

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LA SEMILLA DE VITABOSA

(Mucuna deeringiana)

ANGEL FRANCISCO ROJAS BARAHONA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y ALIMENTOS

POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

MEDELLÍN

2010

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LA SEMILLA DE VITABOSA

(Mucuna deeringiana)

ANGEL FRANCISCO ROJAS BARAHONA

**Trabajo de Investigación como requisito parcial, para optar al título de Magíster en
Ciencia y Tecnología de Alimentos**

Director: Profesor IVÁN DARÍO ARISTIZABAL TORRES, Ing. Agrícola, D.Sc.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y ALIMENTOS

POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

MEDELLÍN

2010

NOTA ACEPTACIÓN:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, 19 de abril del 2010

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Iván Darío Aristizábal Torres por su asesoramiento científico, sus valiosas sugerencias y acertados aportes durante el desarrollo de este trabajo.

Al profesor Hugo Alberto González Sánchez por su oportuna colaboración.

Al personal del laboratorio de Mecanización Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín por su generosa colaboración.

Al laboratorio de Procesos Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Al laboratorio de Cosecha del Centro de Investigaciones del Café (CENICAFE), especialmente al Doctor Carlos Eugenio Oliveros Tascon.

También un reconocimiento muy especial a mi familia por estar siempre a mi lado con la comprensión y constante motivación que siempre he necesitado.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron para en el desarrollo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	18
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 GENERALIDADES.....	21
1.2 TAXONOMÍA.....	21
1.3 DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA	21
1.4 CONDICIONES AGRONÓMICAS.....	22
1.5 PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN.....	22
1.6 USOS Y APLICACIONES.....	23
1.7 PROPIEDADES FÍSICAS	27
2. CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS GRANOS Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS	27
2.1 FORMA Y TAMAÑO.....	29
2.2 TAMAÑO DE LAS SEMILLAS EN FUNCIÓN AL CONTENIDO DE HUMEDAD.....	31
2.3 DENSIDAD.....	35
2.4 POROSIDAD	37

2.5	COEFICIENTE DE FRICCIÓN	38
2.6	ANGULO DE REPOSO	41
3.	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	43
3.1	COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ALGUNAS SEMILLAS EN FUNCIÓN A LA HUMEDAD.....	44
3.2	TERMINOLOGÍA RELACIONADA CON LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PRODUCTOS BIOLÓGICOS.....	46
4.	OBJETIVOS	50
4.1	OBJETIVO GENERAL	50
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	50
5.	METODOLOGÍA.....	51
5.1	LOCALIZACIÓN.....	51
5.2	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	51
5.2.1	Determinación de la humedad y acondicionamiento de las semillas.....	52
5.2.2	Acondicionamiento de los diferentes niveles de humedad.....	52
5.3	MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	56
5.3.1	Dimensiones y tamaño.....	56
5.3.2	Esfericidad.....	57

5.3.3	Área superficial.....	57
5.3.4	Área proyectada y dimensiones ortogonales.....	58
5.3.5	Masa.....	61
5.3.6	Densidad real.....	61
5.3.7	Densidad aparente.....	62
5.3.8	Porosidad.....	62
5.3.9	Coefficiente de fricción.....	63
5.3.10	Angulo de reposo.....	65
5.4	MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	66
5.4.1	Medición del módulo proporcional de deformabilidad.....	67
5.4.2	Medición de la fuerza de ruptura.....	73
5.4.3	Medición de la deformación en el punto de ruptura.....	73
5.4.4	Medición de la energía absorbida.....	73
5.5	MEDICIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE MOLIENDA	73
5.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	75
6.	RESULTADOS	76
6.1	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS.	76
6.1.1	Evaluación de las dimensiones ortogonales, diámetro medio geométrico y diámetro medio aritmético.....	76
6.1.2	Evaluación de las dimensiones ortogonales con análisis de imagen.....	79

6.1.3	La esfericidad.....	82
6.1.4	Área superficial.....	83
6.1.5	Área proyectada.....	84
6.1.6	Masa.....	86
6.1.7	Densidad real, Densidad aparente y Porosidad.....	87
6.1.8	Coefficiente de fricción.....	89
6.1.9	Angulo de reposo.....	94
6.2	MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	96
6.2.1	Modulo proporcional de deformabilidad.....	96
6.2.2	Deformación en el punto de ruptura.....	99
6.2.3	Fuerza de ruptura.....	101
6.2.4	Energía absorbida.....	103
6.2.5	Consumo de energía de molienda.....	106
7.	CONCLUSIONES	109
8.	RECOMENDACIONES	111
9.	BIBLIOGRAFÍA	112
10.	ANEXOS.....	129

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores de calibración (mm/pixel) de las imágenes de semillas de vitabosa en diferentes planos y porcentajes de humedad.	61
Tabla 2. Valores de constante K. para los valores de las ecuaciones (16) y (17).	72
Tabla 3. Medias de longitud (L), ancho (W) y grosor (T) de la semilla de vitabosa, en diferentes contenidos de humedad.	77
Tabla 4. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento de las dimensiones ortogonales en función de la humedad de la semilla de vitabosa.	78
Tabla 5. Medias del tamaño medio aritmético y tamaño medio geométrico de la semilla de vitabosa, en los diferentes niveles de humedad.	79
Tabla 6. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento del tamaño medio de la semilla de vitabosa en función de la humedad.	79
Tabla 7. Dimensiones ortogonales de las semillas de vitabosa, medidas por la técnica de calibrador manual y análisis de imagen.	81
Tabla 8. Medias de la esfericidad de las semillas de vitabosa, en los diferentes niveles de humedad.	83
Tabla 9. Medias del área superficial de la semilla de vitabosa, en diferentes contenidos de humedad.	84

Tabla 10. Medias del área proyectada (mm^2) de la semilla de vitabosa, en diferentes niveles de humedad y posiciones.	85
Tabla 11. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento del área proyectada en función al contenido de humedad de la semilla de vitabosa para los diferentes planos.....	86
Tabla 12. Medias de la masa de la semilla de vitabosa, en diferentes contenidos de humedad.....	87
Tabla 13. Medias de la densidad real, densidad aparente y porosidad de la semilla de vitabosa, en función al contenido de humedad.....	88
Tabla 14. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento de las densidades y la porosidad de la semilla de vitabosa en función de la humedad.....	89
Tabla 15. Medias de coeficiente de fricción estático de las semillas de vitabosa, en diferentes superficies y contenidos de humedad.....	90
Tabla 16. Medias del coeficiente de fricción dinámico de las semillas de vitabosa, en diferentes superficies y contenidos de humedad.....	90
Tabla 17. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento del coeficiente de fricción de la semilla de vitabosa en función de la humedad.....	94
Tabla 18. Medias del ángulo de reposo de la semilla de vitabosa con diferente contenido de humedad.....	94
Tabla 19. Medias del módulo proporcional de deformabilidad de la semilla vitabosa, según el contenido de humedad, orientación y deformación específica	97
Tabla 20. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento del módulo proporcional de deformabilidad en función al contenido de humedad para los diferentes planos de la semilla de vitabosa.....	99

Tabla 21. Deformación de la semilla de vitabosa hasta el punto de ruptura con diferente contenido de humedad y plano de orientación.....	100
Tabla 22. Medias de la fuerza de ruptura y energía absorbida de la semilla de vitabosa, en diferente contenido de humedad y orientación.....	103
Tabla 23. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento de la fuerza de ruptura, deformación en el punto de ruptura y energía absorbida en función al contenido de humedad para los diferentes planos de la semilla de vitabosa.....	106
Tabla 24. Medias de la energía específica consumida en molienda en diferentes niveles de humedad.....	107

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cambios de algunas propiedades físicas en función al contenido de humedad de diferentes semillas evaluadas.....	34
Figura 2. Fuerza–deformación de un ensayo de compresión uniaxial de una semilla.....	49
Figura 3. Cámara húmeda para hidratar las semillas de vitabosa.....	53
Figura 4. Absorción de agua de semillas de vitabosa en cámara húmeda.....	54
Figura 5. Montaje para el análisis de imágenes.....	59
Figura 6. Imagen adquirida de la vitabosa en tres planos.(1.Longitudinal, 2. Transversal 3. Horizontal).....	59
Figura 7. Imagen de la semilla de vitabosa en el plano horizontal. a) Imagen original. b) Imagen en la escala de grises. c) Imagen binaria	60
Figura 8 Montaje experimental para evaluar el coeficiente de fricción.....	64
Figura 9. Montaje experimental para evaluar el ángulo de reposo.....	65
Figura 10. Prueba de compresión uniaxial entre dos platos planos. a) Máquina de ensayo universal (Instron 5569). b) plano longitudinal. c) Plano horizontal d) Plano transversal de la semilla.....	67
Figura 11. Esquema para calcular los radios de curvatura de la semilla en el plano horizontal.....	69

