuerilla parcialmente descascaradas y no descascaradas, kg.

Relación de granos dañados: Este factor cuantifica la cantidad de granos dañados y descascarados, de las cápsulas descascaradas recibidas. Se calcula así:

$$RGD = \frac{GD}{GD+GN} \quad (7)$$

donde: RGD - relación de granos dañados, adim.; GD - grano descascarado y dañado; y GN - grano descascarado y no dañado.

Instrumentación y equipo de medición

Los datos generados a partir de la maqueta experimental utilizada para la verificación del modelo, fueron medidos o evaluados por los siguientes métodos:

Medición de la masa: Una balanza de precisión marca Ohaus con aproximación a centésimas de gramo (-0.01 g) se utilizó en el pesaje del material de estudio (cápsulas, granos y cáscaras).

Determinación del contenido de humedad: Se tomaron muestras de cápsulas, granos y cáscaras de aproximadamente 100 ml. La masa del material de estudio se

cuantificó en húmedo y en seco. El contenido de humedad se determinó por diferencia de peso, luego de 24 h de secado en una estufa marca Lab-Line Instruments a una temperatura de 75 °C.

Medición de la velocidad: Un contador de revoluciones (tacómetro) marca Lutron modelo DT-2230 se utilizó para calibrar la velocidad de funcionamiento del órgano descascarador. Mediante un variador de frecuencia marca Danfoss modelo VLT se reguló la velocidad del motor trifásico de 3 hp marca ABB.

Medición de la holgura: Un calibrador de linternas marca Truper y un vernier Mitutoyo se utilizó para medir el claro entre el cilindro y el cóncavo. La calibración de la holgura se realizó de 8 a 14 mm con variaciones de un mm en el órgano de trabajo. El mecanismo de ajuste (Figura 14) se reguló de manera manual.

Medición de la eficiencia del descascarado, no descascarado y grano dañado: Una muestra total de 42 kg de cápsulas de higuera se utilizó en el ensayo. Se realizaron siete tratamientos (separación disco cóncavo), con dos réplicas. Cada tratamiento consistió de 3 kg de cápsulas de higuera. El material se depositó en la tolva de alimentación para el descascarado, previa calibración de la holgura disco - cóncavo y la velocidad de rotación del órgano de trabajo. La mezcla de los materiales se colectó en la salida de la máquina. El material descascarado, el no descascarado y el dañado se separan y pesan. La eficiencia del descascarado y el grano no dañado se calculan mediante las ecuaciones (5) y (6). Un juego de datos se utilizó para la calibración y otro para la validación del modelo.

Evaluación del modelo

El modelo se evaluó mediante dos criterios uno gráfico y otro estadístico. Para este último se utilizaron:

Error relativo (ER):

$$ER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i - y_i}{x_i} \cdot 100 \quad (8)$$

Error estándar (ES):

$$ES = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (9)$$

Desviación absoluta (DA):

$$DA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (10)$$

Desviación de la media (DM):

$$DM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (11)$$

donde: x_i - valores observados; y_i - valores estimados con el modelo; n - número de holguras disco-cóncavo evaluadas, adim.

Los datos experimentales obtenidos fueron procesados estadísticamente en los paquetes profesionales de Microsoft Excel 2010 y MATLAB versión 7.12.0.635 (R2011a) desarrollado por la empresa The Mathworks, Inc. Además se realizó el análisis descriptivo de las muestras y la varianza simple mediante la prueba t de Student para muestras apareadas.

4.5. Resultados y discusión

En el Cuadro 13 se muestran los principales estadígrafos tales como los valores medios (X) y la desviación estándar (S) de los materiales de estudio. La humedad promedio de la cápsula, el grano y la cáscara fueron 6.27 ± 0.30 , 4.64 ± 0.26 y 7.40 ± 0.24 respectivamente.

Cuadro 13. Propiedades físicas de la cápsula, el grano y la cáscara de la higuera roja.

Material	Longitud, mm		Anchura, mm		Espesor, mm		Masa, g	
	X	S	X	S	X	S	X	S
Cápsula	20.01	3.22	11.64	1.59	8.99	1.23	0.67	0.25
Grano	14.80	2.42	9.12	1.66	6.38	1.06	0.44	0.20
Cáscara	19.95	3.26	8.14	2.27	5.96	1.61	0.13	0.05

En el Cuadro 14 se muestran los parámetros geométricos principales de la descascaradora de granos de higuera.

Para la calibración y la validación de los modelos se realizaron algunas pruebas preliminares a 120 y 130 rpm del órgano de trabajo. El equipo tuvo un mejor desempeño a 120 rpm.

Cuadro 14. Datos del disco y cóncavo de la descascaradora de granos de higuierilla.

Parámetro	Dimensión
Diámetro mayor del disco, D	0.4836 m
Diámetro menor del disco, d	0.4445 m
Espesor del disco, e	0.05 m
Ángulo de inclinación, α	21°
Holgura entre el cilindro y cóncavo, C	8 – 14 mm

Calibración de los modelos

Calibración del modelo de la eficiencia del descascarado

Para el grano descascarado los coeficientes de la regresión lineal fueron $a = -7.5156$ y $b = 161.57$ con $R^2 = 0.93$ y 5.02 de error estándar (Figura 17). A medida que se disminuye la separación entre el disco y el cóncavo aumenta la eficiencia de descascarado, la cual debe de estar en función de las dimensiones de los carpelos de las cápsulas de higuierilla.

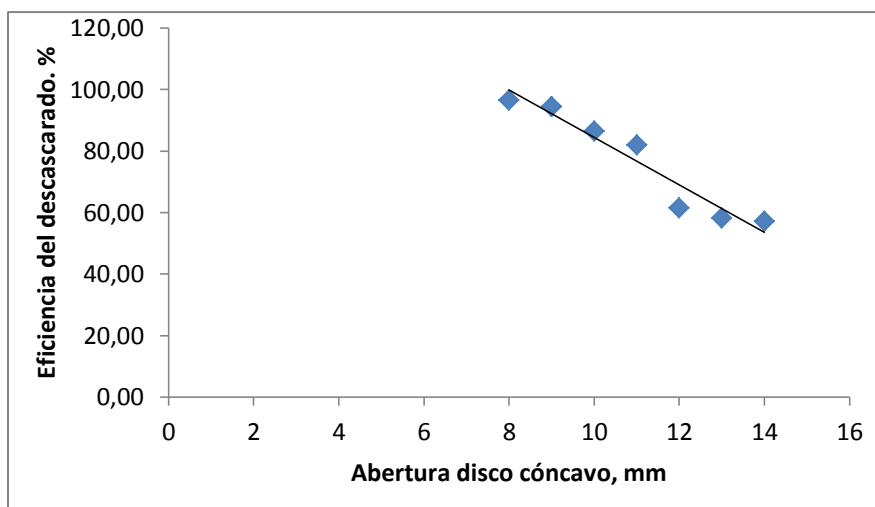


Figura 17. Eficiencia del proceso de descascarado a 120 rpm.

Calibración del modelo de grano no descascarado

Para el grano no descascarado se obtuvo $a = 7.5156$ y $b = -61.567$ con $R^2 = 0.93$ y 5.02 de error estándar (Figura 18). Por el contrario, al aumentar la holgura disminuye la eficiencia del descascarado y aumenta la cantidad de carpelos sin descascarar por el órgano de trabajo.

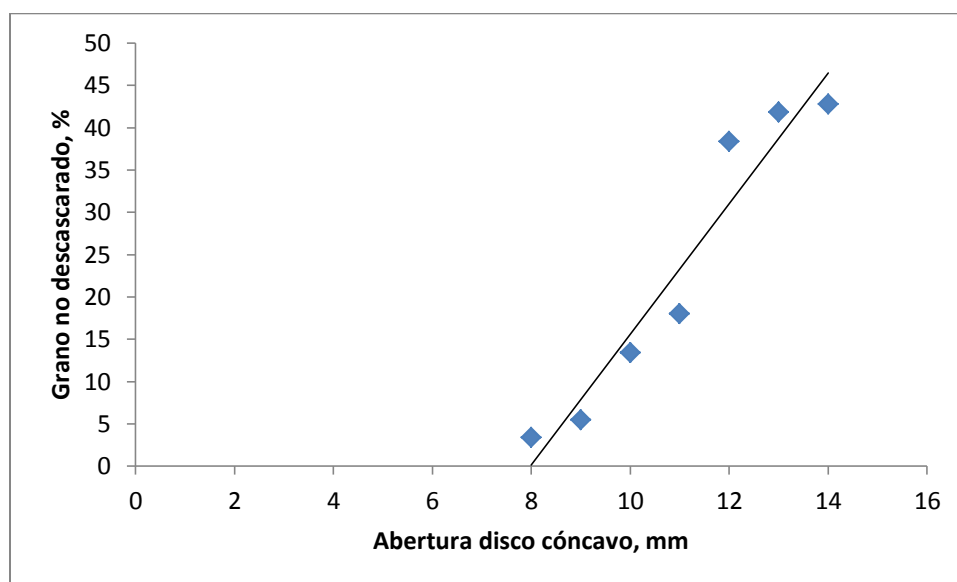


Figura 18. Grano no descascarado en el órgano descascarador a 120 rpm.

