

Propiedades físicas y mecánicas de granos de *Jatropha curcas* cultivadas en Colombia

Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* seed grown up in Colombia

Julio César Betancur-Prisco, Carolina Mira-Hernández, Luis Santiago París-Londoño*

Grupo de investigación Ingeniería, Energía, Exergía y Sostenibilidad (IEXS), Escuela de ingeniería, Universidad EAFIT. Carrera 49 N° 7 Sur - 50. Medellín, Colombia.

(Recibido el 11 de septiembre de 2013. Aceptado el 24 de julio de 2014)

Resumen

Una opción promisoriosa en el campo de los biocombustibles es el biodiesel obtenido del aceite de los granos de *Jatropha curcas*. Ésta es una planta que se desarrolla en países tropicales, puede crecer en suelos marginales, con poca irrigación y ayuda a controlar la erosión de los suelos. Este arbusto crece rápidamente y produce semillas con un contenido de aceite alrededor del 35%, y es una especie que no compite con los cultivos con fines alimenticios. Sin embargo, para que la producción de biodiesel a partir de *Jatropha* sea sostenible y rentable se requiere investigación y desarrollo tecnológico, en todas las etapas de la cadena productiva. Este artículo presenta los resultados de un proceso de investigación y evaluación que tiene como objetivo determinar algunas características físicas y mecánicas de los granos de *Jatropha curcas*. Estos datos brindan información relevante para el diseño de equipos y procesos para la producción de aceite de *Jatropha*. Como resultado de la investigación se obtuvieron datos como son: la fuerza (119 N), la energía (332 N.mm) y la deformación (2,8 mm) requeridas para la fractura, dimensiones promedio de los granos (longitud: 10,8 mm/ancho: 17,8 mm/espesor: 8,6 mm), fracciones de cáscara (38%) y albumen (62%) en la semilla, humedad del grano (5,2%), contenido de aceite (29% m/m), poder calorífico de la cáscara (0,3 MJ/kg), y el albumen (0,8 MJ/kg); entre otras. Todas estas variables, además de ser útiles para el proceso de diseño, permiten evaluar usos alternativos para subproductos del proceso de extracción. Cabe anotar, que es poca la información que se encuentra con respecto a este grano, en el contexto colombiano.

* Autor de correspondencia: Luis Santiago París Londoño, correo electrónico: lparis@eafit.edu.co

-----**Palabras clave:** *Jatropha curcas*, propiedades físicas, propiedades mecánicas

Abstract

Biodiesel from *Jatropha curcas* seeds is one promissory option in the biofuels field. This is a crop that develops in tropical countries which can grow on marginal soils with low irrigation and helps to control the erosion. This bush grows quickly and produces seeds with approximately 35% oil content and it does not compete with food crops. However, for the production of biodiesel from *Jatropha* to be sustainable and profitable it is required research and technological development at all stages of the production chain. This article shows the results of a research process that aims the determination of some significant physical and mechanical characteristics of *Jatropha curcas* seeds. This data are important, because they provide necessary information in the design of equipment and processes for *Jatropha curcas* oil production; especially, for mechanical oil extraction. As a result of the research process different properties were determined, for example: compression (2.8 mm) and energy (332 N.mm) required for fracture, average dimensions of seeds (length: 10.8 mm/width: 17.8 mm/thickness: 8.6 mm), fractions of shell (38%) and albumen (62%) in the seed, moisture content of seed (5.2%), oil content (29%), calorific value of shell (0.3 MJ/kg) and albumen (0.8 MJ/kg). All these variables are important parameters in the design of equipment, but also are useful to evaluate alternative uses for by-products of the oil extraction process, for example as energy source. Besides, the available information in Colombia about *Jatropha* is not much.

-----**Keywords:** *Jatropha curcas*, physical properties, mechanical properties

Introducción

El biodiesel obtenido a partir de granos de *Jatropha curcas* es una opción promisoría, sobre todo para países ubicados en trópicos y subtropicos [1]. La *Jatropha* o piñón es una planta silvestre que se desarrolla en países tropicales, puede crecer en suelos marginales, sin irrigación y ayuda a controlar la erosión de los suelos [2]. Además, crece rápidamente y produce semillas con alto contenido de aceite; entre el 30% y 40% durante varios años. Las condiciones de cultivo de esta especie reducen su competencia con los que se utilizan con fines alimentarios, y puede ser utilizada para la recuperación de suelos, por éstas y otra razones es considerada promisoría.

Sin embargo, para afirmar que la producción de biodiesel de *Jatropha* es más sostenible que la del diesel a partir del petróleo, se debe garantizar que provenga de un material renovable y que el impacto negativo ambiental sea menor [3]. Para lograr que se cumplan estas condiciones se requiere investigación y desarrollo tecnológico en todas las etapas de la cadena productiva.