Figura 12. Radio de curvatura mayor (R) para el plano horizontal.....70

Figura 13. Radio de curvatura menor (r) para el plano horizontal.....70

Figura 14. Dimensiones ortogonales registradas en diferentes niveles de humedad por dos métodos I: análisis de imagen; M: calibrador manual.....80

RESUMEN

El material vegetal de investigación fueron semillas de vitabosa (*Mucuna deeringiana*), las cuales fueron recolectadas manualmente de un cultivo establecido en el Centro Agropecuario Cotove de la Universidad Nacional de Colombia ubicado en Santafé de Antioquia. Las evaluaciones físicas se realizaron en el Laboratorio de Procesos Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y las evaluaciones mecánicas se realizaron en el Laboratorio de Cosecha de Cenicafé en Chinchiná-Caldas. A partir de una muestra de 50 kg, las pruebas fueron realizadas a semillas de tamaño medio. Diferentes propiedades físicas y mecánicas fueron evaluadas para cuatro contenidos de humedad (10, 14, 18 y 22 % bh.). La longitud, ancho y espesor, los diámetros medio aritmético y geométrico, el área superficial y la masa (g/1000 semillas), porosidad, el ángulo de reposo se incrementaron significativamente cuando el contenido de humedad aumentó de 10 al 22 %; mientras que la esfericidad no varió significativamente con la humedad. El área proyectada se evaluó aplicando la técnica de análisis de imágenes en los tres planos (horizontal, transversal y longitudinal); siendo mayor en el plano horizontal y menor en el plano longitudinal; en todos los planos de orientación de la semilla se incrementó con la humedad. Las dimensiones ortogonales también fueron medidas con la técnica de análisis de imágenes, presentaron una significativa precisión con respecto al método manual. La densidad aparente y densidad a granel decrecieron con la humedad. El coeficiente estático y dinámico de fricción se evaluó en seis superficies de diferente material, en todas las superficies se incrementaron significativamente con la humedad, la

superficie de caucho y Policloruro de Vinilo (PVC) presentaron los mayores coeficientes de fricción. El módulo proporcional de deformabilidad, la fuerza de ruptura, deformación en el punto de ruptura y energía absorbida en el punto de ruptura se evaluaron en los tres planos de la semilla (longitudinal, horizontal y transversal). El módulo proporcional de deformabilidad decreció cuando se incrementó la humedad y la deformación, siendo mayor en el plano horizontal y de menor valor en el plano longitudinal. La fuerza de ruptura vario en los tres planos de la semilla siendo mayor en el plano horizontal y de menor valor en el plano longitudinal y decreció significativamente cuando se incrementó la humedad en el plano longitudinal y trasversal, mientras que la fuerza de ruptura en el plano horizontal aumentó cuando se incrementó la humedad del 10 al 14% b.h. y luego decreció cuando se incrementó de 14 al 22% b.h. La deformación se incrementó significativamente con la humedad entre los rangos de humedad del 10 al 14% y luego se incrementó levemente, presentando una menor deformación en el plano horizontal y mayor deformación en el plano longitudinal. La energía absorbida aumentó cuando se incrementó la humedad en el rango de 10 a 14 % b.h. y luego decreció cuando aumentó de 14 a 22% b.h. en los tres planos evaluados. La energía específica en el proceso de molienda de la vitabosa se incremento significativamente con la humedad.

Palabras clave: Vitabosa, *Mucuna deeringiana*, propiedades físicas y mecánicas, contenido de humedad, consumo de energía.

ABSTRACT

The researched plant material was vitabosa seeds (*Mucuna deeringiana*), which were collected manually from a crop established in the Agricultural Center Cotove of National University of Colombia, located in Santa Fe de Antioquia. The physical assessments were conducted at the Agricultural Process Laboratory of National University of Colombia - Medellin, and mechanical assessments were conducted at the Harvest Laboratory of Cenicafé in Chinchiná - Caldas. From a sample of 50 kg, the tests were conducted to medium-sized seeds. Different physical and mechanical properties were evaluated for four moisture contents (10, 14, 18 and 22% w.b.). The length, width and thickness, arithmetic mean diameters and geometric surface area and mass (g/1000 seeds), porosity, angle of repose increased significantly when the moisture content increased from 10 to 22%, while sphericity did not vary significantly with moisture. The projected area was evaluated using the technique of image analysis in three planes (horizontal, transverse and longitudinal), being higher in the horizontal plane and less in the longitudinal plane, at all levels of orientation of the seed increased with moisture. Orthogonal dimensions were also measured using the technique of image analysis, showed a significant accuracy compared to manual method. True density o particle density and bulk density decreased with moisture. The static and dynamic coefficient of friction was evaluated in six different material surfaces, on all surfaces increased significantly with humidity, The rubber and Polyvinyl Chloride (PVC) surfaces had the largest friction coefficient. The proportional modulus of deformability, rupture force, deformation and the energy absorbed at the point of rupture

were evaluated in three planes of the seed (longitudinal, horizontal and transverse). The proportional modulus of deformability decreased when increased moisture and deformation, being higher in the horizontal plane and of less value in the longitudinal plane. The rupture force varied in the three planes of the seed was greater in the horizontal plane and of less value in the longitudinal plane and decreased significantly when increased the moisture in the longitudinal and transverse plane, while that rupture force in the horizontal plane increased when the humidity increased from 10 to 14% wb and then decreased when increased from 14 to 22% w.b. The deformation increased significantly with the moisture from humidity ranges from 10 to 14% and then increased slightly, showing less deformation in the horizontal plane and largest deformation in the longitudinal plane. The absorbed energy values increased with humidity in the range of 10 to 14% w.b., and then decreased when it increased from 14 to 22% w.b., evaluated in three planes. The specific energy in the milling process of vitabosa increased significantly with humidity.

Key words: Vitabosa, *Mucuna deeringiana*, Physical and Mechanical properties, moisture content, energy consuming.

INTRODUCCION

En Colombia hay un déficit nacional de materias primas para elaboración de alimentos balanceados para animales, por lo cual es necesario importar algunas de ellas. A este hecho se suma que el costo de las materias primas vegetales para la elaboración de los alimentos balanceados se ha incrementado en más de un 50 %, debido a la tendencia mundial de utilizar biomasa para la producción de biocombustible, dejando a la industria de este sector en total dependencia de las materias primas de importación y sujeta a las variaciones de precios internacionales (Dominguez, 2008; Northoff, 2008).

Dada esta situación, es necesario buscar nuevas alternativas de diversificación de materias primas para mitigar los efectos de los precios internacionales, ya en alza. Es conveniente, entonces, que en Colombia se investiguen otras fuentes para la elaboración de alimentos balanceados. La semilla de vitabosa (*Muccuna deeringiana*) es una alternativa de fuente proteica para la producción de alimento animal. Aunque actualmente en nuestro país se obtiene un bajo aprovechamiento de esta semilla, por el desconocimiento de su alto potencial nutricional, de sus propiedades medicinales, fitosanitarias y su proceso agroindustrial. En este sentido, es necesario obtener conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la semilla de vitabosa; las cuales son importantes en los procesos agroindustriales de esta leguminosa. Para el caso de las semillas del género *Mucuna* las propiedades físicas y mecánicas son escasamente reportadas y particularmente para la *M. deeringiana* no se encontró en la literatura científica resultados sobre estas.

El estudio de las propiedades físico-mecánicas de la semilla de vitabosa aporta conocimiento científico; esencial para mejorar eficientemente el diseño y construcción de equipos y estructuras para el manejo, recolección, transporte, limpieza, clasificación, y procesamiento agroindustrial.

Según Villamizar *et al.* (2004) es poco el conocimiento de las características físicas y mecánicas de muchos productos de origen vegetal. Estas propiedades constituyen información básica de ingeniería, esencial para el diseño y optimización de maquinaria, equipos, estructuras y procesos. El desconocimiento de estas propiedades lleva a procesos agroindustriales poco eficientes, donde el diseño y construcción de equipos, estructuras y procesos agroindustriales se basan en el conocimiento empírico y también, en la mayoría de los casos, se utiliza maquinaria importada agregando mayores costos de inversión.

Actualmente, las metodologías de medición para la evaluación de las características físicas y 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 los procesos tecnológicos.

El objetivo del presente trabajo fue caracterizar algunas de las propiedades físicas y mecánicas de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*), en función a los cambios de

contenido de humedad; información que ayudará a desarrollar y optimizar los procesos agroindustriales de esta semilla.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES

A continuación se mencionan algunos aspectos importantes sobre el cultivo de la vitabosa.