Calibración del modelo de grano dañado

Los coeficientes de la ecuación fueron $A = 35425$ y $n = -4.192$, $R^2 = 0.95$ y 0.95 de error estándar (Figura 19). El grano dañado aumenta al disminuir la holgura entre el disco y el cóncavo. El mayor daño del grano se encuentra de 8 a 10 mm de holgura entre el disco y el cóncavo.

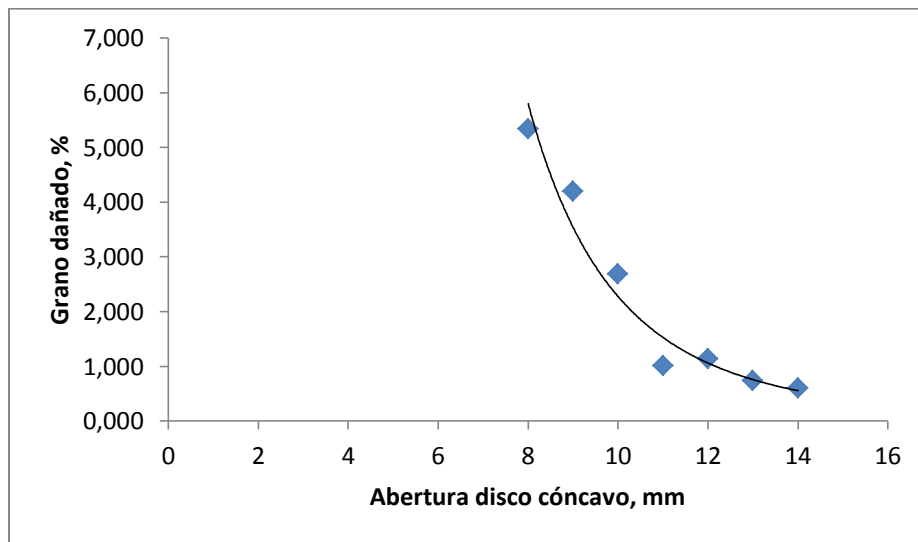


Figura 19. Grano dañado del proceso de descascarado.

Validación del modelo

Validación del modelo de la eficiencia del descascarado

El modelo de predicción de la eficiencia del descascarado se simuló en el software de MATLAB y se comparó con los valores de las pruebas experimentales realizadas a la máquina descascaradora. De la Figura 20 se observa, que los valores predichos por el modelo se ajustaron apropiadamente al valor experimental ($R^2 = 0.930$) y un error estándar de 4.74.

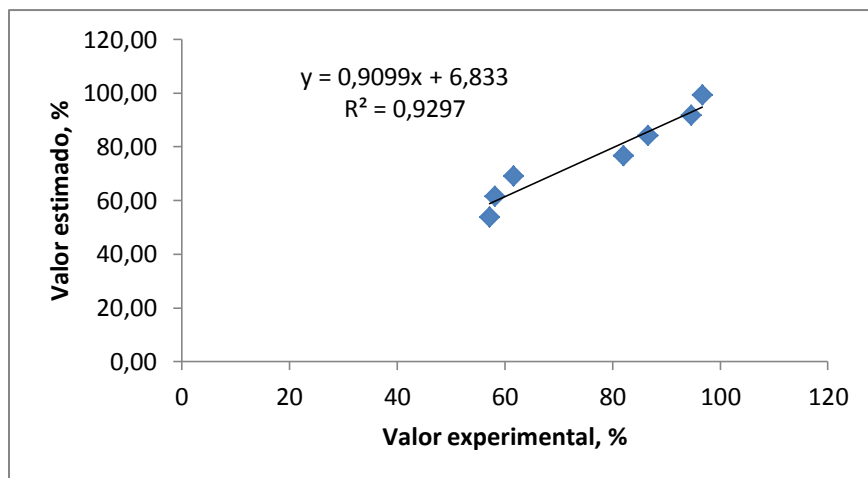


Figura 20. Eficiencia del descascarado estimado y experimental.

Al comparar las variaciones de la eficiencia del descascarado medido y simulado (Cuadro 15) se obtuvo una amplitud de la desviación absoluta del 3.90 %, con un error estándar y relativo de 4.26 % y -0.34 % respectivamente.

Cuadro 15. Eficiencia del descascarado estimada y experimental.

Abertura disco cóncavo, mm	Eficiencia del descascarado, %	
	Experimental	Estimada
8	96.65	99.27
9	94.57	91.72
10	86.59	84.17
11	82.01	76.62
12	61.64	69.07
13	58.18	61.52
14	57.22	53.96

La desviación de la media tiene un rango de 0.0779 %, lo que indica que el modelo tiende a una ligera variación en la eficiencia del descascarado.

Validación del modelo de grano no descascarado

El modelo de predicción de grano no descascarado se simuló en el software de MATLAB y se comparó con los valores de las pruebas experimentales de la máquina descascaradora. El valor estimado y el experimental para las cápsulas no descascaradas tienen un ajuste adecuado ($R^2 = 0.930$) con un error estándar de 4.74 (Figura 21).

La desviación absoluta de 3.98 %, con un error estándar y relativo de 4.26 % y -0.41 % (Cuadro 16) indican una variación ligera en la cantidad de cápsulas no descascaradas, debido a la no uniformidad en las dimensiones del material de estudio. La desviación de la media tuvo un intervalo de -0.0785 %, lo que muestra que el modelo tiene variación ligera en el grano no descascarado por el órgano de trabajo.

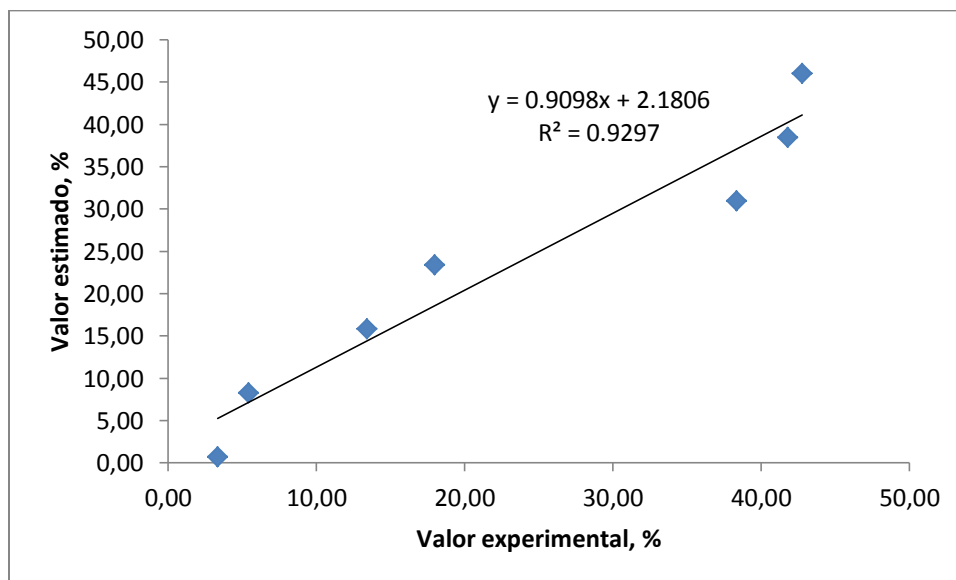


Figura 21. Grano no descascarado estimado y experimental.

Cuadro 16. Grano no descascarado estimado y experimental.