En este orden de ideas, es necesaria la investigación de variables físicas, mecánicas y químicas del grano, que den cuenta de su comportamiento y brinden información necesaria para el diseño de equipos y procesos. Algunos autores han establecido diferentes características de algunas variedades de *Jatropha* alrededor del mundo

[4-11]. Sin embargo, no hay información sobre especies que hayan sido cultivadas y cosechadas en Colombia. Es así como toma importancia lograr la caracterización de una especie cultivada en condiciones locales.

Además, existen algunas variables de las que se encuentra poca información, como el poder calorífico de la torta (mezcla de albumen y cáscara resultante del proceso de prensado), y que dan cuenta de opciones de aprovechamiento de algunos de los subproductos del proceso de extracción mecánico de aceite.

En términos generales, actualmente la producción del biodiesel comprende las etapas de: cultivo, recolección de semillas, extracción de aceite y conversión del aceite en biodiesel. De esta cadena productiva se obtiene como producto principal el biodiesel y como subproductos: madera, hojas, cascarilla en la que vienen envueltas las semillas, torta residual del proceso de extracción, glicerina y compuestos químicos [3]. Al hacer un balance de energía global sobre el proceso se concluye que se requieren 884MJ para producir 1000MJ de energía en biodiesel. Este balance es levemente positivo, pero al considerar los subproductos se estima que la salida de energía total del proceso (contenida en: biodiesel, hojas, madera, cascarilla, torta y glicerina) es de 18883MJ [12].

Los subproductos de la producción de biodiesel de *Jatropha* tienen actualmente diferentes usos. La cascarilla y la torta se usan como combustible y como fertilizante, respectivamente. La cascarilla se ha usado en combustión directa, en la generación de biogás y como materia prima para gasificación; con resultados similares al de la madera [3]. Éstos han sido usos típicos hasta ahora, pero que aún requieren investigación y desarrollo para aprovechar mejor la *Jatropha curcas* como fuente energética.

Sin embargo, para considerar diferentes opciones de aprovechamiento y para un buen diseño de los equipos y procesos, es necesario establecer, primero, algunas variables físicas, mecánicas y químicas que sirvan como parámetros e indicios del comportamiento del grano cuando sean

sometidos a los procesos. Es claro que en esta investigación no se incluyeron todas las variables involucradas en el proceso de extracción de aceite, pero fueron seleccionadas algunas que son relevantes y al mismo tiempo pueden compararse con la información reportada por otros autores.

Materiales y métodos

Granos de *Jatropha curcas*

Para este estudio se usaron granos de *Jatropha curcas* provenientes de un cultivo ubicado en Sopetrán, Antioquia, y denominados como CPB-2, la cual es una variedad proveniente de Brasil. Esta denominación es dada por la empresa Colombiana de Biocombustibles (COLBIO); quienes suministraron el grano para cada uno de los ensayos.

Sopetrán es un pequeño municipio cercano a Medellín (Colombia). El cual se caracteriza por tener una temperatura promedio cercana a los 25 °C, una altura sobre el nivel del mar de 750 metros y una precipitación anual cercana a los 1500 mm [13]. Los granos se cosecharon de forma manual durante las primeras semanas de marzo de 2013 y posteriormente almacenados en un lugar donde fueron secados, exponiéndolos de manera directa al sol durante algunos días. Después las semillas fueron transportadas a la Universidad EAFIT (Medellín) y almacenadas en un lugar con una temperatura promedio entre 18 y 23 °C. El contenido de humedad medido en los granos fue aproximadamente 5,3% y un contenido de aceite promedio cercano al 35%.

Propiedades físicas

Dimensiones de granos y albumen, áreas proyectadas y esfericidad

A partir de este ensayo se determinaron las características geométricas básicas de los granos de *Jatropha curcas* mediante medición directa y usando métodos estadísticos para el procesamiento de los datos. Como resultado

de estas pruebas, se obtuvieron promedios ponderados de las dimensiones de los granos y albumen, con sus respectivas desviaciones estándar. Esta información da cuenta de variables útiles en procesos previos como almacenamiento, clasificación, descascarado, entre otros. El ensayo se realizó dos veces con muestras aleatorias de grano.

Inicialmente, se determinaron las dimensiones de los granos completos, es decir, sin descascarar, en este caso se tomó una muestra de aproximadamente 100 gramos y se procedió a tomar las dimensiones de cada uno de los granos con un calibrador digital con un rango de medición entre 0-200 mm y precisión de 0,01 mm. Después se realizó el mismo procedimiento con el albumen, para este caso el proceso de separación se realizó de forma manual.

En la figura 1 se muestra el sistema de referencia utilizado para definir el ancho, longitud y espesor del grano. Esta convención se definió al interior del proyecto con el fin de dar mayor claridad sobre los resultados obtenidos.