1.2 TAXONOMÍA

La *Mucuna Deeringiana* (Bort) Merr, según la FAO (2008) y Tropical Forages (2008), se clasifica en la clase Magnoliopsida, subclase Rosidae, orden Fabales, familia Leguminosae, género *Mucuna*. En Colombia, se conoce con el nombre de Vitabosa.

1.3 DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA

Según el clima la planta puede ser bianual o anual, de grandes hojas trifoliadas, folíolos laterales de forma asimétrica, 70-150 mm de largo, 50-120 mm de ancho, presenta inflorescencia en racimo axilar, de hasta 320 mm de largo, flores de color púrpura o blanco pálido. Vainas oblongas, de 40-130 mm de largo, 10-20 mm de ancho, finamente pubescentes con pelos de color blanco a marrón claro. Sus vainas contienen hasta 7 semillas de forma oblonga y elipsoidal de 10 a 19 mm de largo, 8 a 13 mm de ancho, y 4,0

a 6,5 mm de espesor, de color variable (negro, marrón, crema, blanco, gris, beige, y moteado). El peso de cien semillas oscila entre 55 y 85 g (Tropical Forages, 2008).

1.4 CONDICIONES AGRONÓMICAS

La vitabosa requiere suelos con buen drenaje, de media a alta fertilidad; pero puede crecer exitosamente en suelos arenosos y puede ser productiva en un amplio rango de acidez ($\text{pH} < 8,0$). Es tolerante a la sequía pero no al encharcamiento. Puede cultivarse en zonas tropicales y subtropicales. Se adapta muy bien a altitudes de 0 – 1.600 msnm. El rango de temperatura óptima es de 19 a 27°C y requiere alta intensidad lumínica. Para su Establecimiento no requiere un alto grado de preparación del suelo, se siembra a un metro entre hileras y 20 a 80 cm entre plantas (20-40 kg / ha de semilla), a una profundidad de siembra entre 3 y 7 cm (Buckles *et al.*,1998).

1.5 PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN

Los rendimientos de biomasa oscilan entre 5000-12000 kg / ha de materia seca. La vitabosa puede producir altos rendimientos, incluso en suelos marginales o con bajo fósforo disponible. Las semillas según la variedad maduran entre 100-280 días después de la floración, su maduración no es uniforme. La producción de semillas se ha reportado en los EEUU de 1680 – 2240 kg/ Ha (Buckles *et al.*1998).

Su origen viene del sur de China y el este de la India. Ahora se encuentra ampliamente distribuida en algunos países de Asia, África, Centroamérica y sur América (Duke *et al.*, 1981, citado por Trejo, 2005). Aunque en Colombia es poco conocida y cultivada, se ha obtenido en zonas cálidas rendimientos de 1200 y 1500 kg por hectárea utilizando distancias de 25 x 25 cm y un grano por sitio Echeverry y Rodríguez (1997). El servicio de aprendizaje (SENA) y (CONIF) han realizado ensayos en lotes de algunas zonas de Uraba, donde el cultivo de vitabosa a los seis meses aportó al suelo aproximadamente 195 kg de nitrógeno.

1.6 USOS Y APLICACIONES

Es una leguminosa importante por su aporte de nitrógeno al suelo y su contribución al control de malezas y prevención de la erosión; el cultivo como abono verde y cobertura vegetal puede reducir el periodo de descanso del suelo, de cuatro hasta un semestre Echeverry y Rodríguez (1997).

En muchas partes del mundo le han dado diversas aplicaciones principalmente como: abono verde, cultivo de cobertura, y control de malezas. También se utiliza el forraje en ensilaje y heno para alimentar ganado, y las semillas y los piensos son utilizados para elaborar concentrado (Maasdorp, 2004). El mismo autor estudio la semilla de Mucuna

como suplemento alimenticio, donde logro sustituir en un 30% de maíz por Mucuna en ganado bovino sin registrar cambios adversos en los animales.

A pesar de la presencia de compuestos anti nutricionales y tóxicos, hay pruebas de que los granos de Mucuna se pueden destinar para alimentar rumiantes con el fin de complementar su dieta sin problemas aparentes, incluso se pueden alimentar animales monogástricos, con adecuados tratamientos de la semilla para la extracción de los compuestos antinutricionales como: inhibidores de tripsina, taninos y L- Dopa (Matenga *et al.*, 2003).

Camara *et al.* (2003), realizaron un estudio en república de Guinea, donde evaluaron diferentes dosis de semilla de Mucuna procesada, para alimentar pollos y cerdos, ellos concluyeron que la semilla de Mucuna es una fuente de proteína para alimentación animal y que se puede combinar con soya en un 50%, para sustituir fuentes de proteína más costosas.

Iyayi y Taiwo (2003), evaluaron el efecto de la semilla de Mucuna en el rendimiento de gallinas y pollos en diferentes dosis diarias, con dos tratamientos térmicos para eleiminar compuestos antinutricionales: semillas tratadas en autoclave 120 °C por 18 horas y semillas tostadas por 45 minutos. Aunque se redujeron los antinutricionales significativamente no encontraron diferencias en los dos tratamientos y los mejores resultados obtenidos fueron con una dosis de 6 % diaria y a niveles más altos causó reducción en el rendimiento.

En América Central, se utiliza en rotaciones de barbecho sembradas 45 días después del maíz, para mejorar las propiedades nutricionales del suelo (Buckles *et al.* 1998). En países como Guatemala y sur de México utilizan la semilla como un sustituto del café (semillas tostadas previamente), los habitantes de esa región le llaman “Nescafé” (Eilitta, 2004).

Rajeshwar *et al.* (2005) estudiaron *in vitro* la actividad antimicrobial de los extractos de la semilla de *Mucuna*, sobre microorganismos gram positivos y gram negativos. Los resultados mostraron una excelente actividad antimicrobial de amplio espectro excepto para *Staphylococcus aureus* ML 152 y *Vibrae cholera* 14035.

Se ha reportado que cantidades mayores al 10% de la semilla, en la dieta alimenticia de animales, pueden ocasionar efectos negativos en su desarrollo, causados por los factores anti nutricionales presentes en la semilla (Del Carmen *et al.*, 1999). No obstante las semillas pueden someterse a diferentes tratamientos, los cuales reducen los compuestos antinutricionales (Vadivel y Janardhanan, 2005); (Chaparro, 2009) obtuvo resultados prometedores en la reducción de factores antinutricionales de semilla de vitabosa, con diferentes tratamientos fisicoquímicos. Los tratamientos de tostado por 60 minutos e hidratación mas cocción ocasionaron una reducción de L-Dopa en un 60,3% y 59,7%, y fenoles totales en un 27,8% y 26,2%, respectivamente. La hidratación en soluciones de hidróxido de calcio y bicarbonato de sodio, se redujeron los taninos en un 69,8% y 63,9%, respectivamente. La hidratación mas cocción e hidratación en hidróxido de calcio, se redujeron los inhibidores de tripsina en un 83% y 75%, respectivamente.

En un estudio reciente, se demostró que reemplazando 50% de torta de algodón por heno de *Mucuna* en la dieta de ganado bovino, no hay efectos negativos en la digestibilidad, producción y composición de leche (Anago *et al.*, 2006).

Con propósitos medicinales, se ha extraído de las semillas el aminoácido L-Dopa empleado para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson (Sathiyarayanan y Arulmozhi, 2007). Aunque la L-Dopa, actualmente es sintetizada, la semilla de *Mucuna* recibe gran atención como un posible fármaco natural por sus altos contenidos de L-Dopa (Pulgalenthi *et al.*, 2005).

La FAO (2008) menciona que la semilla se puede emplear en raciones compuestas en algunos animales. Los pollos toleran, sin efectos adversos en la producción, hasta el 15% del consumo diario, sin embargo los cerdos no deben consumir grandes cantidades de semilla. Según experiencias reportadas en la literatura, los animales en general, no pueden tolerar más del 25% de la ración diaria, a menos que las semillas se sometan a un pretratamiento. Los compuestos anti nutricionales pueden extraerse sumergiendo las semillas en agua y ácido acético durante 24 horas.

1.7 PROPIEDADES FÍSICAS

El conocimiento de las propiedades físicas de los granos y semillas, constituyen una información fundamental de ingeniería para adecuar y operar máquinas, diseñar y construir estructuras de almacenamiento, montar sistemas adecuados de transporte, además, es un parámetro fundamental para el diseño de empaques, en el análisis de calidad y en el control de procesos (Ospina, 2001; Castro, 1996).

2. CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS GRANOS Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS

El contenido de humedad de los materiales biológicos tiene una variada influencia en sus propiedades mecánicas y su comportamiento en los procesos de molienda (Laskowski y Lysiak, 1999; Dziki, 2007).

