

Efecto del Contenido de Humedad sobre Algunas Propiedades Mecánicas de la Semilla de Vitabosa (*Mucuna deeringiana*)

Effect of Moisture Content on Some Mechanical Properties of Vitabosa (*Mucuna deeringiana*) Seeds

Ángel Francisco Rojas Barahona¹ e Iván Darío Aristizábal Torres²

Resumen. La semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*) es una alternativa de fuente proteica para la producción de alimento animal. Actualmente en Colombia se obtiene un bajo aprovechamiento de ésta por el desconocimiento de su alto potencial nutricional, de sus propiedades medicinales, fitosanitarias y su proceso agroindustrial. Las propiedades mecánicas, son importantes para el diseño eficiente de equipos y estructuras en los procesos de postcosecha. En la actualidad, las metodologías de medición para la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales vegetales difieren y en algunos casos no se conocen, lo cual no permite la adecuada comparación e interpretación de los resultados dificultando modelar algunos procesos tecnológicos. Las propiedades mecánicas fueron evaluadas en diferentes niveles de humedad y en diferentes planos de la semilla, con pruebas de compresión uniaxial y el consumo de energía de molienda se evaluó en un molino de martillos oscilatorio. El módulo proporcional de deformabilidad decreció cuando se incrementó la humedad y la deformación unitaria, siendo mayor en el plano horizontal y de menor valor en el plano longitudinal. La fuerza de ruptura varió en los tres planos de la semilla y decreció significativamente ($P<0,05$), cuando se incrementó la humedad en el plano longitudinal y trasversal, mientras que en el plano horizontal aumentó cuando se incrementó la humedad del 10 al 14% b.h. La deformación se incrementó significativamente ($P<0,05$), con la humedad entre los rangos de humedad del 10 al 14% b.h. La energía absorbida aumentó cuando el contenido de humedad varió de 10 al 14 % b.h. Por encima del 14% b.h. esta decreció en los tres planos evaluados. El consumo de energía específico en el proceso de molienda fue proporcional al contenido de humedad de la semilla.

Palabras clave: Reología, biodiversidad, alimento animal, biomaterial.

Abstract. Vitabosa seed (*Mucuna deeringiana*) is an alternative protein source for animal feed production. Currently in Colombia gets a poor use of this seed by not knowing of its nutritional potential, its medicinal properties, agroindustrial process. The mechanical properties are important for efficient design of equipment and structures in post-harvest processes. Presently, measurement methodologies for evaluating the mechanical properties of different vegetable materials and in some cases are not known, which does not allow suitable comparison and interpretation of results difficult to model some technological processes. The mechanical properties were assessed at different moisture levels and in different planes of the seed, with uniaxial compression tests and the grinding energy consumption was evaluated in an oscillating hammer mill. The proportional deformability modulus decreased when the moisture and the unitary deformation were increased, being higher in the horizontal side and the lowest value in the longitudinal side. The rupture force varied in the three sides of the seed and it decreased significantly ($P<0.05$) when increased moisture in the longitudinal and transverse side, while in the horizontal side increase when increased moisture of 10 to 14% w.b. The deformation increased significantly ($P<0.05$) with moisture from the moisture ranges from 10 to 14% w.b. The absorbed energy was increased when the moisture content varied from 10 to 14% w.b., for moisture content greater than 14% w.b., it decreased in all three planes tested. In the milling process, the specific energy consumption was proportional to the moisture content of the seed.

Key words: Rheology, biodiversity, animal feed, biomaterial,.

La vitabosa (*Mucuna deeringiana*) es una leguminosa importante para la conservación de suelos (Echeverry y Rodríguez, 1997); además, se utiliza con propósitos medicinales debido a que de la semilla se extrae la L-Dopa, compuesto empleado para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson (Sathiyarayanan y Arulmozhi, 2007). La semilla presenta alto contenido

de proteínas y puede ser una alternativa económica para alimentar animales (Matenga *et al.*, 2003). La semilla de vitabosa ha sido objeto de muchas investigaciones pero muy poco se intuye de su proceso de postcosecha y de sus propiedades mecánicas. Según Villamizar *et al.* (2004) es escaso el conocimiento de las propiedades mecánicas de muchos productos

¹ Ingeniero Agrónomo. Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - Facultad de Ciencias Agrarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia . <angelfrb@hotmail.com>

² Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - Facultad de Ciencias Agrarias - Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <idaristi@unal.edu.co>

Recibido: Abril 13 de 2011; Aceptado: Mayo 14 de 2012

de origen vegetal y las metodologías para evaluar difieren y en algunos casos no se saben. Es importante aprender sobre las propiedades mecánicas de las semillas con el fin de acometer el diseño racional de sistemas eficientes de molienda y para la optimización de los procesos y control de calidad del producto (Saiedirad *et al.*, 2008). Para el caso de las semillas del género *Mucuna* las propiedades mecánicas son escasamente mencionadas y en particular para la *M. deeringiana* no se halló información técnica en la literatura.

La principal característica de los materiales granulares de origen biológico, que los diferencia de los materiales minerales, es la fuerte influencia del contenido de humedad en el comportamiento mecánico y en la deformabilidad de los gránulos (Kibar y Ozturk, 2009). Muchos investigadores han evaluado el efecto de la humedad sobre el comportamiento mecánico de diferentes productos agrícolas: en soya (*Glycine max*), Paulsen (1978) y Henry *et al.* (2000); en comino (*Cuminum cyminum* Linn), Singh y Goswami (1996); y en girasol (*Helianthus annuus* L.), Gupta y Das (2000); en centeno (*Secale cereale*), Dziki y Laskowski (2005); en azafrán (*Carthamus tinctorius* L.), Baumler *et al.* (2006); en haba (*Vicia faba*), Altuntas y Yildiz (2007) y frijol (*Phaseolus vulgaris*), Correa *et al.* (2008), Saiedirad *et al.* (2008). Estos autores encontraron una reducción de la fuerza de ruptura y un incremento de la energía y de la deformación específica en el punto de ruptura, cuando se aumenta el contenido de humedad de las semillas.

Couto *et al.* (2002) y Correa *et al.* (2008) consideraron que el módulo de deformabilidad es el parámetro más adecuado para evaluar el comportamiento mecánico de un material biológico, donde la deformación total del material sometido a una fuerza de compresión tiene una mayor aplicación práctica. Laskowski y Skonecki (1997) determinaron el efecto de la humedad en las propiedades físicas y mecánicas de las semillas de lupino (*Lupinus luteus*), haba (*Vicia faba*), frijol var. Fidelia (*Phaseolus vulgaris* L.) y yero (*Vicia ervilia*), concluyendo que la humedad influye significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de la semilla y el efecto difiere de una especie a otra, debido a la diferente composición química y estructura física.