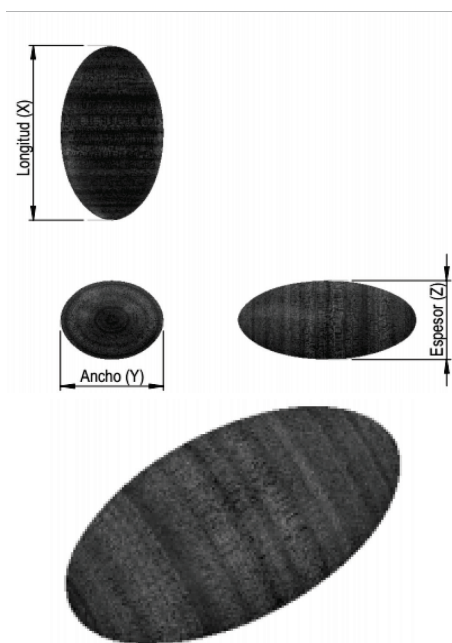


Figura 1 Sistema de referencia definido para medición de dimensiones de granos y albumen de *Jatropha curcas*

A partir de las dimensiones se determinaron los diámetros geométricos y aritméticos promedio, el volumen y la esfericidad (Stroshine, 1998) usando las ecuaciones (1), (2), (3) y (4). Estas ecuaciones corresponden a las de un elipsoide, la cual es una forma geométrica semejante a los granos de *Jatropha curcas*.

$$\text{Diámetro Aritmético } (D_a) = \frac{(x+y+z)}{3} \quad (1)$$

$$\text{Diámetro Geométrico } (D_g) = (x+y+z)^{1/3} \quad (2)$$

$$\text{Esfericidad } (\phi) = \frac{(x+y+z)^{1/3}}{x} = \frac{D_g}{x} \quad (3)$$

$$\text{Volumen Unitario } (V_u) = \frac{4}{3} \pi(x.y.z) \quad (4)$$

Humedad relativa del grano y de la cáscara

El objetivo de este ensayo era establecer el contenido de agua que presentan los granos usados en los ensayos. Algunos autores reportan la humedad como un dato que tiene un fuerte impacto sobre la cantidad de aceite obtenido del proceso de extracción mecánica [1], razón por la cual se decidió incluir esta variable entre los análisis realizados.

La humedad medida corresponde a la presente en el grano después del primer proceso de secado, que en algunos casos se realiza bajo exposición directa al sol. Para los granos sometidos a los ensayos, este proceso se realizó en el mismo lugar donde se cultivó y cosechó el grano. Además se midió el contenido de agua de una muestra de grano de la misma especie y en el mismo cultivo, recién cosechado, con el objetivo de establecer la cantidad de agua que posee el grano al momento de ser recolectado.

Otro de los ensayos realizados fue la medición del contenido de humedad de la cáscara. El cual se realizó en el laboratorio del grupo interdisciplinario de estudios moleculares (GIEM) de la Universidad de Antioquia. En donde se determinó el porcentaje de humedad de dos muestras de cáscara de *Jatropha curcas*. Este ensayo fue realizado bajo la norma técnica colombiana NTC 5167.

Para los ensayos realizados al interior de la Universidad EAFIT. Se usó un horno *Heraeus*

y una balanza electrónica con precisión de 0,01 g. Además se seleccionaron de manera aleatoria 100 gramos de grano, los cuales fueron pesados e introducidos al horno. La temperatura programada en el horno fue de 60 °C. Este ensayo se realizó dos veces durante 80 horas, cada uno, tiempo en el cual se registró la masa del grano en diferentes momentos y posteriormente se graficó. Para determinar el porcentaje de humedad para el grano se usó la ecuación (5) [14].

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{Peso Muestra Húmeda } (m_h) - \text{Peso Muestra Seca } (m_s)}{\text{Peso Muestra Húmeda } (m_h)} \times 100 \quad (5)$$

Fracción de masa de cáscara y albumen en los granos de *Jatropha curcas*

En este caso se tomaron dos muestras aleatorias de grano de *Jatropha curcas*, cada una de aproximadamente 500 g, y se separó de forma manual la cáscara del albumen, por medio de fractura de la cáscara, evitando afectar significativamente el albumen.

Inicialmente se determinó la masa de cada una las muestras usando una balanza digital con una precisión de 0,01 g. Después se midieron las masas correspondientes de cáscara y albumen, información a partir de la cual se determinaron los porcentajes que representaba cada una con respecto a la masa inicial, con las ecuaciones (6) y (7).

$$\% \text{Cáscara} = \frac{\text{Masa de Cáscara } (g)}{\text{Masa Inicial de Grano } (g)} \quad (6)$$

$$\% \text{Albumen} = \frac{\text{Masa de Albumen } (g)}{\text{Masa Inicial de Grano } (g)} \quad (7)$$

Propiedades mecánicas

Fuerza y energía para la fractura del grano

El objetivo de este ensayo era determinar la fuerza y energía requerida para lograr la fractura de la cáscara de los granos de *Jatropha curcas*. Este dato se encuentra reportado en diferentes artículos y ha sido realizado con diferentes variedades de *Jatropha curcas*. Sin embargo, es poca la información que se encuentra al respecto a nivel colombiano.