Abertura disco cóncavo, mm	Grano no descascarado, %	
	Experimental	Estimado
8	3.35	0.73
9	5.43	8.28
10	13.41	15.83
11	17.99	23.38
12	38.36	30.93
13	41.82	38.48
14	42.78	46.04

Validación del modelo de grano dañado

El modelo de predicción del grano dañado se simuló en el software de MATLAB y se comparó con los valores de las pruebas experimentales de la máquina descascaradora. De la Figura 22 se observa, que los valores estimados por el modelo se ajustaron adecuadamente al experimental ($R^2 = 0.950$) con un error estándar de 0.39. De la comparación de la variación del grano dañado mecánicamente observado y simulado (Cuadro 17) se obtuvo la desviación absoluta de 0.27 %, con un error estándar y relativo de 0.36 % y -3.98 % respectivamente. La desviación de la media tiene un rango de 0.0697 %, lo que muestra que el modelo tiene una ligera variación en cuanto al grano dañado por el órgano de trabajo.

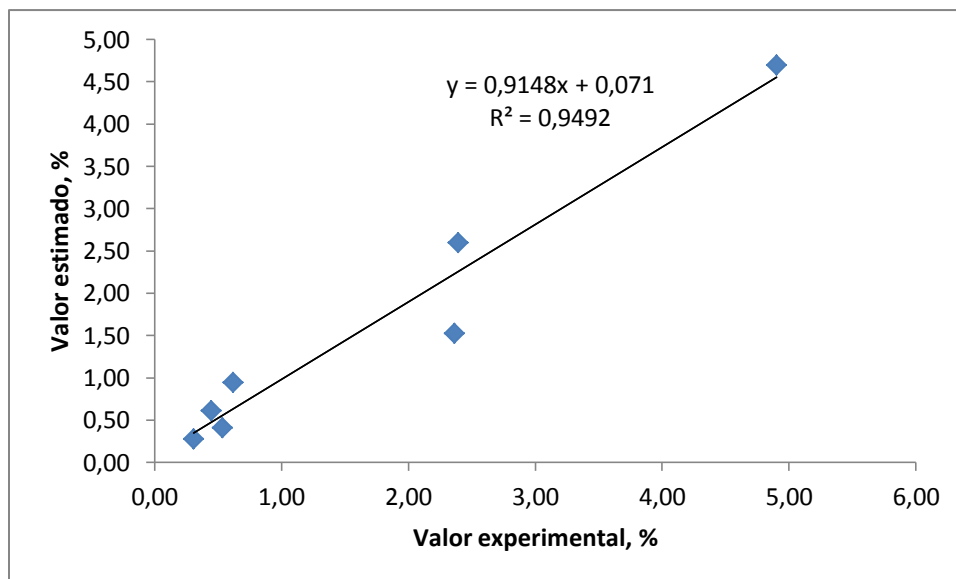


Figura 22. Grano dañado estimado y experimental.

Cuadro 17. Grano dañado estimado y experimental.

Abertura disco cóncavo, mm	Grano dañado, %	
	Experimental	Estimado
8	4.90	4.70
9	2.39	2.60
10	2.36	1.53
11	0.62	0.95
12	0.45	0.61
13	0.54	0.41
14	0.31	0.28

Los resultados experimentales de los tres modelos están de acuerdo a los obtenidos para el órgano de trabajo de las descascaradoras de nuez e higuierilla (Verma *et al.*, 1991; Cabral - de França *et al.*, 2013).

Cuando las medias de la eficiencia del descascarado y cápsula no descascarada estimada y medida se compararon estadísticamente, reveló que no hubo diferencia significativa entre estas al nivel de significancia del 5 % (Cuadro 18). De manera análoga para las medias del grano dañado al ser comparadas con una prueba “t”, demostró que no hubo diferencia significativa entre ellas al nivel de significancia del 5 % (Cuadro 18).

Cuadro 18. Parámetros de validación de los modelos de la eficiencia del descascarado, grano no descascarado y dañado con los datos experimentales de la descascaradora de higuierilla en el nivel de significación $p \leq 0.05$.

Parámetros de validación					
Modelo		Valor de	Valor “t _o ”	Valor “t” de	Significancia
		R ²	calculado	tablas	
Eficiencia	del	0.929	0.009	2.1788	No significativa
descascarado					
Grano no descascarado		0.929	-0.009	2.1788	No significativa
Grano dañado		0.9492	0.079	2.1788	No significativa

4.6. Conclusiones

Se desarrollaron tres modelos matemáticos para describir la eficiencia del descascarado, la cantidad de grano no descascarado y el grano dañado de una maqueta experimental para descascarar las cápsulas de higuierilla. El modelo fue validado con los datos experimentales obtenidos de la maqueta experimental. La variable del modelo fue la holgura del disco y el cóncavo. El ajuste del modelo ($R^2 = 0.93$) con probabilidad de error del 5% indicó que las ecuaciones y sus componentes fueron una elección apropiada para modelar la eficiencia del descascarado y la cantidad de cápsulas no descascaradas. El modelo del grano dañado tuvo un ajuste cercano al 95 % ($R^2 = 0.9492$).

4.7. Literatura citada

- Alves, S. C. M.; Marçal, Q. D.; Roberto, C. P. y Leyva, R. L. Z. 2005. Desarrollo y modelación de una máquina de pre-limpieza de café en el cultivo de montaña. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 14(2): 1-13.
- Baümler, E. R.; Riccobene, I. C. and Nolasco, S. M. 2004. Effect of Different Treatments in Dehulling Ability of Safflower Seeds (*Carthamus tinctorius* L.). ASAE Paper No 046022, at the 2004 ASAE Annual International Meeting. Ottawa, Ontario, Canada.
- Cabral-de França, P. R.; Ribeiro-Ferreira, S. O. R.; Cardoso-Almeida, F. A.; Ferreira-Jerônimo, J. y Cárdenas-Olivier, N. 2013. Desarrollo y evaluación de un prototipo descascarador de frutos de *Ricinus communis* L. Agrociencia. 47(4): 361-371.

- Cruz, M. P.; García, S. S.; Márquez, R. C. y López, C. G. 2012. Determinación de las propiedades físico-mecánicas para el descascarado de las cápsulas de la higuierilla (*Ricinus communis* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Especial* (4): 644-649.
- Duraisamy, V. M. and Manian, R. 1990. Design, development and evaluation of castor bean sheller. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 21(2): 41-45.
- Huynh, V. M.; Powell, T. and Siddall, J. N. 1982. Threshing and Separating Process- A Mathematical Model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 25 (1): 65-73
- Magalhães, A. C.; Teixeira, M. M.; Couto, S. M. e Resende, R. C. 2006. Modelagem de máquina pneumática recolhadora de frutos de café em terreiro usando análise por elementos finitos. *Engenharia Agrícola*. 26(2): 483-492.
- Mieszkalski, L. 1997. The role of the physical properties of seeds in the design of hullers. *Int. Agrophysics*. 11(4): 283-291.
- Ndukwu, M.C. and Asoegwu, S. N. 2011. A mathematical model for predicting the cracking efficiency of vertical-shaft centrifugal palm nut cracker. *Research in Agricultural Engineering*. 57(3): 110-115.
- Nolasco, S. M.; Riccobene, I. C. and Fernández, M. B. 2002. Dehulling of High Oil Sunflower Seed Grown in Argentina. ASAE Paper No 026123, at the 2002 ASAE Annual International Meeting. Chicago, Illinois, USA.
- Shitanda, D; Nishiyama, Y. and Koide, S. 2001a. Performance Analysis of an Impeller Husker considering the Physical and Mechanical Properties of Paddy Rice. *J. agric. Engng Res*. 79 (2): 195-203.

- Shitanda, D.; Nishiyama, Y. and Koide, S. 2001b. Performance Analysis of Impeller and Rubber Roll Husker Using Different Varieties of Rice. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development*. 1(3): 1-19.
- Shyeh, B. J.; Rodda, E.D. and Nelson, A. I. 1980. Evaluation of New Soybean Dehuller. *Transactions of the ASABE*. 23(2): 523-528.
- Singh, P. 2008. Modeling crop production systems. Principles and application. Science Publishers. Enfield, New Hampshire, U.S.A. 512 p.
- Tarasiévich, I. I. 2004. Simulación matemática y computacional. Curso introductorio. Editorial URSS. 238 p.
- Verma, B. P; Heaton, E. K. and Zaltzman, A. 1991. Machine for Removing Shucks from Pecans. *Transactions of the ASABE*. 34(1): 38-42.

CAPITULO 5.