Correa *et al.* (2008) observaron una reducción de la fuerza de fractura y del módulo proporcional de deformabilidad, cuando se incrementaban los contenidos de humedad en semillas de frijol. A

niveles altos de humedad el grano es menos elástico y más flexible (dúctil). Por otra parte, Laskowski y Lysiak (1999) evaluaron las propiedades mecánicas de algunas semillas en diferentes niveles de humedad para predecir su comportamiento en el proceso de molienda. La deformación en el punto de ruptura fue significativamente correlacionada con el consumo de energía en el proceso de molienda, siendo directamente proporcional al contenido de humedad. De otro lado, Dziki (2008) en una investigación sobre los procesos de molienda de granos de trigo, deduce que el proceso de trituración antes de la molienda reduce considerablemente el consumo de energía, mientras que un incremento de la humedad lo aumenta. González *et al.* (2009) presentan algunas recomendaciones para aprovechar tecnológicamente la semilla de vitabosa y la pertinencia de determinar sus propiedades físicas (peso, densidad, tamaño medio, dureza) y mecánicas (módulo de elasticidad, máximo esfuerzo de compresión, fuerza de relajación) para relacionarlas con el desempeño de los equipos utilizados para la reducción de tamaño.

El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de la humedad en la semilla de vitabosa sobre algunas propiedades mecánicas como: fuerza de ruptura, deformación específica, energía en punto de ruptura y el consumo de energía en el proceso de molienda en el intervalo de humedad de 10 al 22% b.h. Los niveles de humedad se seleccionaron para tener una información amplia del comportamiento mecánico de la semilla, dado que la semilla según las condiciones ambientales o en un determinado proceso, pueden ganar o perder humedad y en consideración a que la semilla en algunos procesos específicos para eliminar compuestos anti nutricionales o extracción de L-Dopa, requieren de hidratación y deshidratación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las semillas de vitabosa fueron obtenidas de un cultivo establecido en el Centro Agropecuario Cotové de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, localizado en Santa Fe de Antioquia, Colombia. Las vainas secas se recolectaron manualmente y luego las semillas fueron retiradas eliminando las dañadas y las impurezas presentes. Se llevó una muestra de 50 kg al laboratorio de Procesos Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, donde se realizaron los diferentes ensayos. De acuerdo con la metodología desarrollada por Gupta y Das (1997) y Saiedirad *et al.* (2008), las semillas fueron clasificadas

en tres tamaños (pequeña, mediana y grande), utilizando tamices de 30/64" (11,7 mm), 28/64" (11,0 mm), 22/64" (8,5 mm) y 20/64" (7,6 mm). Las semillas de tamaño mediano que pasaron por la malla No. 28 y quedaron retenidas en la malla No. 22, representaron la mayor población de semillas en la muestra y fueron las utilizadas para todas las pruebas y evaluaciones que se explican a continuación.

Acondicionamiento de humedad. El contenido de humedad, se determinó en una muestra aleatoria de 150 g distribuida en 10 bandejas de 15 g, empleando el método de secado al horno a 103 °C durante 72 h, norma ASABE 352.2 (ASABE, 2006). Las propiedades mecánicas se evaluaron en cuatro diferentes niveles de humedad: 10, 14, 18, 22% b.h.

Para obtener semillas con el 10% humedad b.h., éstas fueron deshidratadas en horno de convección forzada, a una temperatura de 45 °C por 48 h y una humedad relativa de 65%. La humedad final requerida se determinó por medio del método gravimétrico, utilizando la ecuación (1).

$$H_f = \frac{(P_i - P_f) * 100}{P_i} \quad (1)$$

Donde;

H_f: humedad final, % b.h.

P_i: peso inicial, g

P_f: peso final, g

Para acondicionar las semillas a los niveles de humedad del 14, 18 y 22%, se implementó un procedimiento propio, Rojas (2010), basado en la metodología de absorción de agua en cámara húmeda. Para esto se utilizó un recipiente plástico de 25 cm de diámetro y altura de 40 cm y un porta muestra, elaborado con una malla con abertura de 1 mm, ubicado 10 cm de la base del recipiente, en el que se depositaron 1.000 g de semilla. Antes de colocar las semillas, se llenó el recipiente con agua destilada hasta una altura de 8 cm de tal manera que las semillas permanecieran a una distancia de 2 cm por encima del nivel del agua.

La prueba de absorción en la cámara húmeda se realizó por triplicado a temperatura ambiente, correlacionando el peso del agua absorbida por las semillas con el tiempo de permanencia en la cámara. El análisis de varianza indicó que el efecto del tiempo que permanecen las semillas dentro de la cámara

húmeda es significativo, con un r² de 0,98, y se representa con la siguiente ecuación:

$$Y = 0,22t + 0,48 \quad (2)$$

Donde;

Y: g agua adsorbida/1000 g semilla

t: tiempo, horas

El tiempo necesario para mantener las muestras en la cámara húmeda y alcanzar la humedad deseada fue directamente proporcional a su contenido de humedad final, así; para 14% b.h. fueron 45 h, para 18% b.h. fueron 235 h y para 22% b.h. fueron 444 h. Al cabo de este tiempo no se observó presencia de hongos en las semillas hidratadas.

Con la ecuación (2) se calcularon los gramos de agua absorbida por hora y a partir de la humedad inicial y del peso de la muestra, se acondicionó la humedad final de la semilla. Con este procedimiento se obtuvo una homogeneidad de absorción sin daños mecánicos en la testa de la semilla, metodología de hidratación de semillas que hasta el momento no ha sido mencionada en investigaciones sobre cambios físico-mecánicos por efecto de la humedad.

Las muestras acondicionadas con los niveles de humedad: 10, 14, 18 y 22% fueron almacenadas en recipientes de vidrio herméticamente sellados para evitar pérdida o ganancia de humedad y los contenidos de humedad de las semillas, fueron verificados empleando la norma S352.2 ASABE (2006). No hubo cambios de la humedad de las semillas almacenadas en el recipiente hermético.

Medición de las propiedades mecánicas. En cada uno de los cuatro contenidos de humedad se evaluaron las propiedades mecánicas: módulo proporcional de deformabilidad, deformación en el punto de ruptura, fuerza de ruptura, energía absorbida, y consumo específico de energía durante la molienda. La evaluación de las propiedades mecánicas de las semillas, excepto el consumo específico de energía, fue realizada mediante pruebas de compresión uniaxial con placas paralelas en tres planos diferentes (longitudinal, horizontal y transversal) a granos individuales tomados al azar por cada contenido de humedad con 20 repeticiones. Las pruebas se realizaron con una máquina de ensayos universal (Instron® modelo 5569) equipada con una celda de carga de 50 kN, localizada en CENICAFE, Chinchiná-Caldas. La velocidad de compresión fue

de 6 mm/min. A partir de la información registrada en cada ensayo se determinó el módulo proporcional de deformabilidad, la fuerza de ruptura, la energía absorbida y la deformación en el punto de ruptura (Figura 1).