Este ensayo fue realizado a 40 probetas; cada probeta corresponde a un grano de *Jatropha curcas* seleccionado de forma aleatoria. Cada uno de los granos fue sometido a la prueba hasta lograr la fractura de la cáscara evitando afectar significativamente el albumen. La velocidad a la cual se realizó el ensayo fue 6 mm/min. El equipo utilizado fue una máquina universal *INSTRON* 3366 serie Q5582 con una celda de capacidad de 0-500 N. A continuación se ve el equipo y montaje utilizado (Figura 2). Las pruebas se realizaron con las probetas en la misma posición; la cual corresponde a la posición de reposo del grano.

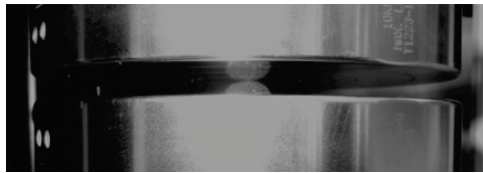
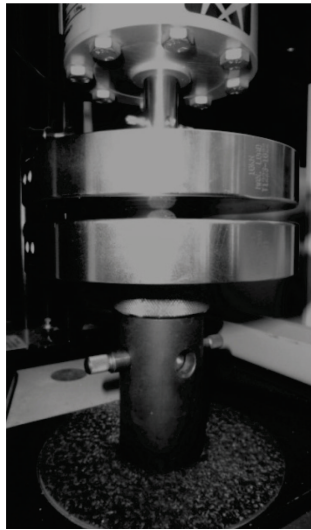


Figura 2 Montaje ensayo de fuerza de fractura granos de *Jatropha curcas* sometido a fuerza de compresión entre dos platos

Se registraron los datos de fuerza y deformación mientras se desarrollaba cada uno de los ensayos. Información a partir de la cual se determinaron fuerza y energía requerida para la fractura, la rata de deformación y la dureza de la cáscara en el puto de fractura. Para esto se hizo uso de las ecuaciones (8) y (9) [9].

$$\text{Dureza del grano (H)} = \frac{\text{Fuerza requerida } (F_R)}{\text{Deformación en punto de ruptura } (D_R)} \quad (8)$$

$$\text{Rata de Deformación } (R_D) = \frac{\text{Deformación en punto de ruptura } (D_R)}{\text{Dimensión del grano en la posición de carga } (d)} \quad (8)$$

La energía se define como el área bajo la curva entre el punto inicial del ensayo y el punto de ruptura de la cáscara, en la figura 3 se puede ver la curva de fuerza y deformación para uno de los ensayos realizados.

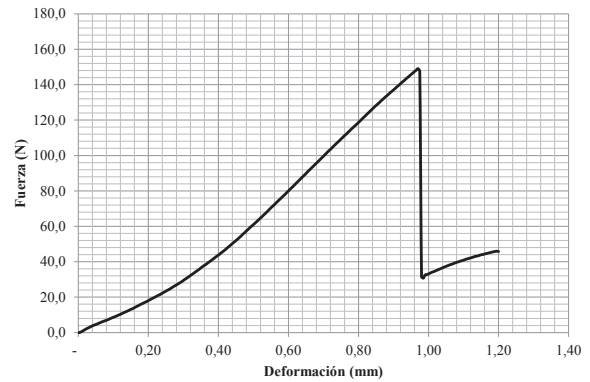


Figura 3 Curva de Fuerza y deformación en uno de los ensayos de fuerza de fractura para granos de *Jatropha Curcas*

Propiedades químicas

Poder calorífico (PC)

El poder calorífico de un combustible se define como la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una cantidad unitaria de combustible y los productos de la combustión se enfrían a una temperatura de 25 °C [15]. El poder calorífico puede ser superior o inferior, el primero

se presenta cuando se condensa por completo el agua y el segundo cuando el agua sale en forma de vapor.

En este ensayo se determinó el poder calorífico de la cáscara, el albumen y la mezcla de los dos. El equipo usado fue una bomba calorimétrica marca PARR modelo 1341EB y un termómetro marca Brand con rango de medición de 19 a 35 °C. Para este caso el poder calorífico determinado se realizó en un proceso de combustión a volumen constante.

En general, el procedimiento realizado fue el siguiente: se dispuso un crisol para combustible, al interior de la bomba, donde se instaló una bobina de alambre fino, a través de la cual se pasó una corriente eléctrica por el alambre, provocando que el combustible se encienda. La bomba está rodeada por una camisa de agua con el fin de absorber el calor desarrollado por la combustión, y fue en este punto donde se midió la temperatura. La bomba tiene también una camisa exterior y un espacio de aire alrededor del recipiente o camisa de agua central para minimizar las pérdidas de calor al ambiente. Los datos que se registraron en cada uno de los ensayos fueron de tiempo y temperatura. A partir de éstos se obtuvieron curvas como la que se puede ver en la figura 4.