MODELACIÓN DE LA MEZCLA GRANO-CÁSCARA EN UNA MÁQUINA LIMPIADORA DE HIGUERILLA (*Ricinus communis L.*)⁸

MODELING OF THE GRAIN - HUSKS MIXTURE ON THE CLEANING MACHINE OF CASTOR (*Ricinus communis L.*)

5.1. Resumen

En la actualidad la limpieza de los granos por medio del vacío se está difundiendo, en el desarrollo de equipos agrícolas, debido a la ausencia de polvo en el área de trabajo. Un problema habitual es la acumulación del material en sectores conflictivos del sistema de limpieza, como en lugares de cambios bruscos de dirección o de sección en los tubos. En particular, resulta de especial interés, el componente que distribuye el flujo, dado que un correcto diseño debe asegurar una distribución homogénea del caudal del aire y el material, sin atascamientos (acumulaciones). El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de los granos y cáscaras de la higuera (*Ricinus communis L.*) en el sistema de limpieza mediante la técnica de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para determinar la velocidad mínima adecuada. En la simulación se utilizaron los modelos k-epsilon y DPM (Modelo de fase discreta) de ANSYS FLUENT. Un banco de prueba se construyó e instrumentó para comparar los resultados experimentales y los computacionales. La comparación de los resultados mostró una buena concordancia cualitativa y cuantitativa ($R^2 = 82\%$) en el perfil de la velocidad.

Palabras clave: CFD, limpieza de granos, trayectoria.

⁸ Pedro Cruz Meza, Gilberto de Jesús López Canteñs, Samuel García Silva, Eugenio Romanchik Kriuchkova y Omar Reséndiz Cantera. Artículo enviado a la revista Agrociencia.

5.2. Abstract

Today the cleaning of the grains by vacuum is spreading, in the development of agricultural equipment, due to the absence of dust in the work area. A common problem is the accumulation of material in conflict sectors of the cleaning system, and points of sudden changes in direction or section tubes. In particular, it is of special interest, the component that distributes the flow, since the right design to ensure even distribution of air flow and material without cloggings. The aim of this study was to analyze the behavior of grains and shells (*Ricinus communis* L.) using the technique of CFD (Computational Fluid Dynamic) cleaning system to determine the appropriate minimum speed. In the simulation, the k-epsilon and DPM models of ANSYS FLUENT were used. A test bench was built and instrumented to compare the experimental and computational results. The comparison of the results showed a good qualitative agreement in the velocity profile.

Key words: CFD, grain cleaning, path.

5.3. Introducción

En el Estado de Oaxaca, México, el descascarado de las cápsulas de la higuierilla (*Ricinus communis* L.), se realiza de manera manual. Una etapa complementaria al descascarado, es la limpieza de los granos, realizada generalmente en el campo, mediante el venteado del aire. La limpieza efectuada manualmente ha mostrado ser un trabajo arduo y penoso, ya que requiere resistencia física y habilidad para su ejecución, además de perjudicar la salud, al contaminar el aire producto de este proceso (Ponpesh y Giles, 2009; Ponpesh *et al.*, 2010).

En la actualidad la limpieza de los granos por medio del vacío se está difundiendo, en el desarrollo de equipos agrícolas, debido a la ausencia de polvo en el área de trabajo. Un problema habitual es la acumulación del material en sectores conflictivos del sistema de limpieza, como en lugares de cambios bruscos de dirección o de sección en los tubos. En particular, resulta de especial interés, el componente que distribuye el flujo, dado que un correcto diseño debe asegurar una distribución homogénea del caudal del aire y el material, sin atascamientos (acumulaciones).

Las máquinas utilizadas en el procesamiento de productos agrícolas en México, son en su mayoría diseñadas a partir de informaciones de productos importados, con características diferentes a las necesidades del agricultor. La construcción de las máquinas de limpieza de productos agrícolas, se desarrolla en su mayoría por métodos empíricos.

En ese contexto, las técnicas de modelación y simulación han demostrado ser una herramienta de gran utilidad en el diseño, análisis, optimización y perfeccionamiento de máquinas agrícolas (Alves *et al.*, 2005). El modelado en la dinámica de fluidos computacional (CFD) permite desarrollar y probar los prototipos de las máquinas cosechadoras, y obtener los parámetros esenciales de diseño en ingeniería sin la necesidad de construir el modelo físico, ya que se requiere más tiempo y es relativamente caro (Ponpesh y Giles, 2008). Por consiguiente, el modelado en CFD permite optimizar el diseño del sistema de limpieza de las cosechadoras, y del proceso físico de separación de las partículas en la corriente de aire.

El modelado en CFD ha sido aplicado con éxito en numerosos casos. Algunas de las aplicaciones agrícolas son: el modelado del arrastre de la pulverización (Teske *et al.*, 2011), el diseño de pulverizadores aéreos (Herrera *et al.*, 2006; Herrera *et al.*, 2010), el

sistema de limpieza de cosechadoras de granos (Gebrehiwot *et al.*, 2010 a; Gebrehiwot *et al.*, 2010 b; Du *et al.*, 2013 ; Ni *et al.*, 2013), sistema de recogida y limpieza de las cosechadoras de nuez (Ponpesh y Giles, 2008; Ponpesh y Giles, 2009; Ponpesh *et al.*, 2011 a; Ponpesh *et al.*, 2011 b), el sistema de recogida y limpieza de las cosechadoras de café (Alves *et al.*, 2005; Magalhães *et al.*, 2006 a; Magalhães *et al.*, 2006 b;), en ciclones (Corrêa *et al.*, 2004; Cernecky y Plandorova, 2013;), el diseño de sistemas de ventilación de construcciones agropecuarias (Sun *et al.*, 2004), entre otras. Sin embargo, no se ha reportado el uso en el diseño de máquinas descascaradoras de higuera.

Los avances en las técnicas del modelado numérico y en computación, han proporcionado a los ingenieros una amplia gama de modelos del flujo de fluidos disponibles en el mercado, sobre la base de las ecuaciones de Navier - Stokes. La mayoría de los paquetes comerciales de CFD ofrecen los modelos de Navier – Stokes del promedio de Reynolds (RANS), tales como, el modelo $k - \epsilon$, el modelo del grupo de renormalización (RNG), el modelo de esfuerzos de Reynolds anisotrópico (RSM), y el modelo de la simulación de la turbulencia de grandes remolinos (LES).

El presente estudio tiene como objetivo el análisis del comportamiento de los granos y cáscaras de la higuera (*Ricinus communis* L.) en el sistema de limpieza mediante la técnica de CFD de la máquina descascaradora.

5.4. Materiales y métodos

La simulación es una técnica que se aplica a problemas complejos, por lo que es necesario construir un modelo computacional que represente y contenga las

características necesarias de lo que se quiere analizar. El problema consiste en modelar la velocidad del aire en el ducto del sistema de limpieza de la máquina descascaradora y la trayectoria de la cáscara a la salida del ventilador. En el modelado se utilizó el software de ANSYS FLUENT 14.

Fundamentación teórica de los modelos matemáticos

El modelo matemático está compuesto de las ecuaciones (1) a (6).

Ecuaciones de la fase gaseosa

Las ecuaciones diferenciales para el movimiento del aire en el espacio son:

a) Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (1)$$

b) Ecuación del momento

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u u = \nabla \cdot \tau + \rho w w + \rho g \quad (2)$$

donde: u - vector de la velocidad; t - tiempo; ρ - densidad; g - aceleración de la gravedad; τ - tensor del esfuerzo; y $\rho u w$ – tensor de Reynolds.

Modelo de turbulencia

El modelo k - ϵ realizable se basa en la hipótesis de Boussinesq, que se refiere a la media del gradiente de la velocidad del tensor de Reynolds. Además, el modelo adopta la suposición de la viscosidad turbulenta isotrópica. Según Ponpesh y Giles (2008) las ecuaciones del transporte para k y ϵ en el modelo k - ϵ realizable son:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (4)$$

donde: P - tasa de producción debido al tensor de Reynolds ($-u_i u_j S_{ij}$); u - la velocidad; k - energía cinética de turbulencia; μ - viscosidad dinámica del gas; ν - viscosidad cinemática; μ_t - viscosidad de turbulencia; ε - tasa de disipación ($2\nu S_{ij} S_{ij}$); S - media geométrica de la velocidad de deformación; C_1 y C_2 - constantes del modelo; σ_k y σ_ε - número de turbulencia de Prandtl para k y ε .