Medición del módulo proporcional de deformabilidad. El módulo de deformabilidad es el parámetro mejor utilizado para determinar el comportamiento mecánico de un material biológico.

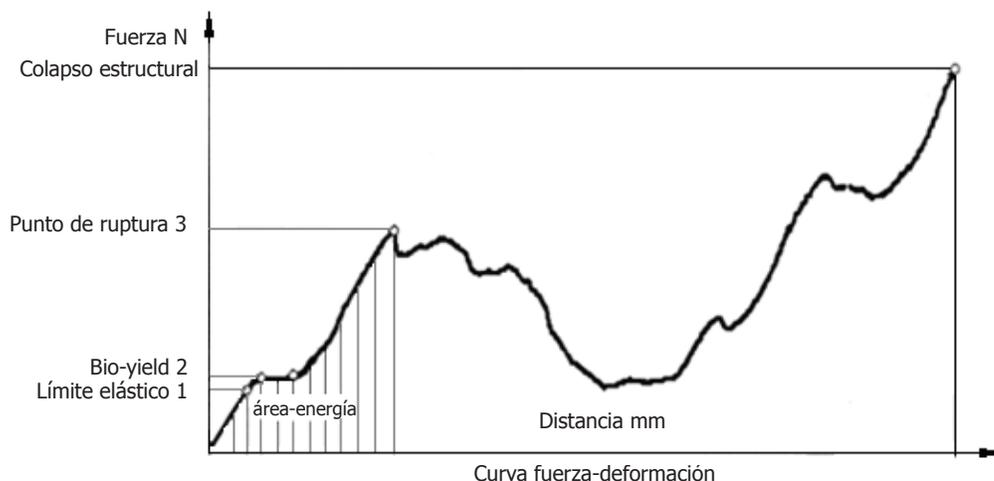


Figura 1. Gráfico de Fuerza–deformación de un ensayo de compresión uniaxial de una semilla. (Fuente: Laskowski y Lysiak, 1999).

En la práctica es mejor determinar la rigidez de un material teniendo en cuenta la deformación elástica (deformación recuperable) y la deformación plástica (deformación no recuperable) (Couto *et al.*, 2002). Se utilizó el método de compresión de materiales biológicos de forma convexa propuesto por Mohsenin (1986), para calcular el módulo de deformabilidad, denominado también módulo de elasticidad aparente (ASABE, 2006), basado en la teoría de esfuerzos de contacto de Hertz aplicada en mecánica de sólidos. Este método se utiliza en pruebas de compresión de materiales enteros como semillas, frutas, hortalizas, huevos, etc., donde los platos planos de compresión de la máquina de ensayos hacen contacto con un cuerpo de forma convexa. Aplicando la ecuación (3) se determina el módulo de elasticidad aparente.

$$E = \frac{0,338K^{\frac{3}{2}}F(1-\mu^2)}{D^{\frac{3}{2}}} \left[\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Donde:

E : Módulo de deformabilidad o elasticidad aparente (MPa)

0,338: Constante

D : Deformación de la semilla (m)

F : Fuerza de compresión (N)

μ : Relación de Poisson's (adimensional)

r_1, R_1 : Radios de curvatura de la semilla convexa en contacto con el plato superior (m)

r_2, R_2 : Radios de curvatura de la semilla convexa en contacto con el plato inferior (m)

K : constante, se determina a partir del Cos β con la ecuación (4)

Los radios de curvatura R y r se calcularon utilizando la circunscripción de los dos ejes de la semilla que se encuentran en contacto con los platos del equipo, como se muestra la Figura 2.

Para efectuar la circunscripción se utilizaron imágenes en los tres planos de la semilla adquiridas en la prueba de compresión uniaxial. Las imágenes fueron procesadas en los programas JascPaint Shop® Pro v.8 y Matrox Inspector® v.2.2 con el fin de determinar el radio de la circunferencia formada en los dos ejes de la superficie de contacto de la semilla. Las dimensiones (en pixeles) de las imágenes fueron transformadas a unidades de longitud (mm) mediante factores de calibración (pixel/mm). La Figura 3, muestra el procedimiento para obtener los radios de curvatura R y r .

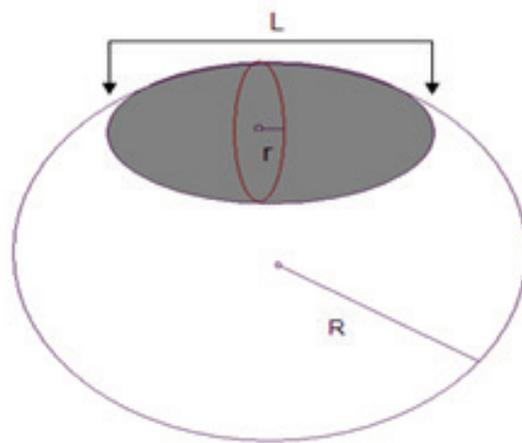


Figura 2. Esquema para calcular los radios de curvatura de la semilla en plano horizontal.

r : Radio de curvatura en el eje X del cuerpo convexo o radio menor (m)
 R: Radio de curvatura eje Y del cuerpo convexo o radio mayor (m)