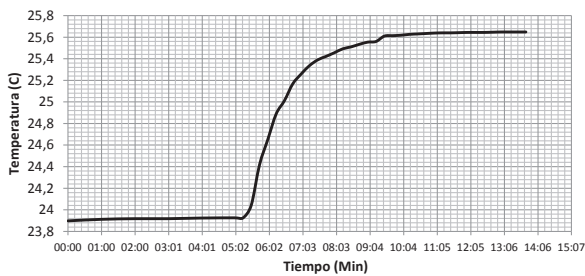


Figura 4 Variación de la temperatura en ensayos de poder calorífico de cáscara de *Jatropha curcas*

Con los valores hallados y haciendo uso de las ecuaciones (10) y (11), se calcularon las diferencias de temperatura para cada ensayo y posteriormente el poder calorífico.

$$\Delta T = T_c - T_a \quad (10)$$

$$PCS = \frac{C\Delta T - e_3}{m} \quad (11)$$

Donde:

T_c : Temperatura después del incremento a causa de la ignición

T_a : Temperatura antes de la ignición

PCS: Poder Calorífico superior

C: Equivalente en agua del calorímetro

e_3 : Corrección por combustión del alambre fusible

m: Masa de la muestra del combustible

Se registraron datos cada minuto hasta el minuto 5 que se enciende el combustible, de ahí en adelante se tomó la temperatura cada 15 segundos hasta que se estabilizó, se apagó el rotor, y se midió el alambre (fusible) que quedó del proceso de combustión. Por último se almacenaron los datos y se realizó el cálculo del poder calorífico promedio para los tres casos evaluados (cáscara, albumen y mezcla de cáscara y albumen). El procedimiento anterior se realizó 4 veces para cada uno de los casos y se hallaron los valores promedio para cada uno.

Contenido de aceite

Teniendo en cuenta la información reportada por algunos autores, en donde se expone que por el método de solventes se puede extraer el 99,3% del aceite contenido en los granos [16], entonces se usó este proceso para determinar el contenido de aceite en los granos. Para cada uno de estos ensayos se usó un equipo Soxhlet, en el cual se introdujeron 500 gramos de grano seco; seleccionados aleatoriamente. Estas muestras fueron sometidas al arrastre con solvente (Bencina) a una temperatura de 70 °C, presión atmosférica y con reflujo constante. Con lo cual se obtuvo una mezcla de solvente y aceite que se separó con un rotoevaporador. Este ensayo fue realizado tanto al grano completo como al

albumen (grano sin cáscara), en cada caso se realizaron dos ensayos.

Para los ensayos sin cáscara se realizó el proceso de separación de forma manual, y posteriormente se estableció la masa de albumen y de cáscara de cada una de las muestras. Después de someterse al ensayo de extracción, se determinó la masa de aceite y torta obtenida, respectivamente.

El contenido de aceite se calculó usando la relación que se expone en la ecuación (12). Esta relación se usó para ambos ensayos (con y sin cáscara), sin importar que en este último se haya usado sólo el albumen para el proceso de extracción.

$$\text{Contenido de Aceite (\%)} = \frac{\text{Masa de Aceite (g)}}{\text{Masa Inicial de Grano (g)}} \quad (12)$$

Resultados y discusión

Dimensiones de granos y albumen, áreas proyectadas y esfericidad

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 1. De acuerdo a las dimensiones halladas, es posible afirmar que los granos y el albumen de *Jatropha curcas* se asemejan a un elipsoide escaleno ($x > y > z$). Además, el albumen presenta una diferencia dimensional relativamente constante, en las tres direcciones medidas con respecto al grano. Es decir, el albumen presenta un factor de escala (λ) con respecto al grano. El cual es aproximadamente $\lambda = 0,79$, eso significa, que en promedio, el albumen es aproximadamente 21% más pequeño en cualquiera de las direcciones con respecto al grano. Basado en esta información se puede decir que existe también una relación volumétrica dada por λ^3 , que para este caso es $\lambda^3 = 0,493$. En otras palabras al retirar la cáscara del grano se estima una reducción en el volumen del 49%.

Tabla 1 Dimensiones geométricas básicas de granos y albumen de *Jatropha curcas*

Parámetro	Grano		Albumen	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
Longitud (X) [mm]	10,80	0,60	8,49	0,67
Ancho (Y) [mm]	17,80	0,76	14,70	0,64
Espesor (Z) [mm]	8,58	0,46	6,60	0,71
Diámetro aritmético Promedio [mm]	12,39	0,45	9,94	0,45
Diámetro geométrico Promedio [mm]	11,80	0,45	9,37	0,51
Volumen Unitario [cm ³]	6,92	0,78	3,48	0,54
Esfericidad (%)	66,30	2,20	63,60	3,50

Ahora, en cuanto a la esfericidad, en el caso del grano es aproximadamente de 66,3%, ésta es cercana a la de otros granos, como es el caso del maíz (66,4%) [17]. Por otro lado la esfericidad del albumen está por debajo de la del grano y es aproximadamente 63,6%.