Modelo de la trayectoria de la partícula

La ecuación del movimiento de una partícula individual es:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u - u_p) + \frac{g (\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (5)$$

donde: u- velocidad del fluido; u_p - velocidad de la partícula; ρ - densidad del fluido; ρ_p - densidad de la partícula; F_D - fuerza total ejercida sobre la partícula.

El vector de posición de la partícula es:

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (6)$$

Caracterización del flujo de aire en el sistema de limpieza y determinación del calor específico del grano y la cáscara de higuera

En el prototipo de máquina descascaradora de higuera diseñado y construido en el Postgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, se realizaron los muestreos en el sistema de limpieza a la entrada y salida

del centro del ducto y además a la salida del ventilador del caudal y la velocidad del aire, utilizando un anemómetro de hilo caliente marca Lutron modelo YK-2005AH.

El calor específico del grano y la cáscara de la higuera se determinaron mediante un calorímetro. El calorímetro primeramente se calibró y después se determinó el calor específico para el grano y la cáscara de la higuera.

Metodología para el desarrollo del modelo CFD

En el proceso de diseño del modelo computacional se tomó como referencia el diagrama de flujo de granos y cáscaras de la higuera (Figura 23) y en la Figura 24 se muestra el ducto del sistema de limpieza de la máquina descascaradora. Las dimensiones del ducto con respecto al ventilador son 0.152 y 0.1 m de diámetro mayor y menor respectivamente y longitud total de 1.94 m (tramo 1 horizontal 0.2 m, tramo 2 horizontal 0.26 m, tramo 3 vertical 0.58 m, tramo 4 horizontal 0.46 m y tramo 5 vertical 0.44 m). La caja del vacío tiene una anchura de 0.51 m y longitud de 0.515 m. La altura de la caja en la parte frontal y posterior tiene 0.375 y 0.17 m respectivamente.

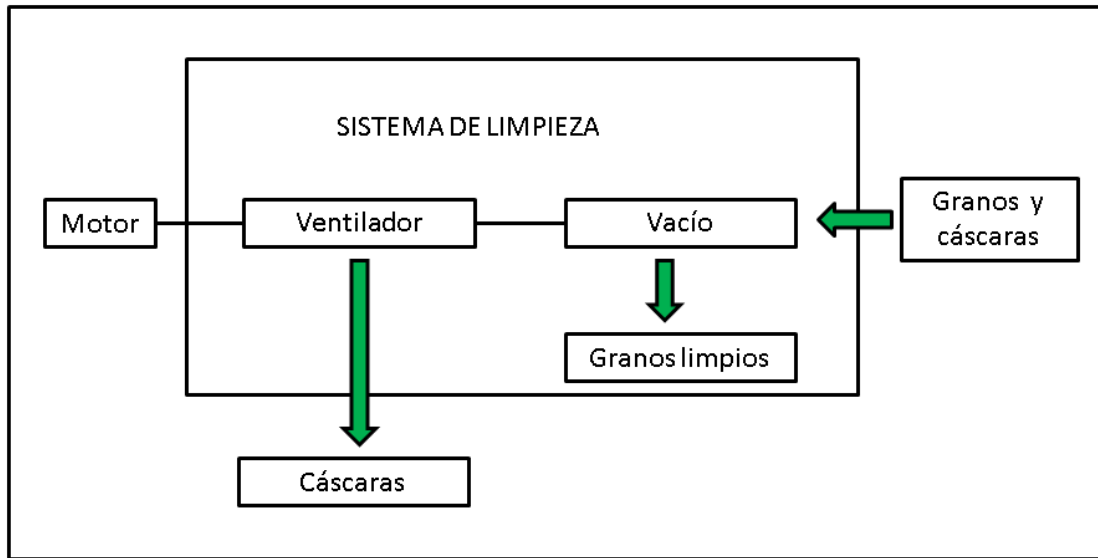


Figura 23. Diagrama de flujo de granos y cáscaras de la higuera para la realización del modelo.

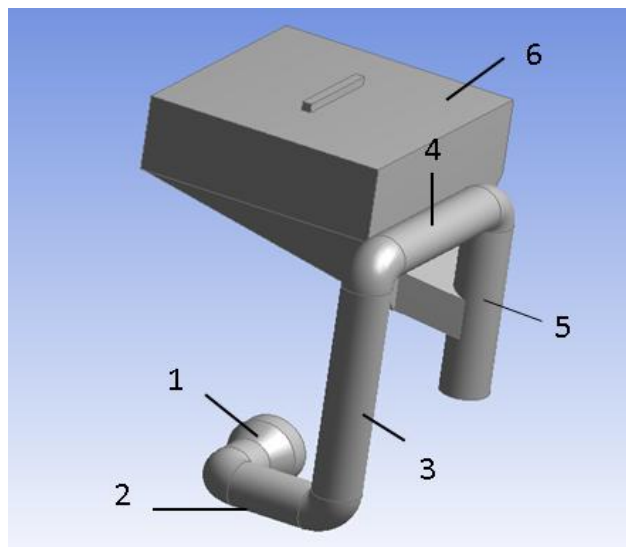


Figura 24. Sistema de limpieza de la máquina descascaradora de higuera. Los componentes son: 1- tramo horizontal 1, 2- tramo horizontal 2, 3- tramo vertical 3, 4- tramo horizontal 4, 5- tramo vertical 5, 6- caja de vacío.

El mallado del volumen del ducto de limpieza y del colector de cáscara en CFD se realizó, con un tamaño del centro de relevancia fino, utilizando la función de tamaño avanzado en las curvaturas y un suavizado alto, así como el uso automático de la inflación por el programa controlado. Para el sistema de limpieza se establecieron dos entradas para el fluido y el material, la salida y las paredes del modelo. Para la simulación primeramente se seleccionan los modelos de la ecuación de la energía y el modelo viscoso $k - \epsilon$ realizable con un tratamiento de la pared mejorada. Finalmente el modelo de fase discreta (DPM de sus siglas en inglés) se selecciona, para el análisis de la trayectoria de los granos y cáscaras, que utiliza el enfoque de Lagrange. La mezcla aire grano-cáscara se analiza como un flujo en fase diluida, menor del 10 % de sólidos en la fracción del volumen. El tipo de partícula seleccionada en DPM es la inerte y se inyecta en la superficie, de la entrada superior de la caja de vacío. El modo de paso aleatorio discreto se selecciona para la trayectoria estocástica de la distribución de los diámetros del material. El modelado de los materiales granulares y en polvo se realizan a través de la distribución del tamaño de las partículas. Entre las más utilizadas se encuentran la distribución normal, la log normal y la Rosin-Rammler. En el modelo en CFD se seleccionó la función de Rosin-Rammler.

Condiciones iniciales y de frontera del modelo de CFD

Las condiciones iniciales y de frontera se establecieron inicialmente para los modelos de la energía y el viscoso $k-\epsilon$. Las propiedades principales del aire utilizadas en la simulación se muestran en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Propiedades principales del aire.

Propiedades	Valor
Densidad, kgm^{-3}	1.225
Calor específico, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1006.43
Conductividad térmica, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.0242
Viscosidad dinámica, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	1.7894×10^{-5}

Los parámetros principales de la simulación se calcularon a partir de las ecuaciones (7) a (10):

Radio hidráulico del ducto:

$$R = \frac{d}{4} \quad (7)$$

donde: R- radio hidráulico, m; d- diámetro del ducto, m.

El diámetro equivalente se determina a través de la siguiente expresión:

$$D = \frac{4 \cdot A}{U} \quad (8)$$

donde: D- diámetro equivalente, m; A- área de la sección transversal del ducto, m; y U- perímetro mojado, m.

Para el caso de un tubo de sección rectangular el diámetro equivalente es:

$$D = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad (9)$$

donde: a y b - la anchura y altura del ducto rectangular respectivamente, m.

La intensidad del flujo turbulento fue estimada de una correlación empírica del flujo en un tubo (Dufresne *et al.*, 2009; Ponpesh y Giles, 2009; Ponpesh *et al.*, 2011b):

$$I = 0.16 \cdot Re_{dH}^{-1.8} \quad (10)$$

donde: I- intensidad de la turbulencia en la entrada, adim; y Re_{dH} - número de Reynolds correspondiente al diámetro hidráulico, m.

En los Cuadros 20 y 21, se muestran las condiciones iniciales y de frontera utilizadas en la simulación para el modelo k-ε.

Cuadro 20. Condiciones de frontera para el modelo k-ε del sistema de limpieza de la descascaradora de higuera.