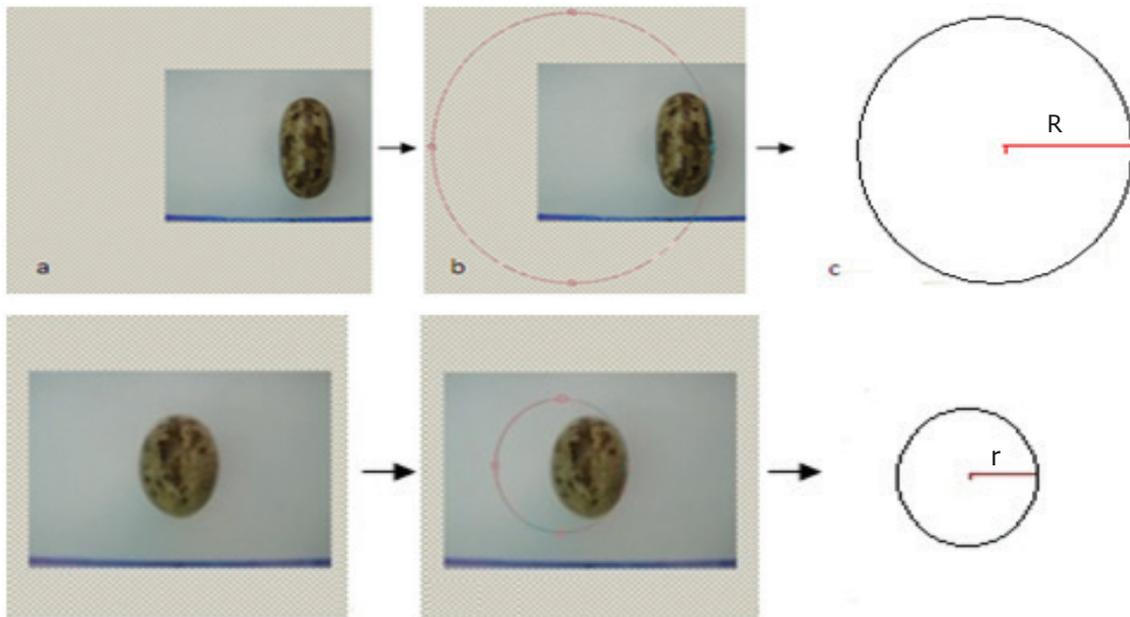


Figura 3. Radios de curvatura mayor (R) y menor (r). a) Imagen original en el Paint Shop. b) Imagen con la circunscripción. c) Imagen importada a Matrox Inspector para calcular el radio.

Para determinar el valor de la constante K, se calculó inicialmente el ángulo formado entre el plano normal del plato de compresión y la curvatura del cuerpo con la ecuación (4).

$$\cos \beta = \frac{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{R_1} \right)}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)} \quad (4)$$

Donde:

β = Ángulo de curvatura de las superficies de contacto.

A partir del ángulo β de curvatura se halló el valor de la constante K de la Tabla 1, la cual es una forma simplificada de una extensa tabla dada por Kosman y Cunningham (1962), citados por Moshenin (1986)

para resolver las ecuaciones cuando los planos de curvatura de dos cuerpos en contacto no coinciden.

El módulo de deformabilidad también es función de la relación de Poisson (μ) que se asume como valor constante para cada material, pero al ser su valor desconocido para la semilla de vitabosa, se determinó en su lugar otra variable proporcional al módulo de deformabilidad, llamada módulo proporcional de deformabilidad (E_p), para las pruebas en el plano

longitudinal y horizontal, considerando simetría entre los extremos longitudinales y horizontales de la semilla ($r_1 = r_2$ y $R_1 = R_2$), utilizando la ecuación simplificada (5) empleada por Couto *et al.* (2002).

$$E_p = \frac{E}{(1-\mu^2)} = \frac{0.338K^{\frac{3}{2}}F}{D^{\frac{3}{2}}} \cdot \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

Donde:

E_p = módulo proporcional de deformabilidad (MPa).

Tabla 1. Valores de la constante K en función del ángulo β .

β	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Cos β	0,6428	0,5736	0,500	0,4226	0,3420	0,2588	0,1736	0,0872	0,0
K	1,198	1,235	1,267	1,293	1,314	1,331	1,342	1,349	1,35

Fuente: Mohsenin, 1986.

Para el caso del plano transversal, dado que los dos extremos de la semilla no son simétricos, se utilizó la ecuación (6) empleada por Couto *et al.* (2002).

$$E_p = \frac{E}{(1-\mu^2)} = \frac{0.338K^{\frac{3}{2}}F}{D^{\frac{3}{2}}} \cdot \left[\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

Todos los ensayos de compresión para determinar E_p en cada contenido de humedad fueron realizados para dos valores de deformación unitaria (2% y 4%) respecto a la dimensión de la semilla, según el plano o posición de la misma entre los platos paralelos de la máquina de ensayos. Estas deformaciones unitarias se eligieron para evaluar el efecto de la deformación D sobre E_p , considerando que cuando se utiliza ésta técnica es aconsejable realizar los ensayos con deformaciones por debajo del 5% de deformación unitaria (ASABE, 2006).

Medición de la fuerza de ruptura. En los productos biológicos, como los vegetales, la ruptura o fuerza de fractura puede ser de penetración de la epidermis, agrietamiento y ruptura exterior. Es la falla de la macro estructura (Mohsenin, 1986). La fuerza máxima (N) requerida para fracturar la semilla se determinó durante las pruebas de compresión anteriormente mencionadas, utilizando los datos registrados automáticamente por el equipo en cada ensayo para la curva Fuerza-Deformación.

Medición de la deformación en el punto de ruptura. Es el desplazamiento relativo que sufren los

puntos de un cuerpo sometido a una carga. Es una magnitud vectorial y va acompañada, en general, por una variación de volumen o de forma (Sharma, 2003). A partir de los datos registrados automáticamente en las pruebas de compresión, también se determinó la deformación (mm) alcanzada en el instante en que la semilla se fractura.

Medición de la energía absorbida. La energía absorbida es la resistencia a la compresión hasta la ruptura del material. También se utiliza el término de tenacidad (MJ m^{-3}). El área bajo la curva de fuerza-deformación en el punto de ruptura equivale a la energía que absorbe el cuerpo para llegar al daño macro estructural (Ruíz, 2000). La energía adsorbida por la semilla se calculó en cada ensayo como el área bajo la curva fuerza-deformación hasta el punto de ruptura, registrada por el equipo durante el ensayo de compresión (Figura 1). Esta variable se cálculo en unidades de Julios (J).

Medición del consumo de energía de molienda. Las pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Mecanización Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín con un molino de martillos oscilatorios sin placa dentada de una capacidad de 400 kg/h. El molino tiene las siguientes especificaciones técnicas: martillos con dimensiones de 100 mm, 20 mm y 0,3 mm (longitud ancho y espesor, respectivamente) separados a 5 mm, tamiz con abertura de 4 mm y separación entre los martillos y el tamiz de 20 mm. El molino fue accionado por un motor eléctrico trifásico de 2300 W. Para evaluar

el consumo de energía, el molino fue alimentado manualmente con seis baches de 100 g de semilla por cada contenido de humedad y con intervalos de 10 s realizando 18 repeticiones. Según la Ley de Watt la energía consumida por un motor eléctrico es directamente proporcional al voltaje y a la corriente eléctrica en la unidad de tiempo, ecuación (7) citada por Melguizo (1977):

$$E = P \cdot t \quad (7)$$

Donde:

E : energía (W·s)

P : potencia (W)

t : tiempo (s)

$$P = V \cdot I \cdot \text{Cos}\phi \quad (8)$$

V : voltaje (V)

I : corriente eléctrica (A)

$\text{Cos}\phi$: Factor de potencia del motor eléctrico (adimensional)

Las lecturas de la corriente eléctrica (A) y el voltaje (V) durante la molienda fueron registradas directamente en el motor eléctrico cada dos segundos con un amperímetro de pinza Fluker®.