Cada tipo de semilla posee su propia estructura y propiedades físico-químicas. El conocimiento de la estructura física, la fisiología y la composición química de cada una de las partes de los granos, es fundamental para comprender los cambios que presentan en las diferentes fases del manejo poscosecha y en los procesos industriales. El contenido de humedad es el factor de mayor importancia en el comportamiento del grano durante el manejo de poscosecha, en especial en el almacenamiento y procesamiento. El alto contenido de agua es uno de los factores que pueden causar pérdidas en estos productos. Su

control inadecuado en las operaciones de poscosecha pueden producir calentamiento de la masa del grano, así como generar infestaciones de hongos y ataque de insectos (Ospina, 2001).

En las semillas se identifican tres tipos de agua: el agua absorbida o libre, que es el agua que se encuentra en los espacios entre grano y grano, en la superficie, o dentro de los poros del material, sostenida por fuerzas capilares; este tipo de agua posee las mismas propiedades de agua libre. El agua adsorbida, que es el agua sostenida por atracción molecular; en este caso hay interacción entre las moléculas de agua y aquellas que componen el grano; también este tipo de agua es atraída por fuerzas intermoleculares llamadas fuerzas de Van der Waals. Por último, el agua de constitución, que es el agua combinada químicamente con la materia seca y sostenida por fuertes uniones químicas; esta agua es de difícil remoción, pero pueden ser extraída en condiciones controladas mediante algunos métodos de determinación de humedad (Ospina, 2001).

Actualmente, no se encuentra publicada información de las propiedades físicas y mecánicas de la semilla de vitabosa, pero hay muchas investigaciones sobre estas propiedades en diferentes granos y semillas de leguminosas, gramíneas y otras especies en función de su humedad: comino (*Cuminum cyminum* Linn.) (Singh y Goswami, 1996); neem (*Azadirachta indica*) (Visvanathan *et al.*, 1996); girasol (*Helianthus annuus*) (Gupta, 1997); cacao (*Theobroma cacao* L.) (Bart-Plange y Baryeh, 2003); quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) (Vilche *et al.*, 2003); amaranto (*Amaranthus cruentus*) (Abalone *et al.*, 2004);

lenteja (*Lens culinaris* Medik) (Amin *et al.*, 2004); moth gran (*Vigna aconitifolia*) (Nimkar, 2005); Fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) (Altuntas *et al.*, 2005); alcaparra (*Capparis* L.) (Dursun, 2005); maíz, (*Zea mays saccharata* Sturt.) (Coskun *et al.*, 2006); linaza (*Linum usitatissimum*) (Selvi *et al.* 2006); sorgo (*Sorghum bilcolour* L.) Moench (Mwithiga y Sifuna, 2006); haba (*Vicia faba* L.) (Altuntas y Yildiz, 2007); frijol Barbunia (*Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Barbunia') (Cetin, 2007); cilantro (*Coriandrum sativum* L.) (coskuner y Karababa, 2007); remolacha (*Beta vulgaris* L.) (Dursun *et al.*, 2007); arroz (*Oryza Sativa* L.) (Varnamkhasti *et al.*, 2007). En todas las investigaciones se observó una fuerte influencia de la humedad sobre las propiedades físicas de los granos y semillas. La humedad fue directamente proporcional a los cambios de tamaño, peso, forma, área proyectada, volumen, ángulo de reposo y coeficiente de fricción, mientras que la densidad real, densidad aparente y porosidad decrecen con la humedad. Las correlaciones encontradas por los autores entre propiedades físicas y humedad de las semillas fueron de tipo lineal.

2.1 FORMA Y TAMAÑO

Son parámetros mutuamente asociados que permiten describir cualquier producto. Criterios de redondez, esfericidad y semejanza a determinadas formas geométricas se utilizan para determinar la forma y tamaño de una semilla, para lo cual se pueden utilizar diferentes formulas matemáticas, las cuales se basan en las tres principales dimensiones ortogonales: longitudinal (eje mayor), ancho (eje medio) y espesor (eje menor).

Mohsenin (1970), citado por Dursun (2005) propone algunos criterios para determinar el tamaño, los cuales son: diámetro medio geométrico y el diámetro medio aritmético

$$D_a = \frac{(L + W + T)}{3} \quad (1)$$

$$D_g = (L \cdot W \cdot T)^{1/3} \quad (2)$$

Donde:

L = longitud (mm)

W = ancho (mm)

T = espesor (mm)

D_a = diámetro medio aritmético (mm).

D_g = diámetro medio geométrico (mm)

El mismo autor propone el criterio de la esfericidad para determinar la forma de un material biológico, con la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{D_g}{L} \quad (3)$$

Donde:

ϕ = esfericidad (adimensional)

2.2 TAMAÑO DE LAS SEMILLAS EN FUNCIÓN AL CONTENIDO DE HUMEDAD

Visvanahan *et al.* (1996) encontraron que la longitud y el diámetro externo mayor de las semillas de Neem (*Azadirachta Indica*), aumentaron significativamente de 12.87 a 16.20 mm y 6.86 a 8.52 mm, respectivamente; cuando se incremento la humedad de 7,6 a 21% b.s., debido a la hinchazón de la semilla. En tanto que las dimensiones de longitud ancho y espesor de las semillas de guna seed (*Citrillus lanatus*) no se incrementaron significativamente en un rango de humedad de 4,7 a 39,3% b.s. (Aviara *et al.*, 1999).

Baryeh (2002), encontró en los granos de sorgo una relación lineal con las dimensiones ortogonales (longitud, ancho y espesor), diámetro medio geométrico y el contenido de humedad, el efecto de la humedad en las variables se representa matemáticamente así:
 $L = 3,252 + 0,046M$, $W = 2,704 + 0.041M$, $T = 2,012 + 0.046 M$, $D_g = 2,811 + 0,044 M$.

Donde: M es humedad, L. es longitud, W. es ancho, T. es espesor. Bart-Plange y Bayeh (2003) en granos de cacao (*Theobroma cacao*) no encontraron una relación lineal entre el contenido de humedad y la longitud, ancho, grosor y el diámetro medio geométrico, en rango de humedad de 8,6 a 24 % b.h.

En semillas de quinua (*Chenopodium quinua* Willd) el tamaño medio de la semilla se incrementó linealmente en un 15,3% cuando se aumentó la humedad en un rango de 4,6 a 25,8 % b.s. (Vilche *et. al.*, 2003). Abalone (2004) encontró un leve dependencia de la

humedad con las dimensiones ortogonales (longitud, ancho, espesor) y diámetro medio geométrico en la semilla de amaranto (*Amaranthus tricolor*), dando un incremento lineal de 1,35 a 1,5 mm, 1,22 a 1,37 mm, 0,81 a 0,93 mm y 1,1 a 1,24 mm, respectivamente; en un rango de humedad de 9,5 a 43,6 % b.s. Igualmente Dursun y Dursun (2005) en semillas de alcaparra (*Capparis L.*), hallaron que las tres dimensiones axiales (longitud, ancho y espesor) incrementaron en un 18,8%, 20,8% y 23%, respectivamente; cuando se incrementó la humedad de 6,03 a 16,35% b.s. En semillas de lenteja (*lens culinaris*), el espesor y el diámetro se incrementaron significativamente, el espesor se incrementó de 2,18 a 2,48 mm y el diámetro de 3,84 a 4,06 mm (Amin *et al.*, 2004).

En semillas de maíz reventón o popcorn (*Zea mays averta*) todas las dimensiones lineales (longitud, ancho y espesor), diámetro medio geométrico y aritmético fueron significativamente y positivamente correlacionadas con los contenidos de humedad. Estos resultados indican que los granos se expanden en longitud, ancho y espesor; la variación fue de 8,18 a 9,14 mm, 5,71 a 6,32 mm, 3,65 a 4,9 mm, 5,54 a 6,55 mm y 5,85 a 6,79 mm, respectivamente en un rango de humedad de 8,95 a 17,12%. Un efecto mayor de la humedad se observó en el grosor de la semilla en un incremento del 34% (Karababa, 2006).

Altuntas y Yildiz (2007) encontraron una fuerte influencia de la humedad en la longitud, ancho, espesor y diámetro medio geométrico de las semillas de haba (*Vicia faba*); variando de 18,40 a 19,77 mm, 12,54 a 13,66 mm, 7 a 8,03 mm y 11,68 a 13,01, respectivamente; cuando la humedad de la semilla varió de 9,89% a 25,08% b.s. Sin

embargo, Baumler *et al.* (2006), en las semillas del girasol (*Helianthus annuus* L.) no encontraron una variación de la longitud, ancho y espesor en un rango de humedad de 3,7 a 15,6% b.s.