Parámetro	Entrada 1	Entrada 2	Salida
Velocidad, ms^{-1}	6	1	
Presión, Pa	0	0	0
Intensidad del flujo o reflujo turbulento, %	10	10	10
Diámetro hidráulico, m	0.1	0.036	0.152

Cuadro 21. Condiciones de frontera del modelo k-ε para la trayectoria de la cáscara de higuera.

Parámetro	Entrada	Salida
Velocidad, ms^{-1}	6	
Presión, Pa	0	0
Intensidad del flujo o reflujo turbulento, %	10	10
Diámetro hidráulico, m	0.16	0.59

En el Cuadro 22 se muestran las principales propiedades del material a limpiar en la simulación del modelo DPM.

Las condiciones iniciales y de contorno o de frontera de la fase discreta se aplican a los límites físicos con el fin de determinar el destino de las trayectorias de las partículas en el ducto. Para la entrada y la salida se seleccionaron escape, mientras que reflejar para todas las paredes y atrapar para la pared colectora.

Cuadro 22. Propiedades para el grano y la cáscara de la higuera del DPM del sistema de limpieza.

Parámetro	Grano	Cáscara
Velocidad, ms^{-1}	1	1
Flujo másico, kgs^{-1}	0.00825	0.00675
Densidad, kgm^{-3}	556	125
Calor específico (C_p), kJ/kg K	3.32	3.32
Dimensión mínima (D_{gmin}), mm	5	4.5
Dimensión máxima (D_{gmax}), mm	20	25
Dimensión promedio (D_{gprom}), mm	14	18
Número de diámetros	30	30

Análisis experimental del modelo

Para comparar los resultados estimados por el modelo de CFD, contra las mediciones experimentales, se construyó un banco de prueba para el sistema de limpieza (Figura 25).



Figura 25. Banco de prueba del sistema de limpieza y estructura para la colecta de la cáscara.

Validación de la velocidad del aire: La velocidad se mide en diferentes localizaciones del ducto, la cámara de separación y la caja de vacío (Figura 26). Para ello se utilizaron tubos de Pitot de 5 mm de diámetro de cobre conectado a un manómetro “U” diferencial que utiliza alcohol como líquido manométrico, obteniéndose la presión dinámica para cada punto. Además se utilizó un anemómetro de hilo caliente marca Lutron modelo

YK-2005AH para verificar la velocidad del aire en el ducto. El ventilador del banco de prueba y los rodillos del alimentador se calibraron a 1500 y 86 rpm respectivamente, mediante un tacómetro marca Lutron modelo DT 2230. El ventilador se acciona a través de un motor trifásico de 3 hp marca ABB y la velocidad se ajusta mediante el variador de frecuencia Danfoss modelo VLT.

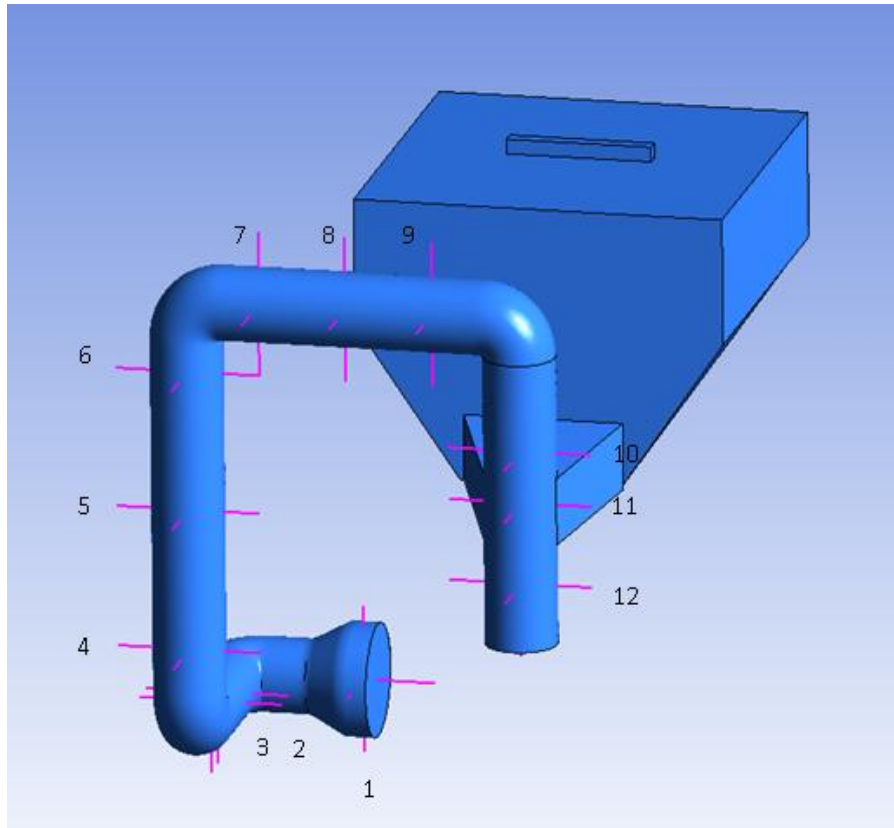


Figura 26. Puntos de lectura de la presión dinámica.

Las impurezas de las cápsulas de higuera fueron separadas manualmente y descascaradas en un prototipo descascarador diseñado y construido en el postgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. El ensayo consistió de una muestra de 3 kg de granos y cáscaras de higuera. Se realizaron 3 repeticiones.

La velocidad del aire de las diferentes localizaciones del ducto (Figura 26) se calcula mediante la siguiente expresión.

$$v = \frac{\rho_m}{\rho_a} 2gh \quad (11)$$

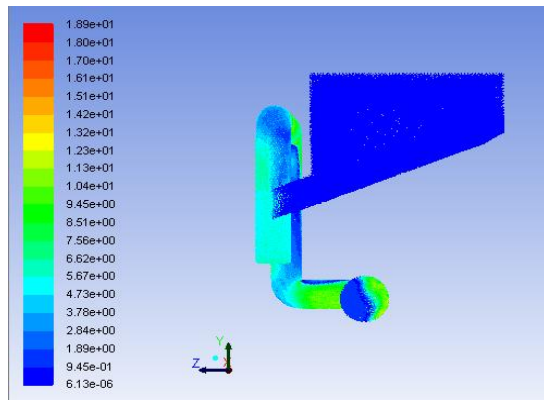
donde: v - velocidad del aire, ms^{-1} ; ρ_m – densidad del líquido manométrico, kgm^{-3} ; ρ_a - densidad del aire, kgm^{-3} ; g - aceleración de la gravedad, ms^{-2} ; y h - altura manométrica o presión, Pa.

Los datos experimentales obtenidos fueron procesados estadísticamente en el paquete profesional de Microsoft Excel 2010 realizando el análisis descriptivo de la muestra, el análisis de varianza simple mediante una prueba t de Student para muestras apareadas.

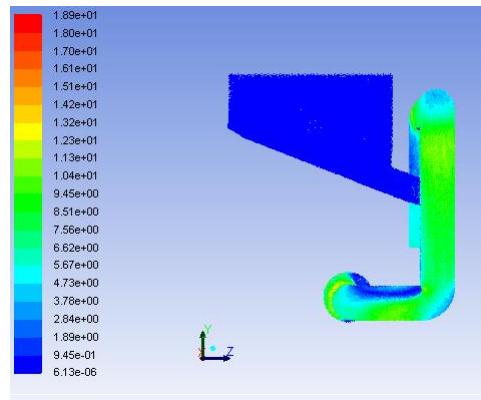
5.5. Resultados y discusión

Campo de flujo del aire

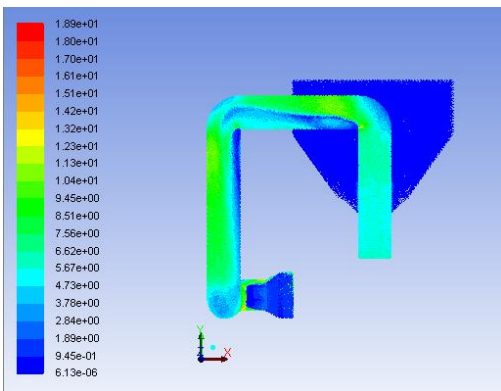
El campo de velocidades del aire, se obtiene con los modelos numéricos antes descriptos considerando el grano y la cáscara de la higuera. La Figura 27 muestra las diferentes vistas del diagrama vectorial de la velocidad del flujo de aire en el sistema de limpieza, que está coloreado por la magnitud de ésta. La velocidad alcanzó un máximo de 18.9 ms^{-1} del flujo de aire en el reductor y el codo del tramo 1, y un mínimo de $6.13 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ en la caja de vacío.