El consumo específico de energía durante la molienda se calculó con la ecuación (9) (Laskowski y Lysiak, 1999).

$$CEE = \frac{E}{M} \quad (9)$$

Donde:

CEE : consumo específico de energía (kJ/kg).

E : energía consumida durante la molienda (W·s), ecuación (7).

M : cantidad de semilla molida (kg).

Los valores de energía consumida durante la molienda fueron calculados por un tiempo de 10 s que fue el intervalo de cada bache.

Análisis estadístico. Las propiedades mecánicas fueron analizadas con un diseño completamente aleatorizado. La fuerza de ruptura, deformación en la ruptura, la energía absorbida y el consumo específico de energía, se realizó bajo un arreglo factorial 4x3 (factor 1: humedad, con cuatro niveles de humedad y factor 2: orientación, con tres planos de orientación de la semilla) mientras que el módulo proporcional de deformabilidad se realizó bajo un arreglo factorial

4x3x2 (factor: humedad, con cuatro niveles de humedad, factor 2: orientación, con tres planos de orientación de la semilla y factor 3: deformación con dos niveles de deformación. Los resultados fueron analizados a partir del análisis de varianza. La prueba F fue utilizada para determinar el efecto significativo de cada tratamiento (contenido de humedad), para identificar diferencias significativas entre las medias, se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$). El análisis estadístico fue realizado con el paquete SAS® versión 8.0. Para determinar la relación entre la humedad y las propiedades mecánicas se hicieron análisis de regresión no lineal de los valores promedios de cada variable evaluada.

RESULTADOS

Módulo proporcional de deformabilidad (E_p). En la Tabla 2 se presentan los valores promedios con las desviaciones estándar de E_p para los cuatro contenidos de humedad evaluados según la orientación y la deformación unitaria de la semilla.

Los resultados muestran que E_p disminuyó cuando se incrementó el contenido de humedad y la deformación unitaria de la semilla en los tres planos de compresión. La semilla presentó mayor resistencia mecánica en el plano horizontal para los contenidos de humedad del 10 y 14% b.h. y para las deformaciones unitarias evaluadas. La mayor resistencia (3733,64 MPa) se presentó en las semillas con 10% b.h. cuando se deforman un 2% en el plano horizontal, y la menor resistencia mecánica (21,11 MPa) se obtuvo en semillas con el 22% b.h. deformadas un 4% en el mismo plano. Laskowski y Skonecki (1997), determinaron el efecto de la humedad en las propiedades físicas y mecánicas de la semilla de diferentes leguminosas, encontraron que la humedad influye significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de la semilla y el efecto difiere de una especie a otra, debido a la diferente composición química y estructura física de las semillas.

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas en la interacción de los factores: contenido de humedad, orientación y deformación unitaria. Dentro de cada contenido de humedad se presentaron diferencias significativas de E_p entre los planos de orientación de la semilla y entre las deformaciones unitarias. Según Gupta y Das (2000) la dureza de una semilla depende de la dirección de la fuerza aplicada, debido a los arreglos de los tejidos del cotiledón los

cuales tienen una configuración celular definida. Esto y la estructura física de la semilla de vitabosa podrían explicar las diferencias obtenidas entre los tres planos.

E_p para los planos horizontal y transversal no presentó diferencias entre los contenidos de humedad de 18% y 22%. En las deformaciones unitarias de 2 y 4% los resultados obtenidos E_p mostraron diferencias.

Tabla 2. Módulo proporcional de deformabilidad, E_p , (MPa) de la semilla vitabosa (*Mucuna deeringiana*), según el contenido de humedad, plano y deformación unitaria.

CH (% b.h)	Deformación: 2 %			Deformación: 4 %		
	Planos de la semilla					
	Longitudinal	Horizontal	Transversal	Longitudinal	Horizontal	Transversal
10	992,75 ± 203,30 a	3733,64 ± 981,22 e	1733,32 ± 507,25 h	351,45 ± 71,69 k	1320,23 ± 346,05 ñ	611,06 ± 179,73 q
14	306,51 ± 54,087 b	778,37 ± 138,06 f	633,94 ± 109,27 i	108,25 ± 18,84 l	274,77 ± 48,94 o	220,61 ± 37,38 r
18	151,19 ± 11,59 c	240,77 ± 58,97 g	271,10 ± 36,61 j	53,45 ± 4,10 m	85,10 ± 20,84 p	95,87 ± 12,94 s
22	59,66 ± 8,88 d	117,32 ± 17,98 g	198,12 ± 32,56 j	21,11 ± 3,00 n	41,69 ± 6,42 p	70,38 ± 10,48 s

Valores en la misma fila o en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($P < 0,05$). Los valores son expresados como la media ± desviación estándar ($n = 20$).

Al incrementar la deformación de la semilla probablemente esta pierde resistencia mecánica por cambios microestructurales de los tejidos. El módulo proporcional de deformabilidad de la semilla depende del contenido de humedad, del plano de orientación y del grado de deformación unitaria, comportamiento observado de manera similar en semillas de frijol por Correa *et al.* (2008) y por Couto *et al.* (2002) en frutos de café.

La Tabla 3 presenta las ecuaciones de regresión de E_p de la semilla, para cada plano de compresión y deformación unitaria, ajustadas al contenido de humedad en el rango de 10 a 22% b.h. Las ecuaciones no lineales obtenidas y los respectivos coeficientes de determinación, que fueron iguales o superiores al 94%, permiten predecir con alta probabilidad la propiedad mecánica E_p a partir del contenido de humedad de la semilla.

Tabla 3. Ecuaciones para expresar el comportamiento del módulo proporcional de deformabilidad, E_p (MPa), en función del contenido de humedad de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*).

Plano	Deformación (%)	$E_p = aM^3 + bM^2 + cM + d$				
		a	b	c	d	R ²
L	2	–	9,29	-371,20	3752	0,98
	4	–	3,29	-131,50	1329	0,98
H	2	-5,22	294,6	-5536	34847	0,99
	4	-1,85	104,3	-1960	12334	0,99
T	2	–	16,03	-63,40	10635	0,99
	4	–	5,70	-226,10	2294	0,94

M : contenido de humedad% (b.h.), L: Longitudinal, H: Horizontal, T: Transversal.

Deformación en el punto de ruptura. La Tabla 4 muestra los promedios de deformación de las semillas con respecto a los factores humedad y orientación. El análisis de varianza indicó que el contenido de humedad y la orientación influyen significativamente sobre la deformación de la semilla en el punto de ruptura cuando es sometida a carga de compresión. La deformación en el punto de ruptura se incrementó

cuando aumentó el contenido de humedad en cada plano de la semilla, presentando la menor deformación la semilla con 10% b.h. en el plano horizontal. La mayor deformación se presentó en el plano longitudinal en las semillas con 18 y 22% b.h.