La semilla de cilantro (*Coriandrum sativo*) en un rango de humedad 7,1 a 18,94% b.s., el espesor incremento de 3,39 a 3,59, mientras que el ancho y el diámetro medio geométrico se incrementaron de 3,67 a 3,94 mm y 3,88 a 4,0 mm, respectivamente en el rango de humedad de 7,1 a 16,05%; por encima de este rango de humedad estas últimas dos variables tendieron a disminuir. La dimensión longitudinal de la semilla decreció, según los autores, se debe a un cambio de forma de la semilla volviéndose globular por un estiramiento de las bordes longitudinales cuando se incrementa los contenidos de humedad de la semilla (Coskuner y karababa, 2007).

En semillas de frijol variedad “Barbunia” (*Phaseolus vulgaris* var. Barbunia), las dimensiones lineales (ortogonales) y los tamaños medios fueron evaluados en un rango de humedad de 9,77 a 19,62% b.s., los cuales se incrementaron linealmente así: longitud 12,84 a 13,52 mm, ancho 9,22 a 9,94 mm, grosor 7,06 a 8,0 mm, diámetro medio aritmético 9,71 a 10,48 mm y diámetro medio geométrico 9,38 a 10,22 mm. (Isik y Hunal, 2007).

Las tres dimensiones (longitud ancho y grosor) de *Jatropha* (*jatropha curcas* L.) , fueron levemente influenciadas por la humedad aunque su dependencia fue lineal con una alta correlación en los contenidos de humedad; las dimensiones de longitud, ancho, espesor

diámetro medio geométrico y aritmético aumentaron de 18,65 a 19,21 mm, 11,34 a 11,85 mm, 8,91 a 9,48 mm, 12,32 a 12,89 mm y 12,97 a 13,51 mm, respectivamente en un rango de humedad de 4,75 a 19,57 % b.h. (Garnayak *et al.*, 2008).

Las anteriores investigaciones citadas, es resumida por el autor de éste trabajo en la Figura 1, donde se puede observar el comportamiento de las dimensiones ortogonales en diferentes semillas en función de los contenidos de humedad.

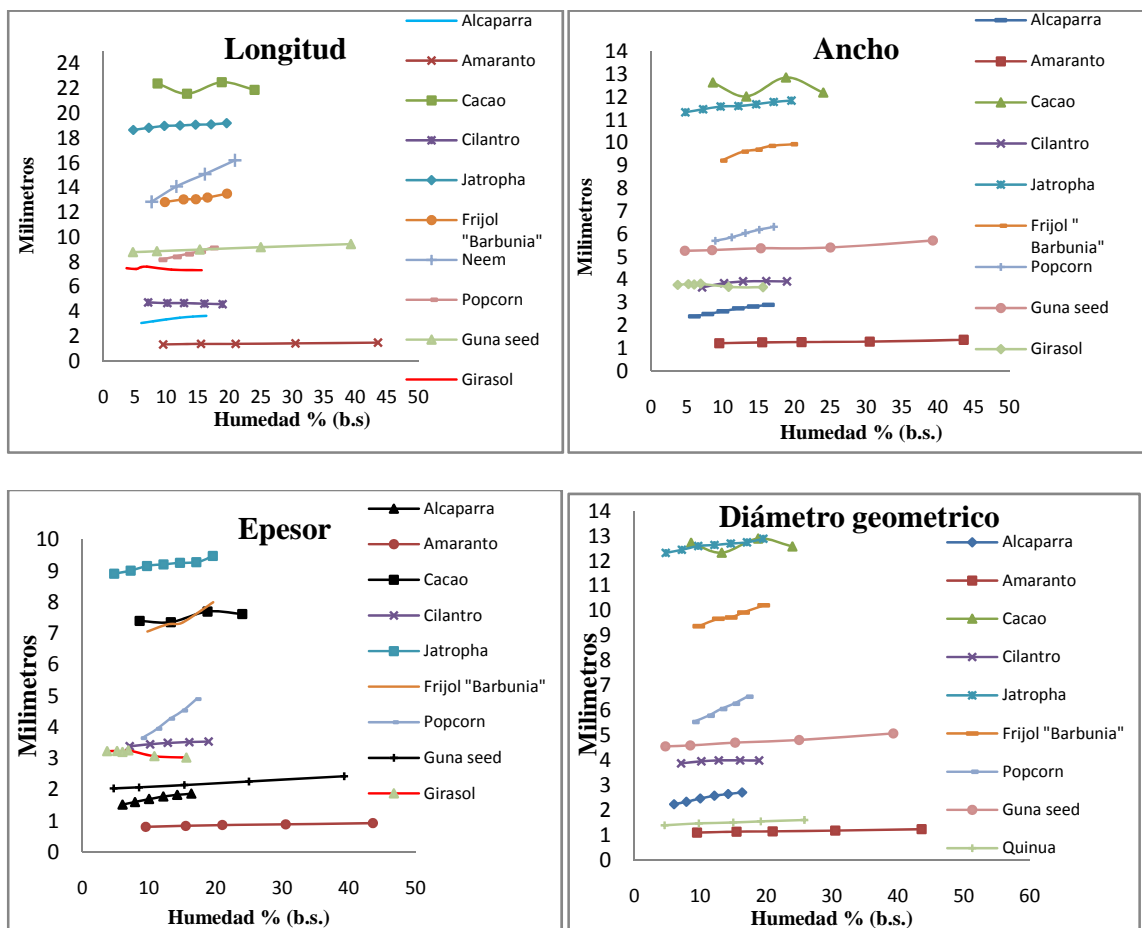


Figura 1. Cambios de algunas propiedades físicas en función al contenido de humedad de diferentes semillas evaluadas.

2.3 DENSIDAD

La densidad se define como la relación entre masa del producto y el volumen del mismo. En granos se distinguen dos tipos de densidad; la densidad aparente (densidad del grano individual) y la densidad a granel. La densidad a granel es la relación entre el peso y el volumen total de la masa del producto, incluyendo los espacios intersticiales que dejan los materiales entre sí. También se denomina densidad volumétrica.

La densidad aparente es la relación entre la masa del material y el volumen real ocupado por la partícula, excluyendo los espacios vacíos. La densidad aparente es un factor importante en el análisis de transferencias de masa y calor a través de los granos, en el control de calidad, en la evaluación, cálculo y diseño de sistemas de transporte, limpieza y clasificación. La densidad a granel es importante en el diseño de sistemas de almacenaje, empaque, deshidratación y transporte (Walther, 1977; Chung y Ho Lee, 1985; Mohsenin, 1986).

Resultados experimentales demuestran que la densidad aparente y la densidad a granel decrecen cuando se incrementa el contenido de humedad en diferentes clases de semillas: Visvanathan *et al.* (1996) en Neem, Aviara *et al.* (1999) en semillas de Guna, Sahoo y Srivastava (2002) en semillas de Okra, Bart-Plange y Baryeh (2003) en cacao, Abalone *et al.* (2004) en Amaranto, Amin *et al.* (2004) en lenteja, Dursun y Dursun (2005) en alcaparra, Karababa (2006) maíz reventón o popcorn, Altuntas *et al.* (2005) en Fenugreek,

Nimkar *et al.* (2005) en moth gram, Garnayak *et al.* (2008) en *Jatropha*, Mwithiga y Sifuna (2006) en tres variedades de sorgo aunque entre ellas hubo diferencias. Mientras que en otras investigaciones, la densidad aparente se incrementó cuando se aumenta el contenido de humedad de algunas semillas, según Singh y Goswami (1996) en semillas de comino Gupta y Das (1997) en girasol, Ogut (1998) en Lupino blanco (*Lupinus albus cv. Lolita*), Balasubramanian (2001) en Cashew (*Anacardium occidentale L.*), Vilche *et al.* (2003) en Quinoa, Coskun *et al.* (2005) en maíz dulce, Selvin *et al.* (2006) en Linseed, Aydin (2007) en maní, Altuntas y Yildiz (2007) en haba.

Coskuner y Karababa (2007) estudiaron la densidad aparente en función de la humedad en un rango de 7,1 a 18,94% de la semillas de cilantro observaron un decrecimiento de la densidad aparente hasta un contenido de humedad 12,82%; a partir de éste punto la densidad aparente se incrementó con el contenido de humedad. En tanto que Solomon y Zewdu (2008) en semillas de Niger en un rango de humedad de 5,6 a 31,65% b.s., la densidad aparente aumentó hasta cuando las semillas alcanzaron una humedad de 27,08%, desde este punto hubo un significativo decrecimiento de la densidad.