Estos datos son relevantes al considerar realizar procesos de separación y clasificación, después de

un proceso de descascarado previo a la extracción mecánica, el cual es el estado recomendado de la *Jatropha* para el proceso de extracción mecánica [18], pero que con los equipos comerciales usados actualmente no se ha logrado, porque al parecer la presencia de cáscara es importante, al contribuir de manera directa en el aumento de presión sobre la masa usada en el proceso de extracción [18].

Humedad relativa del grano y de la cáscara

El comportamiento del peso de la muestra de granos de *Jatropha curcas* se muestra en la figura 5. Como se puede ver el comportamiento corresponde a una curva asintótica.

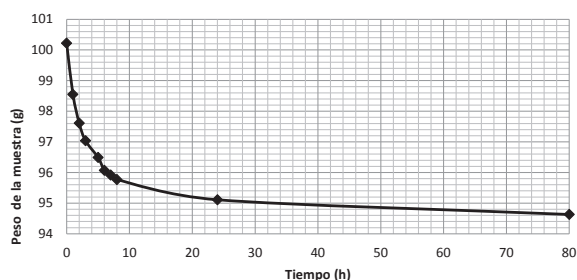


Figura 5 Variación del peso de la muestra de granos de *Jatropha curcas*

La humedad promedio hallada en los granos fue de aproximadamente 5,25% ($\pm 0,47\%$), tal como se puede ver en la tabla 2, correspondiente a 5,26 gramos del peso inicial de la muestra y para la cáscara fue de 9,18%. Cabe anotar que después de 24 horas ya se había retirado el 94% de la masa de agua total. Algunos autores aseguran que la humedad es una variable que afecta de manera directa la cantidad de aceite que se puede extraer de los granos, y sostienen que para lograr mejores rendimientos el contenido de humedad debería estar 2-4 % [1]. Entonces sería recomendable disminuir el contenido de agua.

Tabla 2 Resultados ensayo de humedad grano y cáscara de *Jatropha curcas*

Muestra	Humedad Medida	Promedio
Grano 1	4,92%	5,25%
Grano 2	5,58%	
Cáscara 1	9,14%	9,18%
Cáscara 2	9,21%	

También se estableció que la humedad presente en el grano recién cultivado es aproximadamente el 27%. Este valor es importante porque puede dar cuenta de la energía requerida para el proceso de secado del grano después de ser cosechado.

Fracción de masa de cáscara y albumen en los granos de *Jatropha curcas*

En el caso de la variedad de *Jatropha curcas* analizada, la cáscara representa aproximadamente el 37,6% de la masa total del grano en base seca, como se puede ver en la tabla 3. Esto indica que al retirar la cáscara previamente al proceso de extracción, se reduciría el 38% de la masa a transportar, en otras palabras se podría disminuir la energía requerida en los procesos de extracción o aumentar la cantidad de albumen transportado, que es donde se encuentra en gran porcentaje el aceite disponible en la *Jatropha curcas*.

Tabla 3 Contenido de cáscara y albumen en granos de *Jatropha curcas*

Ensayo	Descripción	Masa [g]	Fracción Porcentual [%]
1	Cáscara	190	38,00%
	Albumen	310	62,00%
2	Cáscara	186	37,20%
	Albumen	314	62,80%

Fuerza y energía para la fractura del grano

En la figura 6 se muestran los granos de *Jatropha curcas* después de ser sometidos al ensayo, como se puede ver en todas las muestras se logró fracturar la cáscara, evitando afectar significativamente el albumen.



Figura 6 Granos de *Jatropha curcas* después de ser sometidos al ensayo de fuerza de fractura

A partir de este ensayo se determinaron los valores de fuerza, deformación, dureza, rata de deformación y energía, los cuales se pueden ver en la tabla 4. La fuerza máxima promedio fue aproximadamente 120 N, el cual es cercano al reportado por algunos autores de 140 N [10], [19].

Tabla 4 Resumen resultados ensayo fuerza de fractura granos de *Jatropha curcas*

Descripción	Valor	Unidad
Fuerza Promedio	118,7	[N]
Desviación Estándar fuerza	20,34	[N]
Deformación Promedio	2,8	[mm]
Dureza Promedio	42,39	[N/mm]
Rata de deformación promedio	25,93	%
Energía Promedio	332,36	N.mm

Poder calorífico (PC)

El poder calorífico ofrece información del aprovechamiento de los subproductos del proceso de extracción de aceite, por prensado mecánico, como la cáscara y la torta (mezcla de albumen y cáscara). Los resultados calculados a partir de los datos hallados, se encuentra registrados en la tabla 5. El agua condensada hallada dentro del crisol dio cuenta de que el poder calorífico determinado fue el superior. Como se puede ver el poder calorífico mayor fue el del albumen, el cual es aproximadamente 24,5% superior al de la mezcla de albumen y cáscara. Y este último a su vez es superior, en aproximadamente 15,1% al de la cáscara. En el caso de la mezcla, el poder calorífico hallado (20,11 MJ/kg) es cercano al

promedio del poder calorífico del albumen y la cáscara (21,85 MJ/kg).