En cada contenido de humedad hubo efecto significativo del plano de la semilla sobre la deformación alcanzada

en el punto de ruptura. La mayor deformación se obtiene cuando la semilla es cargada en su plano longitudinal, mientras la menor deformación se da cuando la semilla se ubica en el plano horizontal. La

deformación no presentó cambios significativos cuando las semillas presentaron los mayores contenidos de humedad (18 y 22%), la fractura en éstas, se presentó como un rompimiento poco perceptible de la testa.

Tabla 4. Deformación (mm) de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*), en el punto de ruptura para diferentes contenidos de humedad y planos de orientación.

Humedad (% b.h)	Plano de la semilla		
	Horizontal	Longitudinal	Transversal
10	1,00 ± 0,26 a	1,65 ± 0,24 c	1,38 ± 0,12 f
14	3,05 ± 0,07 b	6,64 ± 0,72 d	3,80 ± 0,59 g
18	3,01 ± 0,05 b	7,14 ± 0,46 e	4,44 ± 0,25 h
22	3,02 ± 0,02 b	7,20 ± 0,36 e	4,71 ± 0,43 h

Valores en la misma fila o en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($P < 0,05$). Los valores son expresados como la media ± desviación estándar ($n = 20$).

Las semillas por encima del 14% b.h. presentaron un comportamiento viscoelástico (pierden sus características de fragilidad, son más flexibles y esto hace que disminuya su fracturabilidad). Similares resultados fueron encontrados por Laskowski y Lysiak (1999) en diferentes semillas de leguminosas donde la deformación se incrementó con la humedad, siendo la deformación directamente proporcional al consumo de energía en el proceso de molienda. Esta característica

podría indicar una menor eficiencia en los procesos de molienda o reducción de tamaño de los granos de vitabosa de mayor humedad.

Fuerza de ruptura. El análisis de varianza presentó diferencias estadísticas significativas en la propiedad mecánica fuerza de ruptura. En la Tabla 5 se muestra el efecto del contenido de humedad y el plano de la semilla sobre la fuerza requerida para alcanzar su ruptura.

Tabla 5. Fuerza de ruptura (N) de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*), según contenido de humedad y plano de orientación.

CH (% b.h.)	Plano de la semilla		
	Longitudinal	Horizontal	Transversal
10	592,64 ± 68,18 a	1328,51 ± 183,63 d	824,33 ± 78,17 h
14	567,37 ± 52,66 a	1960,46 ± 228,75 e	645,76 ± 66,57 i
18	363,82 ± 49,57 b	732,41 ± 129,22 f	384,23 ± 34,88 j
22	214,13 ± 32,92 c	525,45 ± 89,27 g	319,14 ± 33,83 k

Valores en la misma fila o en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($P < 0,05$). Los valores son expresados como la media ± desviación estándar ($n = 20$).

En general la fuerza de ruptura disminuyó cuando se incrementó la humedad, siendo mayor en las semillas con un contenido de humedad del 10% y menor en las semillas con el 22% de humedad. Similar tendencia fue informada por Paulsen (1978) en semillas de soya, Gupta y Das (2000) en girasol, Baumler *et al.*, (2006) en azafrán, y Altuntas y Yildiz (2007) en haba.

Se observó que el plano de aplicación de la fuerza influye significativamente para cada contenido de humedad, presentando la fuerza de ruptura un mayor valor (1960,46 N) en el plano horizontal y un menor valor (214,13 N) en el plano longitudinal para los contenidos de humedad de 14% y 22%, respectivamente. Para los tres planos de orientación de la semilla, el contenido de humedad afectó

significativamente la fuerza de ruptura, excepto en el plano longitudinal donde no se presentaron diferencias estadísticas entre los contenidos de humedad del 10 y 14%. Gupta y Das (2000), plantean que cuando se aplica externamente una fuerza a la semilla se crea un esfuerzo en los tejidos internos del cotiledón causando su ruptura. Esta fuerza depende de la dirección de la fuerza aplicada, porque los tejidos del cotiledón tienen un arreglo celular definido. Según Saiedirad *et al.*, (2008), la fuerza necesaria para fracturar la semilla depende del área donde ésta se aplica, a menor área menor fuerza requerida. Precisamente la menor fuerza de ruptura se presentó para todas las humedades en el plano longitudinal donde menor área de contacto tiene la semilla de vitabosa (Rojas, 2010).

Según los resultados anteriores, las semillas de vitabosa con una humedad de 10% se fracturan con grandes fuerzas de compresión y reducida deformación. Las semillas con humedad por encima de 14% experimentan un comportamiento plástico, es decir se fractura con menor fuerza pero con una mayor deformación. Con contenidos de humedad 18 y 22%, la semilla se vuelve viscoelástica, es decir la semilla no se fractura y experimenta una gran deformación con pequeñas fuerzas de compresión. Este fenómeno se debe según Bargale *et al.* (1995), a que las semillas con altos contenidos de humedad se plastifican lo cual causa una transición de frágil a elástico, en contenidos de humedad menores al 12%, a elástico- plástico, entre 12-15%, y finalmente experimentan un comportamiento plástico-viscoso cuando el contenido de humedad superan el 15%.

En la semilla de vitabosa se evidenció un cambio brusco en las propiedades mecánicas, así: cuando los

contenidos de humedad superan el 14%, la semilla se vuelve "flexible" y difícil de fracturar. Con contenidos de humedad del 18 y 22% la fractura fue levemente perceptible, y es precedida por una deformación plástica similar resultado encontrado por Lysiak y Laskowski (2004) en semillas de haba, donde las grietas o fallas formadas por efecto de una fuerza externa, en semillas con bajos contenidos de humedad, pueden propagarse dentro de los cotiledones, en cambio la fractura de semillas con humedades altas fue relacionada principalmente a un rompimiento de la testa.

Comparando la fuerza de ruptura de la semilla de vitabosa con la de las semillas de haba, documentada por Altunta y Yildiz (2007), se puede decir que la semilla de vitabosa es 2,3 veces más resistente, lo anterior debido probablemente a su composición química y estructural. Según Stenvert y Kingswood, citados por Glenn y Sauders (1989), la dureza de un grano está relacionada con un alto contenido de proteína (29% en el caso de la vitabosa) y con el grado de adhesión de la matriz de la proteína con el almidón.

Energía absorbida. El análisis de varianza presentó diferencias estadísticas significativas en la propiedad mecánica energía absorbida por la semilla hasta alcanzar la fractura. En la Tabla 6 se señala el efecto del contenido de humedad y el plano de la semilla de vitabosa sobre esta propiedad. La energía absorbida se incrementó entre las humedades del 10 y 14% y decreció cuando el contenido humedad se aumentó al 18 y 22% en los tres planos de la semilla. Igual tendencia encontraron Paulsen (1978) y Lysiak y Laskowski (2004), en semillas de soya y haba, respectivamente.