Suthar y Das (1996) en Karindga (*Citrillus Lanatus*) encontraron que la densidad aparente decrece en semillas completas, mientras que ésta se incrementa en semillas sin tegumento, cuando se incrementa la humedad. También la tendencia de los cambios por el efecto de la humedad es distinto en diferentes rangos de humedad como es el caso en el estudio de las propiedades físicas de la semilla de Frijol var. “Barbunia”; donde Cetin

(2007) observó un decrecimiento de la densidad cuando se incrementa la humedad en un rango de 18,33 a 32,43 b.s., mientras que Isik y Hunal (2007) observaron un incremento de la densidad en un 12,91% en un rango de humedad 9,77 a 19,62% (b.s).

2.4 POROSIDAD

Mohsenin (1986) refiere a la porosidad de un material biológico como un factor de empaque y se determina por la siguiente relación:

$$Porosidad = \frac{Densidad\ aparente - Densidad\ agranel}{Densidad\ aparente} \quad (4)$$

La porosidad es la cantidad de espacios vacíos que dejan los granos entre sí dentro de un recipiente, los cuales son ocupados por el aire. Se expresa como la relación entre el volumen de dichos vacíos y el volumen total. La porosidad juega un papel importante en el secado y en los procesos de aireación de los granos ya que de ella depende el movimiento y la resistencia que presenta el aire al atravesar una capa gruesa de grano.

En estudios realizados sobre algunos granos se encontró que la porosidad decrece cuando se incrementa el contenido de humedad, según los siguientes autores: Dursun y Dursun (2005) en alcaparra, Suthar y Das (1996) en Karinga, Visvanathan *et al.* (1996) en Neem,

Sahoo y Srivastava (2002) en Okra seed, Dursun *et al.* (2007) en remolacha. En tanto que en otras investigaciones se encontró que la porosidad se incrementa cuando se aumenta la humedad según: Abalone *et al.* (2004) en Amaranto en un 12,5%, Vilche *et al.*(2003) en Quinoa incremento en 131,6%, Bart-Plange y Baryeh (2003) en cacao en un 53,5%, Singh y Goswami (1996) en comino un 18,5 %, Altuntas y Yildiz (2007) en haba, en un 6,5 %, Aviara *et al.* (1999) en semillas de Guna en un 7,9%, Amin *et al.* (2004) en lenteja en un 7,3%, Aydin (2007) en maní, Karababa (2006) en Popcorn en un 4,1%, Ogut (1998) en Lupino blanco en un 164,3%, Altuntas *et al.* (2005) en Fenugreek, levemente incremento en un 2,5%, Cetin (2007) en frijol variedad “Barbunia”en 1,5% entre un rango de 18,33 a 32,43% (b.s); mientras que Isik y Hunal (2007) en la misma variedad de frijol observó un incremento de un 25,5 % en un rango de 9,77 a 19,62% (b.s), Coskuner y Karababa (2007) en cilantro en un 8,3%, Garnayak *et al.* (2008) en Jatropha en un 64,3%, Selvin *et al.* (2006) en Linseed en un 47,2%, Coskun *et al.* (2005) en maíz dulce en un 6,6%, Nimkar *et al.* (2005) en moth gran en un 13,5%, Solomon y Zewdu (2008) en semillas de Niger en un 14,1%, Gupta y Das (1997) en girasol en 26,2%, Balasubramanian (2001) en Cashew en un 8,9%.

2.5 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Cuando un cuerpo es colocado sobre una superficie plana, éste puede ser desplazado únicamente si la fuerza de fricción es vencida. La fuerza requerida para iniciar el

desplazamiento es denominada la fuerza de fricción estática. Después de iniciado el movimiento, la fuerza de fricción generalmente decrece y el movimiento puede ser mantenido por una fuerza, denominada fuerza dinámica de fricción (Ospina, 2001).

El Coeficiente de fricción es igual a la relación entre la fuerza de fricción y el peso del producto. La fuerza requerida para iniciar y mantener el movimiento puede ser también producida por un cuerpo situado sobre una pendiente de un ángulo determinado. Por lo tanto el coeficiente de fricción es debido a dos fuerzas principales: la fuerza requerida para deformar y algunas veces cortar las asperezas de las superficies en contacto y la fuerza requerida para vencer la adhesión y cohesión entre superficies (Ospina, 2001).

El coeficiente de fricción es una propiedad de los granos, fundamental para el diseño de maquinas agrícolas agroindustriales y estructuras de almacenamiento, así como operaciones de acondicionamiento, transporte y beneficio de granos. También es importante para determinar las pérdidas de potencia debidas a la fricción con las superficies de los equipos y disminución de daños mecánicos (Ospina, 2001 y Ruiz, 2000).

En algunas investigaciones el coeficiente estático de fricción se incrementa linealmente cuando aumenta el contenido de humedad de las semillas en todas las superficies evaluadas y depende del material de la superficie. Según Dursun y Dursun (2005) en semillas alcaparra el mayor valor de coeficiente estático de fricción para estas semillas fue en la superficie de caucho, seguido de madera contrachapada, hierro galvanizado y lamina

de aluminio, en un rango de humedad de 6,03 a 16,35% b.s. Bart-Plange y Baryeh (2003) en semillas de cacao encontraron el valor más alto fue en madera contrachapada, seguido de lamina de acero y caucho en un rango de humedad de 5 a 24% b.h. Singh y Goswami (1996) en semillas de comino halló que el valor más alto fue en acero templado, seguido de hierro galvanizado, acero inoxidable y aluminio en un rango de humedad de 7 a 22% b.s. Altuntas y Yildiz (2007) en haba encontró que los valores de fricción fueron en el siguiente orden descendente; caucho, madera contrachapada, acero templado, madera aglomerada y hierro galvanizado, en un rango de humedad de 9,89 a 25,08% b.s. Sacilik *et al.* (2003) en Hemp seed (*Cannabis sativa*); el valor más alto fue en la superficie de caucho, seguido de madera contrachapada y hierro galvanizado, en rango de humedad de 8,62 a 20,88% b.s. Garnayak *et al.* (2008) halló en *Jatropha* que el máximo valor de fricción fue en madera contrachapada, seguido de acero templado y aluminio, en un rango de humedad de 4,75 a 19,57% b.s. Isik y Unal (2007) para frijol Variedad “Barbunia” la mayor fricción fue en caucho, seguido de acero inoxidable, hierro galvanizado, aluminio y MDF, en orden descendente, en un rango de humedad de 9,77 a 19,62% b.s. Coskun *et al.*, (2005) en maíz dulce el valor más alto fue en caucho, seguido de hierro galvanizado, aluminio y acero inoxidable, en un rango de humedad de 11,54 a 19,74% b.s. Karababa (2006) en Popcorn (*Zea Mays var. averta*), el máximo valor fue en la superficie de madera contrachapada, seguido de hierro galvanizado y aluminio en un rango de 8,95 a 17,12% b.s. Ogut (1998) determinó que en semillas de lupino blanco el coeficiente estático de fricción no varió significativamente en el rango de humedad evaluado de 8,3 a 19,2% y fue el mismo valor en las superficies de caucho y acero.

2.6 ANGULO DE REPOSO

Cuando un grano es vaciado sobre una superficie horizontal plana el producto forma un montículo similar a un cono invertido. El ángulo formado por la horizontal y el talud es definido como el ángulo de reposo y está influenciado por el tamaño, forma volumen, densidad, superficie del grano, contenido de humedad y orientación de las partículas que conforman el grano. El ángulo de reposo varía con el contenido de humedad debido a la lámina superficial de humedad que rodea a cada partícula y a los efectos de tensión superficial que predomina sobre los productos granulares. Igualmente cuando se llena un silo, el ángulo de reposo puede variar dependiendo de la altura de llenado y el flujo del material (Ospina, 2001 y Mohsenin, 1986).

Existen dos tipos de ángulo de reposo: el *Angulo de reposo estático*, ángulo que forma el material granular cuando se desliza sobre sí mismo, y *Angulo de reposo dinámico*, que es el más importante y se presenta en todos los casos en que la masa granular se encuentra en movimiento, como es el caso de las operaciones de cargue y descargue de un silo, una bodega o una máquina (Ospina, 2001).

El ángulo de reposo, estático o dinámico, es indicador útil para saber la fluidez del material que sirve para caracterizar el comportamiento del flujo de los alimentos en procesos continuos (Alvarado, 2001). Entre menor sea el ángulo de reposo más fácil se desliza el grano (Ospina, 2001; Alvarado, 2001).

Muchos investigadores han encontrado una relación directamente proporcional entre el ángulo de reposo y el contenido de humedad en diferentes semillas: Dursun y Dursun (2005) en alcaparra, Bart-Plange y Baryeh (2003) en cacao, Singh y Goswami (1996) en comino, Altuntas y Yildiz (2007) en haba, Aviara *et al.* (1999) en Guna seed, Amin *et al.* (2004) en lenteja, Visvanathan *et al.* (1996) en Neem, Sahoo y Srivastava (2002) en Okra seed, Karababa (2006) en Popcorn, Altuntas *et al.* (2005) en Fenugreek, Coskuner y Karababa (2007) en cilantro, Garnayak *et al.* (2008) en Jatropha, Selvin *et al.* (2006) en Linseed, Nimkar *et al.* (2005) en moth gran, Solomon y Zewdu (2008) en semillas de Niger.