Tabla 5 Poder Calorífico de la cáscara, el albumen y la mezcla (albumen-cáscara) de granos de *Jatropha curcas*

Muestra	Poder Calorífico	Desviación Estándar	Unidades
Cáscara	17,08	0,308	[MJ/kg]
Albumen	26,63	0,789	[MJ/kg]
Cáscara + Albumen	20,11	0,003	[MJ/kg]

Contenido de aceite

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6, estos resultados fueron calculados en base a la masa inicial de grano. Como se puede ver, la cantidad máxima de aceite obtenido por extracción con Bencina, bajo las condiciones que ya se han descrito, fue de 29,3%. Sin embargo, con respecto a este valor, el aceite obtenido a partir del albumen representa el 90,4%. Además, con respecto a la masa de albumen usada para el proceso de extracción, la cantidad de aceite obtenido representa el 42,5%.

Tabla 6 Porcentaje de aceite extraído por solventes a partir de granos de *Jatropha curcas*

Muestra	Aceite Obtenido	Promedio	Desviación Estándar
Con cáscara 1	29,24%	29,32%	0,11%
Con cáscara 2	29,40%		
Sin cáscara 1	26,04%	26,52%	0,68%
Sin cáscara 2	27,00%		

A partir de estos resultados, surgió el interrogante si la cáscara posee aceite. Por esta razón se realizaron ensayos de extracción a partir de una muestra de sólo cáscara, de donde se obtuvo que en relación con la masa inicial de las muestras (500 gramos) el contenido de aceite fue aproximadamente de 2%.

Por último, al aceite obtenido se le realizaron algunos análisis fisicoquímicos, éstos fueron

llevados a cabo por el laboratorio de Salud Pública de la Universidad de Antioquia; específicamente en el área de análisis fisicoquímico. Para este ensayo se enviaron 250 gramos, y las propiedades determinadas fueron el índice de acidez, índice de saponificación, índice de yodo, índice de peróxido, índice de refracción y peso específico. Los resultados se presentan en la tabla 7.

Tabla 7 Características fisicoquímicas aceite de *Jatropha curcas* extraído por solventes

Parámetro	Método	Unidades	Valor
Índice de Acidez	AOAC 925,41	%	10,96
Índice de Saponificación	AOAC 920,160	mg KOH/g de grasa	193,3
Índice de Yodo	AOAC 920,159	%	88,65
Índice de Peróxido	AOAC 965,33	meq O ₂ /kg de grasa	0,59
Índice de Refracción (25 C)	ISO 6320	-	1,469
Peso Específico (20 C)	Picnometría	-	0,9133

En cuanto a estas propiedades se puede decir que el aceite extraído presenta un color amarillo claro, un índice de yodo que está entre el rango de mono-insaturados (50 a 100), más insaturado que el de palma y menos insaturado que el maíz y algodón [20]. Las otras propiedades son semejantes al aceite de palma utilizado actualmente para la producción de aceite comestible y biodiesel.

Conclusiones

Los granos de *Jatropha curcas* y el albumen presentan dimensiones geométricas típicas de un elipsoide escaleno. Además existe un factor de escala entre el albumen y el grano de 0,79 en las direcciones medidas. En otras palabras, el albumen es más pequeño en un 21% en relación con el grano. Característica útil para procesos de descascarado y separación.

Las propiedades mecánicas como fuerza y deformación para lograr la ruptura de la cáscara, son valores que brindan información para el diseño de equipos y/o procesos, para separar la cáscara del albumen. En el caso de esta investigación la fuerza promedio fue 120 N y la

deformación máxima fue 2,8 mm. Estos valores fueron medidos en la posición de reposo natural del grano.

Los granos de *Jatropha curcas* tienen una humedad relativa cercana al 27% al momento de ser cosechada, y algunos autores reportan como condiciones óptimas de humedad, para obtener mejores rendimientos en el proceso de extracción, entre el 2% - 4%. Esto indica que es recomendable retirar entre 23% - 25% de la humedad.

La *Jatropha curcas* es una semilla oleaginosa con un alto contenido de aceite, que puede ser usado para la producción de biocombustibles. Sin embargo, la mayor parte del aceite disponible en el grano se encuentra al interior del albumen. Además la cáscara representa el 49% del volumen y el 38% de la masa del grano. Estas características hacen pensar que un proceso de descascarado previo al proceso de extracción mecánico, es una opción que debería ser considerada.

El poder calorífico de la cáscara (17,08 MJ/kg) es cercano al de algunas especies maderables, lo cual

la deja ver como una opción de aprovechamiento de este subproducto, procesos de combustión directa o gasificación.