El mayor valor de energía absorbida 2,76 J, fue obtenido para las semillas en el plano horizontal con un contenido

Tabla 6. Energía absorbida (J) por la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*), según contenido de humedad y plano de orientación.

CH(% b.h.)	Plano de la semilla		
	Longitudinal	Horizontal	Transversal
10	0,41 ± 0,09 a	0,69 ± 0,29 d	0,34 ± 0,03 f
14	2,14 ± 0,42 b	2,76 ± 0,77 e	1,23 ± 0,39 g
18	1,25 ± 0,24 c	0,87 ± 0,15 d	0,76 ± 0,10 h
22	0,60 ± 0,17 a	0,58 ± 0,11 d	0,65 ± 0,11 h

Valores en la misma fila o en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($P < 0,05$). Los valores son expresados como la media ± desviación estándar ($n = 20$).

de humedad del 14%, y los valores más bajos fueron para las semillas en los planos transversal y longitudinal 0,34 y 0,41 J, respectivamente; con un contenido de humedad del 10%. La semilla de vitabosa con bajos contenidos de humedad requiere menor energía para fracturarse dado que la fractura se alcanza con muy poca deformación.

El efecto del plano de orientación de la semilla energía absorbida también es explicado por Saiedirad *et al.* (2008), quienes plantean que la energía en el punto de ruptura depende del área de contacto donde se aplica la fuerza, es así que en el plano longitudinal la fuerza de ruptura y la energía es menor, dado que la fuerza se concentra en una pequeña área; mientras que en el plano horizontal, el área de contacto es mayor, originando mayor fuerza y energía de ruptura. En el caso de la semilla de vitabosa esto se cumplió principalmente para los bajos contenidos de humedad (10 y 14%).

Según Mohsenin (1986) un incremento de la energía absorbida es un indicador de resistencia a la ruptura de la semilla, pero no a la deformación de la misma, de hecho Lysiak y Laskowski (2004), afirman que las semillas con altos contenidos de humedad necesitan una mayor deformación, permaneciendo mayor tiempo dentro del molino lo cual genera un mayor consumo de energía.

En la Tabla 7 se presentan las ecuaciones de regresión las propiedades mecánicas fuerza de ruptura, deformación y energía absorbida de la semilla de vitabosa para cada plano de compresión, ajustadas al contenido de humedad en el rango de 10 a 22% b.h. Las ecuaciones obtenidas y los respectivos coeficientes de determinación, que fueron iguales o superiores al 93%, permiten predecir con alta probabilidad estas propiedades a partir del contenido de humedad de la semilla de vitabosa.

Tabla 7. Ecuaciones para expresar el comportamiento de la fuerza de ruptura, deformación en el punto de ruptura y energía absorbida en función del contenido de humedad de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*).

Variable	Plano	Variable = aM ³ + bM ² + cM + d				R ²
		a	b	c	d	
Fuerza ruptura (N)	L	-	-	-33,47	970,10	0,93
	H	7,5	-373,20	5844	-27296	0,97
	T	-	-	-44,42	1254	0,96
Deformación (mm)	L	-	-0,08	2,90	-18,38	0,96
	H	-	-0,03	1,17	-7,41	0,93
	T	-	-0,03	1,26	-8,05	0,98
Energía absorbida (J)	L	0,01	-0,39	6,66	-34,14	0,99
	H	0,001	-0,73	11,77	-58,29	0,99
	T	0,004	-0,23	3,80	-19,12	0,99

M : contenido de humedad% (b.h.), L: Longitudinal, H: Horizontal, T: Transversal.

Consumo de energía de molienda. En la Tabla 8 se presentan los valores medios de consumo de energía específica, CEE (kJ/kg), en los diferentes niveles de humedad de la semilla de vitabosa. El análisis de varianza reportó que la humedad influye significativamente en esta variable. En el proceso de molienda el CEE es directamente proporcional a la humedad de las semillas. Similares resultados fueron encontrados por varios autores (Laskowski y Lysiak, 1999; Laskowski y Lysiak, 2004; Diziki y Laskowski, 2005; Molenda *et al.*, 2005; y Diziki, 2007) en

diferentes tipos de semillas. Según los anteriores autores las semillas con mayor contenido de humedad se vuelven menos elásticas y más plásticas, generando adhesión de las partículas a la superficie interna y agujeros de la cámara del molino, como resultado se obtiene un producto con un tamaño de partícula muy fino que no ofrece beneficios económicos por mayor consumo de energía, además puede originar problemas respiratorios a los operarios y en el caso de semillas de cereales puede causar problemas explosivos en la planta de transformación.

Tabla 8. Energía específica consumida CEE en molienda de semillas de vitabosa (*Mucuna deeringiana*), para diferentes niveles de humedad durante 10 segundos.

Humedad	CEE (kJ/kg)	Rango
10	99,46 ± 1,17 a	97,06 – 100,74
14	110,50 ± 9,4 b	100,28 – 131,1
18	137,51 ± 14,14 c	113,16 – 158,24
22	140,56 ± 13,03 c	117,3 – 163,76

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($P < 0,05$). Los valores son expresados como la media ± desviación estándar (n= 18).

Para los contenidos de humedad del 10 y 14%, el CEE presentó diferencias estadísticas significativas. Similares resultados fueron encontrados por Lysiak y Laskowski (2004), en semillas de haba (*Vicia faba*), con bajos contenidos de humedad; sin embargo, con humedades por encima del 12% los valores registrados de CEE fueron más altos que los alcanzados con vitabosa. También los anteriores dicen la elasticidad de un material es inversamente proporcional al consumo de energía.

Según los resultados obtenidos las semillas con humedades entre el 10 y 14%, al presentar un menor consumo de energía, se esperaría con estos niveles de humedad un mejor desempeño del molino. Al respecto Dziki y Laskowski (2005) mencionan que un aumento del contenido de humedad del grano causa un incremento de la plasticidad y por lo tanto dificulta el proceso de molienda.

Como los resultados demuestran que la humedad influye en las características físico-mecánicas de la semilla y a su vez esto se relaciona con la eficiencia en el proceso de molienda, las semillas de vitabosa con contenidos de humedad por encima del 14% b.h. representan un mayor consumo de energía que incrementaría el costo económico del proceso.

Finalmente, la relación entre el consumo de energía específica CEE (kJ/kg) y el contenido de humedad, M (% b.h.), de la semilla de vitabosa se ajustó a la siguiente ecuación obtenida por regresión lineal:

$$CEE = 3,76M + 61,88 \quad (8)$$

Este modelo permite estimar con una probabilidad del 92% el consumo de energía necesario en un molino de martillos para procesar semilla de vitabosa en el rango de humedad del 10 al 22 % b.h.