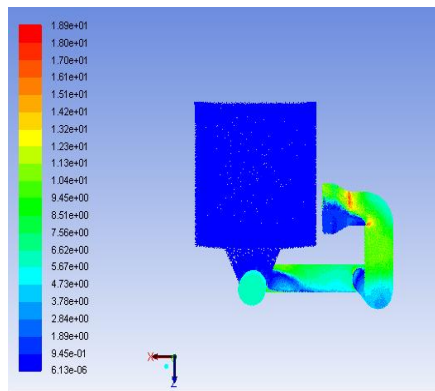
a)



b)



c)



d)

Figura 27. Vector de la velocidad. a) derecha, b) izquierda, c) frontal, y d) inferior.

En la Figura 28 se muestra la comparación de la velocidad estimada por el modelo y el experimental, en los diferentes puntos del ducto de limpieza de la máquina descascaradora de higuera. Mientras que en la Figura 29 se muestra una buena correlación ($R^2 = 82\%$) entre los datos estimados de la velocidad y los experimentales. El error estándar es de 0.8176. La media fue de 5.98 y 5.09 ms^{-1} para la velocidad estimada y experimental respectivamente. La desviación estándar fue de 1.85 y 1.63 ms^{-1} para la velocidad estimada y experimental respectivamente.

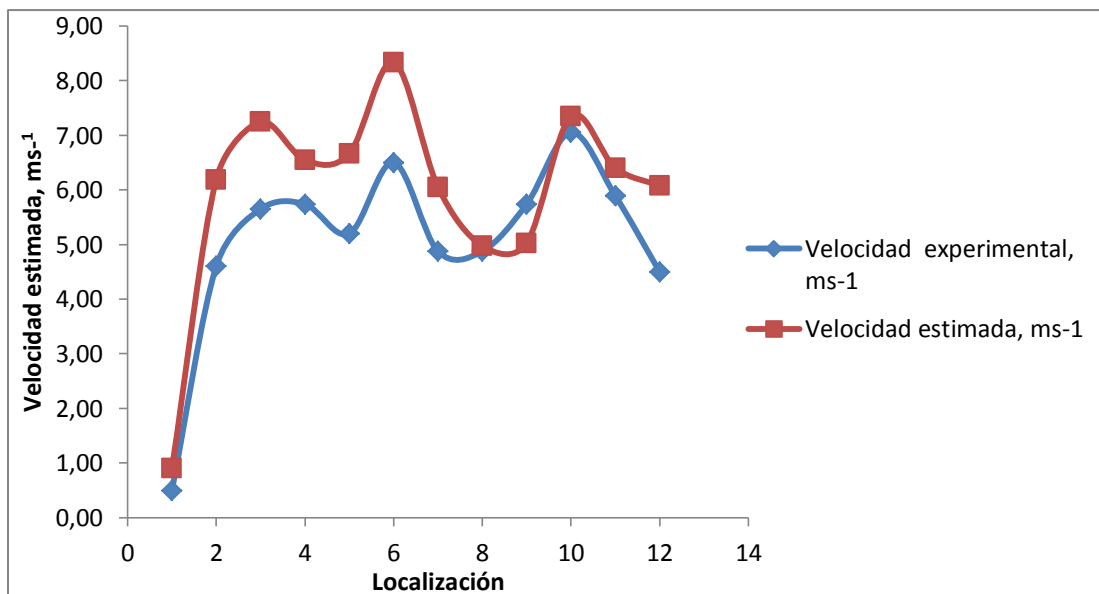


Figura 28. Comparación de la velocidad estimada por el modelo k- epsilon realizable y datos experimentales.

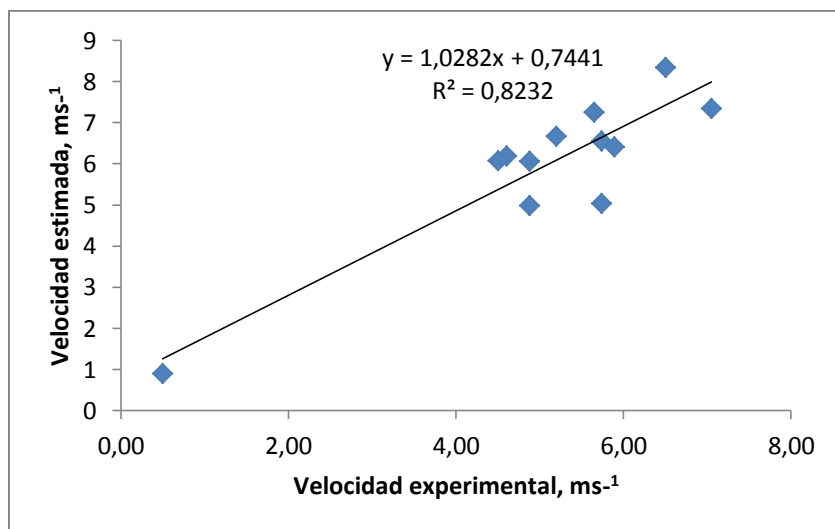


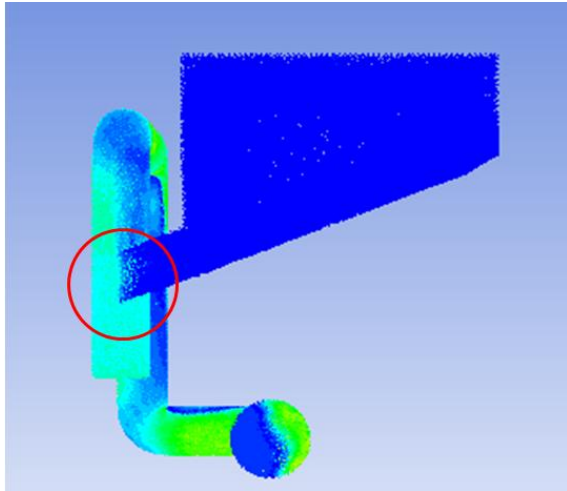
Figura 29. Velocidad estimada vs experimental para la limpiadora de granos de higuera.

Cuando las medias de la velocidad estimada y medida se compararon estadísticamente, con una prueba “t” reveló que no hubo diferencia significativa entre estas al nivel de significancia del 5 % (Cuadro 23).

Cuadro 23. Parámetros de validación del modelo CFD con los datos experimentales de la limpiadora de higuera en el nivel de significación $p \leq 0.05$.

Modelo	Parámetros de validación			Significancia
	Valor de R^2	Valor “t ₀ ” calculado	Valor “t” de tablas	
Velocidad	0.82	1.245	2.074	No significativa

En el experimento y en la simulación se observó que existe acumulación del material a limpiar en la entrada de la cámara de separación (Figura 30) por lo cual es necesario aumentar el ángulo de talud de la caja de vacío o tolva de la cámara de descascarado, para la construcción del nuevo prototipo.



a)



b)

Figura 30. Detalle de la acumulación del material en la entrada al ducto de limpieza principal. a) Modelo CFD, y b) Experimento.

5.6. Conclusiones

La comparación de los resultados experimentales y computacionales mostró una buena concordancia cualitativa y cuantitativa en el perfil de la velocidad.

El modelo de CFD identificó las secciones que dificultan el transporte neumático de las cáscaras y granos de higuera en el ducto del sistema de limpieza. Estos problemas deberán de ser corregidos antes de la construcción del prototipo, para reducir costos y pruebas experimentales.

Se puede concluir que la simulación numérica en CFD utilizando ANSYS FLUENT puede predecir correctamente el patrón del flujo cuantitativo y es un método alternativo para el estudio de la separación y limpieza de los materiales biológicos para la mejora de los parámetros de operación de los equipos agrícolas.