Mwithiga y Sifuna (2006) evaluaron el ángulo de reposo en función al contenido de humedad en tres variedades de sorgo, y observó un incremento con la humedad, aunque hubo diferencias entre las variedades. Vilche *et al.* (2003) evaluó el ángulo de reposo en función de la humedad en dos superficies (madera y hierro galvanizado) en ambas superficies se incrementó con la humedad, siendo mayor en la superficie de madera. El ángulo en función con la humedad en un 19% en madera y en un 33% en hierro galvanizado en un rango de humedad de 4,6 a 25,8% b.s.

3. PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas definen el comportamiento de un material en respuesta a la acción de cargas estáticas o cargas dinámicas, en tanto que la reología estudia la deformación y el flujo de la materia (Muller, 1973; Mohsenin, 1986; Sharma *et al.*, 2003)

El agua influye en las propiedades reológicas de los alimentos líquidos y sólidos; en alimentos líquidos puede originar cambios en la viscosidad o en la consistencia, mientras en alimentos sólidos afecta su resistencia o dureza (Lewicki, 2004).

Según Ruíz (2000), existen tres razones fundamentales para el estudio del comportamiento reológico de los materiales; el conocimiento profundo de su estructura, el diseño de máquinas adecuadas en su funcionamiento y que no produzcan daños y la determinación de la calidad de los productos para su aceptabilidad por el consumidor.

Las propiedades mecánicas en los productos agrícolas son importantes en el diseño de equipos de operación con máxima eficiencia sin comprometer la calidad del producto final (Correa *et al.*, 2007). Los granos durante las operaciones de recolección transporte y almacenaje se someten a muchas presiones de fuerza estáticas y dinámicas como altas velocidades de impacto, las cuales causan magulladuras, arrugas y fracturas que incrementa la susceptibilidad al deterioro durante el almacenamiento (Bargale *et al.*, 1995). Cuando los granos son sometidos a fuerzas que exceden su resistencia mecánica, el grano

se rompe o se agrieta (Altuntas y Yildiz, 2007). La humedad altera el comportamiento mecánico de las semillas por los cambios de la matriz estructural del almidón y la proteína, volviendo el producto suave y plástico (Murty y Bhattacharya, 1998). Gupta y Das (2000) manifiestan que los granos con altos contenidos de humedad muestran una baja resistencia a la compresión; debida al cambio gradual de la integridad de la matriz celular que ocurre con el incremento del contenido de humedad.

3.1 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ALGUNAS SEMILLAS EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD

El comportamiento mecánico de un material está relacionado con las propiedades obtenidas en un ensayo de compresión, tales como: curva fuerza-deformación, módulo de elasticidad, fuerza de fractura, deformación de falla, energía absorbida, entre otras (Mohsenin, 1986).

Stroshine (1993), afirma que el comportamiento reológico de los materiales secos como los granos está afectado por su contenido de humedad. Por ejemplo un cotiledón de soya con 13% de humedad es más fácilmente deformado que un endospermo de maíz con un 9,1% de humedad. Además afirma que la mayoría de los alimentos, particularmente de humedad alta, son más fácilmente deformados que las semillas.

Laskowski y Skonecki (1997), determinaron el efecto de la humedad en las propiedades físicas y mecánicas de la semilla de leguminosas de: Lupino (*Lupinus luteus*), haba (*Vicia faba*) frijol var. Fidelia (*Phaseolus vulgaris* L.) y vetch (*Vicia ervilia*). 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.

Muchos investigadores han evaluado el efecto de la humedad sobre el comportamiento reológico de los granos y semillas. En algunos trabajos como los de Marvin (1978), Singh y Goswami (1998) en comino, Henry *et al.* (2000) en soya, Gupta y Das (2000) en girasol, Baumler *et al.* (2006) en sanflower (*Carthamus tinctorius* L.), Dziki y Laskowski (2007) en centeno (*Secale cereale*), Altuntas y Yildiz (2007) en haba y Saiedirad *et al.* (2008), encontraron una reducción de la fuerza de ruptura, un incremento de la energía de ruptura y de la deformación específica en el punto de ruptura, cuando se aumenta el contenido humedad de las semillas. Sin embargo en algunos estudios realizados por: Vursavus y Ozguven (2004) en almendra de apricot (*Prunus armeniaca*), Olaniyan y oje (2002) en vitellaria paradoxa o shea nut (*Butyrospermum parkii*), Guner y Dursun (2003) en avellana o hazelnut (*Corylus avellana*), la deformación específica decrece cuando se incrementa la humedad de las semillas.

Correa *et al.* (2007), Kang *et al.* (1995) y Bargale *et al.* (1995), encontraron una reducción de la fuerza de fractura y del módulo de elasticidad cuando se incrementaron los contenidos de humedad de las semillas. A niveles altos de humedad el grano es menos elástico y más flexible o dúctil.

Laskowski y Lysiak (1999), evaluaron las propiedades reológicas de algunas semillas en diferentes niveles de humedad para predecir su comportamiento en el proceso de molienda. Entre los parámetros de resistencia obtenidos en la prueba de compresión, la deformación en el punto de ruptura fue significativamente correlacionado con el consumo de energía en el proceso de molienda, siendo directamente proporcional con el contenido de humedad.

De otra parte, Dziki (2007), en una investigación sobre los procesos de molienda de granos de trigo, concluye que el proceso de trituración antes de la molienda reduce considerablemente el consumo de energía, mientras que el aumento de la humedad incrementa el consumo de energía.

3.2 TERMINOLOGÍA RELACIONADA CON LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PRODUCTOS BIOLÓGICOS

Los productos biológicos son estructuralmente muy complejos y la mayoría anisótropos, su comportamiento elástico es en muchos casos casi imperceptible, salvo en un rango de esfuerzo muy reducido (Muller, 1978).

Algunos términos relacionados con las propiedades mecánicas de los productos biológicos son los siguientes:

Dureza o firmeza. Es la medida de la consistencia del material y se relaciona con la pendiente de la parte inicial de la recta de la grafica fuerza-deformación (Figura 2). Es la región donde se considera que el material tiene un comportamiento elástico (Ruíz, 2000)

Deformación. 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)

Limite elástico. Es la fuerza máxima que puede soportar un material sin que se produzca una deformación permanente después de retirar la carga a la que es sometido (corresponde al punto 1 de la Figura 2).

Módulo de elasticidad. El Módulo de elasticidad es una medida de rigidez o resistencia a la deformación de un material. También es la relación entre esfuerzo y la deformación correspondiente, por debajo del punto de fluencia o de deformación elástica (Mohsenin,1986).

Realmente, los materiales biológicos no son puramente elásticos, para su caracterización se utiliza, el módulo de elasticidad aparente o módulo de deformabilidad (ASABE, 2006).

Módulo de deformabilidad. Se obtiene a partir de la deformación total (deformación elástica mas la deformación plástica) solo requiere de la curva de esfuerzo deformación, obtenida de la prueba de compresión. El módulo de deformabilidad es el parámetro mejor

utilizado para determinar el comportamiento mecánico de un material biológico. 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, 2002).

Punto de bio-fluencia <<Bio-yield>>. Aparece después del límite elástico, corresponde al primer esfuerzo del material, menor al esfuerzo máximo alcanzable, en que se produce un aumento de la deformación sin incremento del esfuerzo. En la mayoría de los productos biológicos es casi imperceptible y representa el fallo inicial de la micro estructura del material (corresponde al punto 2 de la Figura 2).

Punto de ruptura. Es el punto de la curva de fuerza-deformación, donde la muestra se rompe o falla por la acción de la carga aplicada. En los productos biológicos, como los vegetales la ruptura o fuerza de fractura puede ser de penetración de la epidermis, agrietamiento exterior, etc. Se puede decir que es la falla de la macro estructura (corresponde al punto 3 de la Figura 2) (Mohsenin, 1986).

Energía absorbida. La resistencia a la compresión hasta la ruptura de un material se puede medir como la energía absorbida. También se utiliza el término de tenacidad ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^3$). 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).

Resistencia a la compresión. Capacidad de un material de absorber o resistir una cierta carga. Se calcula con la relación de la carga máxima, obtenida durante el ensayo de compresión hasta la ruptura y el área de la sección transversal de la probeta. Se mide en unidades de esfuerzo (N/m^2), o también es el esfuerzo necesario para fracturar el material. (Muller, 1978).