Los valores reportados en este artículo corresponden sólo a una variedad de *Jatropha curcas* cultivada y cosechada bajo las condiciones reportadas anteriormente en Colombia. Es importante tener claro esto, porque la variedad y las condiciones de cultivo son variables que afectan considerablemente los valores obtenidos.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a COLCIENCIAS (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación), por su aporte en el desarrollo de este proyecto, a la Universidad EAFIT, por su apoyo tanto en equipos y en espacios como en recursos humanos, al grupo de investigación IEXS (Ingeniería, Energía, Exergía y Sostenibilidad), bajo el cual se concibió y realizó todo este proyecto y a la empresa COLBIO (Colombiana de Biocombustibles), quien suministró el grano para cada uno de los ensayos, además de suministrar información relevante al proyecto.

Referencias

1. P. Beerens. *Screw-pressing of Jatropha seeds for fuelling purposes in less developed countries*. Master's degree thesis, Eindhoven University of Technology. Eindhoven, Netherlands. 2007. pp. 78.
2. W. Achten. *Sustainability evaluation of biodiesel from Jatropha curcas L. A life cycle oriented study*. PhD dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, Groep Wetenschap & Technologie. Heverlee, Belgium. 2010. pp. 173.
3. W. Achten, L. Verchot, Y. Fanken, E. Mathijs, V. Singh, R. Aerts, B. Muys. "Jatropha biodiesel production and use". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 32. 2008. pp. 1063-1084.
4. A. Atabani, T. Mahlia, I. Badruddin, H. Masjuki, W. Chong, T. Mahlia, K. Lee. "Investigation of physical and chemical properties of potential edible and non-edible feedstocks for biodiesel production, a comparative analysis". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 21. 2013. pp. 749-755.

5. O. Resende, V. Siqueira, T. Chaves. *Form and size of the jatropha (Jatropha curcas L.) beans during drying at several temperatures*. Proceedings of the Post Harvest, Food and Process Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: agriculture and engineering for a healthier life. Valencia, Spain. 2012. pp. 12.
6. P. Mazumdar, V. Borugadda, V. Goud, L. Sahoo. "Physico-chemical characteristics of *Jatropha curcas* L. of North East India for exploration of biodiesel". *Biomass & Bioenergy*. Vol. 46. 2012. pp. 546-554.
7. A. Tambunan, J. Situmorang, J. Silip, A. Joelianingsih, T. Araki. "Yield and physicochemical properties of mechanically extracted crude *Jatropha curcas* L. oil". *Biomass & Bioenergy*. Vol. 43. 2012. pp. 12-17.
8. J. Rathbauer, A. Sonnleitner, R. Pirot, R. Zeller, D. Bacovsky. "Characterisation of *Jatropha curcas* seeds and oil from Mali". *Biomass & Bioenergy*. Vol. 47. 2012. pp. 201-210.
9. S. Karaj, J. Müller. "Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of *Jatropha curcas* L". *Industrial Crops and Products*. Vol. 32. 2010. pp. 129-138.
10. P. Sirisomboon, P. Kitchaiyab, T. Pholpho, W. Mahuttanyavanitch. "Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels". *Biosystems Engineering*. Vol. 97. 2007. pp. 201-207.
11. P. Sirisomboon, P. Kitchaiya. "Physical properties of *Jatropha curcas* L. kernels after heat treatments". *Biosystems Engineering*. Vol. 102. 2009. pp. 244-250.
12. K. Prueksakorn, S. Gheewala. *Energy and greenhouse gas implications of biodiesel production from Jatropha curcas L*. Proceedings of the 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment. Bangkok, Thailand. 2006. pp. 21-23.
13. O. Mejia. *El recurso hídrico en la jurisdicción de Corantioquia: 1995-2007*. 1st ed. Ed. Corantioquia. Medellín, Colombia. 2008. pp. 181.
14. ICONTEC. *NTC 3484. Determinación de la humedad en la muestra de análisis de carbón y coque*. ICONTEC. Bogotá, Colombia. 2004. pp. 7.
15. Y. Cengel, M. Boles. *Thermodynamics. An engineering approach*. 7th ed. Ed. McGraw-Hill. New York, USA. 2010. pp. 999.
16. C. Ofori, L. Keat, L. JitKang. "Comparative exergy analyses of *Jatropha curcas* oil extraction methods: Solvent and mechanical extraction processes," *Energy Convers. Manag.* Vol. 55. 2012. pp. 164-171.

17. R. Strohshine. *Physical properties of agricultural materials and food products*. 1st ed. Ed. Purdue University. West Lafayette, USA. 1998. pp. 287.
18. E. Putten, Y. Franklen, F. Nielsen, J. Jongh, W. Rijssenbeek, P. Beerens, J. Ejick, et al. *The jatropha handbook. From cultivation to application*. 1st ed. Ed. FACT. Wageningen, Netherlands 2009. pp. 230.
19. S. Karaj, R. Huaitalla, J. Müller. *Physical, mechanical and chemical properties of Jatropha curcas L. seeds and kernels*. Proceedings of the Conference on International Agricultural Research for Development. Stuttgart, Germany. 2008. pp. 7-9.
20. R. Legaz. *Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible*. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España. 2010. pp. 93.