5.7. Literatura citada

- Afolabi, E.A. and J. G. M. Lee. 2013. CFD simulation of a single phase flow in a pipe separator using Reynolds Stress Method. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 8(7): 569-575.
- Alves de S., C. M.; D. Marçal de Q.; P. Roberto C. y L. Z. Leyva R. 2005. Desarrollo y modelación de una máquina de pre-limpieza de café en el cultivo de montaña. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 14(2): 1-13.
- Cernecky, J. and K. Plandorova. 2013. The effect of the introduction of an exit tube on the separation efficiency in a cyclone. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 30(3): 627 - 641.
- Corrêa, J. L. G; D. R. Graminho; M. A. Silva and S. A. Nebra. 2004. The cyclonic dryer - a numerical and experimental analysis of the influence of geometry on average particle residence time. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 21(1): 103 - 112.
- Du, X., K. Ni, J. Chen, C. Wu and Y. Zhao. 2013. Numerical Simulation and Experiment of gas-solid two-phase flow in a cross-flow grain cleaning device. *ASAE Paper No 131586235*, at the 2013 ASABE Annual International Meeting. Kansas City, Missouri.
- Dufresne, M., J. Vazquez, A. Terfous, A. Ghenaim and J. B. Poulet. 2009. CFD Modeling of Solid Separation in Three Combined Sewer Overflow Chambers. *Journal of Environmental Engineering*. 135(9): 776 – 787.
- Gebrehiwot, M. G., J. De Baerdemaeker and M. Baelmans. 2010. Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester:

Computational and experimental study. Biosystems Engineering. 105(2): 247 – 256.

Gebrehiwot, M. G., J. De Baerdemaeker and M. Baelmans. 2010. Numerical and experimental study of a cross-flow fan for combine cleaning shoes. Biosystems Engineering. 106(4): 448 – 457.

Herrera P., M. I.; M. Martins T.; G. J. Rodrigues y H. de las Cuevas M. 2006. Modelación mediante la dinámica de flujo computacional de la corriente de aire de un pulverizador. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 15(1): 12 -18.

Herrera P., M. I.; A. E. García de la Figal C., H. de las Cuevas M. y M. Martins T. 2010. Modelación mediante la dinámica de los fluidos por computadora (CFD) de la corriente de aire de un pulverizador agrícola con ventilador centrífugo. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 19(3): 62 -68.

Ponpesh, P, D. K. Giles and D. Downey. 2011a. Modeling turbulent multiphase flow for design of nut harvesters with reduced dust emission and low power demand: swirl-tube design. Transactions of the ASABE 54(3): 777-788.

Ponpesh, P., D. K. Giles and D. Downey. 2011b. Modeling turbulent multiphase flow in design of nut harvesters with reduced dust emission and low power demand. Transactions of the ASABE 54(4): 1199-1211.

Ponpesh, P., D. K. Giles and D. Downey. 2010. Mitigation of in-orchard dust through modified harvester operation. Transactions of the ASABE 53(4): 1037-1044.

Ponpesh, P. and D. K. Giles. 2009. Turbulent Gas-Particle Flow Modeling for the Mitigation of Dust Emission from Nut Harvesters. Annual International Meeting 2009. ASABE. Reno, Nevada. 21 June – 24 June, 2009. 34 p.

- Ponpesh, P. and D. K. Giles. 2008. Modeling Turbulent Flow for Design of Almond Harvesters with Low Power Demand and Reduced Emission of Particulate Material. Annual International Meeting 2008. ASABE. Providence, Rhode Island. 29 June – 2 July, 2008.
- Minin I. V. and O. V. Minin. 2011. Computational fluid dynamics technologies and applications. InTech. Printed in Croatia. 396 p.
- Magalhães, A. C., M. M. Teixeira, S. M. Couto e R. C. de Resende. 2006. Modelagem de máquina pneumática recolhadora de frutos de café em terreiro usando análise por elementos finitos. Engenharia Agrícola. 26(2): 483-492.
- Magalhães C., A., M. Martins T. y M. Herrera P. 2006. Construção e avaliação de uma máquina recolhadora de café em terreiro. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 15(2): 13-20.
- Ni, K., X. Du, S. Chen, J. Chen, and Y. Zhao. 2013. Study on grain distribution in a cross-flow grain separation chamber based on the discrete element method. ASAE Paper No 131586216, at the 2013 ASABE Annual International Meeting. Kansas City, Missouri.
- Sun H., H. M. Keener, W. Deng, and F. C. Michel. 2004. Development and Validation of 3-D CFD Models to Simulate Airflow and Ammonia Distribution in a High-Rise™ Hog Building during Summer and Winter Conditions. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. VI:1-24.
- Teske M. E.; H. W. Thistle; W. C. Schou; P. C. H. Miller; J. M. Strager; B. Richardson; M. C. Butler Ellis; J. W. Barry; D. B. Twardus; and D. G. Thompson. 2011. A review of computer models for pesticide deposition prediction. Transactions of the ASABE. 54(3): 789-801

Ueka, Y.; M. Matsui; E. Inoue; K. Mori; T. Okayasu; M. Mitsuoka. 2012. Turbulent flow characteristics of the cleaning wind in combine harvester. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 5(3): 102-106.

CAPITULO 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se consideran dos modelos a desarrollar y evaluar para los sistemas de descascarado y limpieza de un prototipo descascarador de higuierilla (*Ricinus communis L.*) respectivamente. Se construyeron e instrumentaron las maquetas para medir las variables de interés en el estudio de los dos órganos de trabajo del descascarador de higuierilla.

La variedad de higuierilla que se utilizó fue la roja de Oaxaca recolectada en la región de los Valles Centrales de Oaxaca en la población de Santa María Roaló.

Órgano de descascarado

La caracterización de las cápsulas y granos de la higuierilla es muy importante para la calibración de la separación entre el disco y el cóncavo en el modelo matemático para la predicción de la eficiencia del descascarado (grano descascarado, no descascarado y dañado). Además se tiene que tomar en cuenta el contenido de humedad del material para realizar una mejor estimación. La humedad promedio de la cápsula, el grano y la cáscara en el estudio fueron 6.27 ± 0.30 , 4.64 ± 0.26 y 7.40 ± 0.24 respectivamente.

La calibración y validación del modelo se realizó a 120 rpm del órgano de descascarado, donde se observó el mejor desempeño en las pruebas de laboratorio.

El modelo de la predicción de la eficiencia del descascarado de las cápsulas y el grano no descascarado se ajustaron apropiadamente al valor experimental ($R^2 = 0.930$) y

error estándar de 4.74. Mientras que el modelo de predicción del grano dañado se ajustó adecuadamente al experimental ($R^2 = 0.950$) con un error estándar de 0.39.

Órgano de limpieza

La determinación de las propiedades aerodinámicas y termodinámicas de las cápsulas, el grano y las cáscaras, es fundamental para las condiciones iniciales y de frontera en el modelo CFD. En la simulación CFD se utilizaron los modelos k- ϵ y DPM (modelo de fase dispersa) para el análisis de la mezcla aire grano-cáscara como un flujo en fase diluida. Con los modelos numéricos antes descritos, se obtiene el campo de velocidades del aire, en toda la geometría del ducto de limpieza, para una condición inicial de 6 ms^{-1} . Además se identificaron los puntos críticos en la entrada de la mezcla al ducto, lo que coincide con lo observado en pruebas realizadas sobre un banco de ensayos, por lo cual se tiene que aumentar el ángulo de reposo de la caja de vacío para la construcción del nuevo prototipo.

La comparación de la velocidad estimada por el modelo y el experimental, muestra una buena correlación ($R^2 = 82\%$) en los diferentes puntos del ducto de limpieza de la máquina descascaradora de higuera. El error estándar fue de 0.8176. La media de 5.98 y 5.09 ms^{-1} para la velocidad estimada y experimental respectivamente. Mientras que la desviación estándar fue de 1.85 y 1.63 ms^{-1} para la velocidad estimada y experimental respectivamente.

El trabajo realizado muestra que el software de ANSYS – FLUENT es apto para predecir el comportamiento de la velocidad del flujo de aire en el ducto de una máquina limpiadora de granos de higuera.

6.2. Recomendaciones

Continuar con los estudios del modelado del proceso de descascarado o trilla con otras variedades de higuera u otros cultivos. Además en el modelo incluir el contenido de humedad del grano.

La simulación CFD sirve para detectar deficiencias en el diseño de sistemas de limpieza, es importante continuar difundiéndolo en la comunidad científica para el diseño de máquinas en la ingeniería agrícola.

La mayoría de las investigaciones realizadas en otros países sobre el tema de los modelos matemáticos de los órganos de trilla de flujo tangencial y axial han sido abordadas para las cosechadoras de granos. En México, los estudios sobre el modelado del descascarado de las cápsulas comienzan con la presente investigación.