CONCLUSIONES

El comportamiento mecánico de la semilla de vitabosa está estrechamente relacionado con el contenido de humedad, el plano de la semilla donde se aplica la fuerza de fractura y el porcentaje de deformación de la semilla.

El módulo proporcional de deformabilidad es un parámetro importante para determinar la resistencia mecánica de la semilla de vitabosa.

Las semillas de vitabosa cuando pierden humedad requieren menor energía para el proceso de molienda dado que el material mejora estructuralmente su fracturabilidad. La humedad óptima para el proceso de molienda de la semilla está entre 10-14 % b.h.

Los resultados obtenidos permiten predecir algunos cambios mecánicos de la semilla de vitabosa por efecto de los diferentes niveles de humedad que puede experimentar la semilla en las diferentes etapas de manejo y procesamiento, los cuales son parámetros importantes en el diseño y construcción de equipos, en los procesos de recolección mecánica, transporte, limpieza, clasificación, y condiciones de procesamiento agroindustrial de la vitabosa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la DIME (Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín) el apoyo financiero para la realización de este trabajo y a CENICAFE por su colaboración para la realización de los ensayos mecánicos.

BIBLIOGRAFÍA

Altuntas, E. and M. Yildiz. 2007. Effect of moisture content on some physical and mechanical properties

- of faba bean (*Vicia faba* L.) grains. Journal of Food Engineering 78(1): 174–183.
- American Society of Agricultural and Biological Engineering (ASABE). 2006. Standards engineering practices data. 53rd edition. USA. 950 p.
- Bargale, P., J. Irudayaraj and B. Marquis. 1995. Studies on rheological behaviour of canola and wheat. Journal of Agricultural Engineering Research 61(4): 267-274.
- Bäumler, E., A. Cuniberti, S. Nolasco and I. Riccobene. 2006. Moisture dependent physical and compression properties of safflower seed. Journal of Food Engineering 72(2): 134-140.
- Correa, P.C., O. Resende, D.R. Menezes, C. Jarén and S. Arazuri. 2008. Resistance of edible beans to compression. Journal of Food Engineering 86(2): 172-177.
- Couto, S.A., C.S. Batista, A.B. Peixoto e I.A. Davilla. 2002. Comportamento mecánico de frutos de café: módulo de deformidade. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 6(2): 285-294.
- Dziki, D. 2008. The crushing of wheat kernels and its consequence on the grinding process. Powder Technology 185(2): 181-186.
- Dziki, D. and J. Laskowski. 2005. Influence of selected factors on wheat grinding energy requirements. Teka 5: 56–64.
- Echeverry, C. y H. Rodríguez. 1997. La vitabosa (*Mucuna deeringiana*), una alternativa para el mejoramiento de suelos y control de malezas. SENA, Rionegro. 37 p.
- Glenn, G.M. and R.M. Sauders. 1989. Physical and structural properties of wheat endosperm associated with grain texture. Cereal Chemical 67(2): 176-182.
- González, H., A. Toro y E. Cortes. 2009. Requerimientos para la reducción de tamaño en molinos de la semilla de vitabosa. Scientia et Technica 2(42): 93-98.
- Gupta, R.K. and S.K. Das. 1997. Physical properties of sunflower seeds. Journal of Agricultural Engineering Research 66(1): 1-8.
- Gupta, R.K. and S.K. Das. 2000. Fracture resistance of sunflower and kernel to compressive loading. Journal of Food Engineering 46(1): 1-8.
- Henry, Z.A., B. Su and H. Zhang. 2000. Resistance of soybeans to compression. Journal of Agricultural Engineering Research 76(2): 175-181.
- Kibar, H. and T. Ozturk. 2009. The effect of moisture content on the physico-mechanical properties of some hazelnut varieties. Journal of Stored Products Research 45(1): 14–18.
- Laskowski, J and G. Lysiak. 1999. Use of compression behavior of legume seeds in view of impact grinding prediction. Powder Technology 105(1-3): 83–88.
- Laskowski, J and S. Skonecki. 1997. Influence of moisture on the physical properties and parameters of the compression process of legumes seeds. International Agrophysics 11: 245- 256.
- Lysiak, G. and J. Laskowski. 2004. Investigation of mechanical properties of faba bean for grinding behavior prediction. Acta Agrophysica 4(3): 753-762.
- Matenga, V.R., N.T. Ngongoni, M.Y. Titterton and B.V. Maasdorp. 2003. *Mucuna* seed as a feed ingredient for small ruminants and effect of ensiling on its nutritive value. Tropical and Subtropical Agroecosystems 1(2-3): 97-105.
- Melguizo, S.B. 1977. Instalaciones eléctricas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Arquitectura. Departamento de Construcción. Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 191 p.
- Mohsenin, N. 1986. Physical properties of food and agricultural materials: a teaching manual. Routledge, New York. 147 p.
- Molenda, M., J. Horabik and J. Laskowski. 2005. Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences, Lublin, Poland. 145 p.
- Paulsen, M.R. 1978. Fracture resistance of soybeans to compressive loading. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) 21(6): 1210-1216.
- Rojas, A.F. 2010. Caracterización físico-mecánica de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*). Tesis Magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 134 p.

- Ruíz, M.A. 2000. Propiedades físicas de productos agrícolas. pp. 2-22. Documento Centro E.T.S.I. Agrónomos Universidad Politécnica de Madrid.
- Saiedirad, M.H. A. Tabatabaeefar, A. Borghei, M. Mirsalehi, F. Badii and M. Ghasemi. 2008. Effects of moisture content, seed size, loading rate and seed orientation on force and energy required for fracturing cumin seed (*Cuminum cyminum* Linn.) under quasi-static loading. *Journal of Food Engineering* 86: 565-572.
- Sathiyarayanan, L. and S. Arulmozhi. 2007. *Mucuna pruriens* Linn. A Comprehensive Review. *Pharmacognosy Review* 1(1): 157-162.
- Sharma, S.K., S. Mulvaney and S. Rizvi. 2003. Ingeniería de alimentos. Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Limusa Wiley, México. 358 p.
- Singh, K.K. and T.K. Goswami. 1996. Physical properties of cumin seed. *Journal of Agricultural Engineering Research* 64(2): 93-98.
- Villamizar, F.C., P. Restrepo, J. Ospina, D. Miranda, V. Flórez, A. Galvis y M. Perea. 2004. Inventario de las investigaciones realizadas en poscosecha de productos agrícolas en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Opciones Gráficas Editores Ltda, Bogotá. 317 p.