Relación de Poisson (μ). Cuando un material se comprime experimenta una deformación longitudinal y lateral. La relación de la deformación lateral y la deformación axial por debajo del límite proporcional del material, se llama relación de Poisson; varía de 0 a 0,5, los elastómeros (por ejemplo, el hule o caucho) se caracterizan por presentar valores cercanos a 0,5, las espumas flexibles o la miga de pan se encuentran valores cercanos a 0; los plásticos y metales presentan valores intermedios (Sharma, 2003).

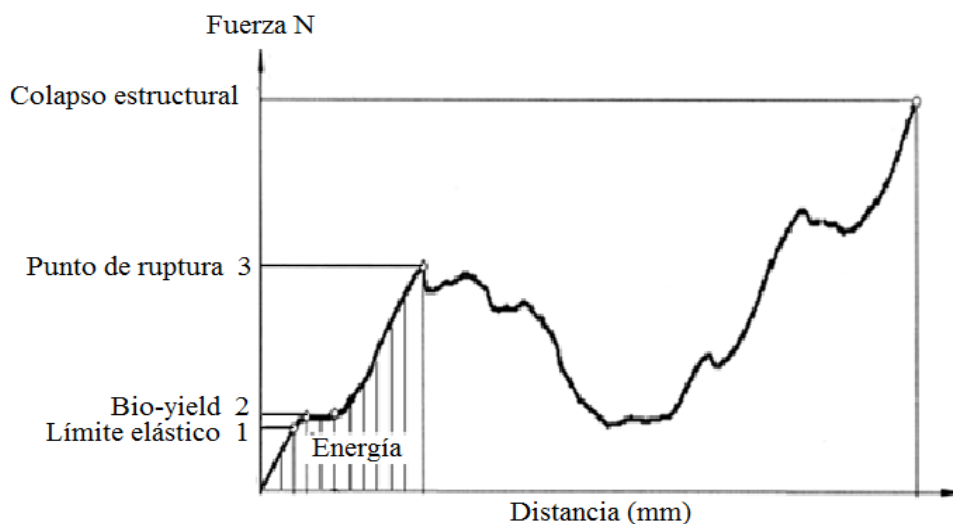


Figura 2. Curva fuerza-deformación de un ensayo de compresión uniaxial de una semilla. (Fuente: Laskowski y Lysiak, 1999).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar algunas de las propiedades físicas y mecánicas de la semilla de Vitabosa (*Muccuna deeringiana*) para su proceso agroindustrial.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar el efecto del contenido de humedad en semillas de vitabosa sobre algunas propiedades físicas: tamaño, esfericidad, área superficial, área proyectada, masa, densidad aparente, densidad a granel, porosidad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y dinámico.
2. Evaluar el efecto del contenido de humedad en semillas de vitabosa sobre algunas propiedades mecánicas: módulo proporcional de deformabilidad, fuerza de ruptura, energía absorbida y deformación en el punto de ruptura.
3. Evaluar el efecto del contenido de humedad en semillas de vitabosa sobre el consumo de energía en el proceso de molienda.

5. METODOLOGÍA

5.1 LOCALIZACIÓN

Las semillas de vitabosa (*Mucuna deeringiana*) fueron obtenidas de un cultivo establecido en el Centro Agropecuario Cotové, de la Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, localizado en el municipio de Santa Fe de Antioquia, con las siguientes características: humedad relativa de 55,4%, temperatura 27,3°C, 550 msnm, su composición química del suelo es: 3% de materia orgánica; pH de 7,2; fosforo 26 ppm; Ca 17,1; Mg 5,4; y K 0,17 en miliequivalentes/100g de suelo (Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín).

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Procesos Agrícolas, de la Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, y en el Centro Nacional de Investigaciones del Café CENICAFE, en Chinchiná-Caldas.

5.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Las semillas fueron recolectadas manualmente cuatro meses después de la floración y se eliminaron las impurezas (material vegetal, granos inmaduros y dañados). Se llevó una muestra de 50 kg al Laboratorio de Procesos Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia, donde se realizó el presente estudio. Según la metodología desarrollada por

Gupta (1997) y Saiedirad *et al.* (2008), las semillas fueron clasificadas en tres tamaños (pequeña, mediana y grande), utilizando tamices con aberturas redondeadas con las siguientes dimensiones: 30/64 (117 mm), 28/64 (110 mm), 22/64 (85 mm) y 20/64 (76 mm). Las semillas de tamaño mediano que pasaron por el tamiz 28/64 y retenidas en el tamiz 22/64, fueron utilizadas para todas las pruebas; evitando posible variabilidad de las pruebas por efecto del tamaño. (Marvin, 1978).

5.2.1 Determinación de la humedad y acondicionamiento de las semillas. El contenido de humedad inicial de las semillas fue determinado por el método de secado al horno en 103°C por 72 horas, según el standard S352.2 (ASABE, 2006). Se tomó una muestra aleatoria de 150 g la cual se dispuso en 10 bandejas de 15 g. La humedad inicial fue de 13 % (b.h.).

5.2.2 Acondicionamiento de los diferentes niveles de humedad. Las propiedades físicas y mecánicas de la semilla de vitabosa se evaluó en cuatro niveles de humedad: 10, 14, 18, 22%, en base húmeda (b.h.). Para obtener semillas con niveles de humedad de 10, 14, 18 y 22% se utilizó la metodología de adición de agua, aplicada por los investigadores Visvanathan *et al.* (1996) y Balasubramanian (2001); sin embargo, fue necesario modificar la anterior metodología para superar algunas limitantes, como la heterogeneidad en la absorción de agua y arrugamiento de los tejidos que cubre la semilla (testa) por efecto de las contracciones de las paredes celulares por la absorción de agua, modificando las propiedades físicas y mecánicas a medir.

Teniendo en cuenta las investigaciones realizadas por (Wuest *et al.*, 1999 y Wuest, 2007), quien demostró que las semillas pueden absorber grandes cantidades de agua en forma de vapor de agua hasta lograr hidratarse y germinar sin que se encuentren en contacto con el agua, se realizó un montaje de absorción de agua en cámara húmeda en el cual las semillas se hidrataron por medio de la absorción del vapor de agua. El procedimiento fue el siguiente:

Se utilizó un recipiente plástico de 25 cm de diámetro y una altura de 40 cm y un porta muestra elaborado con una malla, con abertura de 1 mm a 10 cm de la base del recipiente, donde se depositaron 1000 g de semilla. Antes de poner 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 como lo muestra la Figura 3.



Cámara hidrante

Granos de vitabosa

Nivel de agua

Figura 3. Cámara húmeda para hidratar la semilla de vitabosa

La Figura 4 muestra los gramos de agua absorbida por 1000 gramos de semilla con relación al tiempo que permanencia en la cámara húmeda.

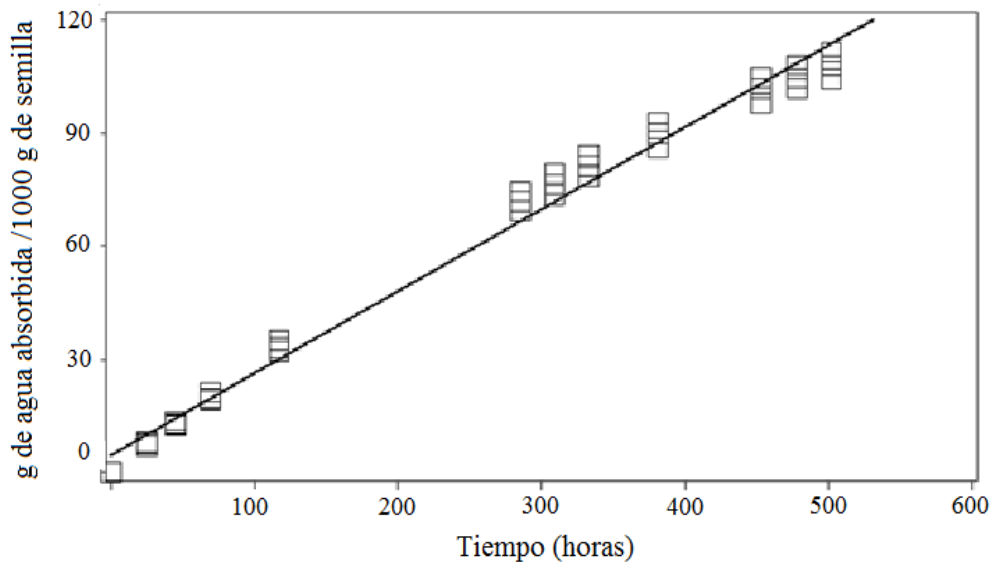


Figura 4. Absorción de agua de semillas de vitabosa en cámara húmeda.

La prueba de absorción en la cámara húmeda se realizó por triplicado a temperatura ambiente. El análisis de varianza reportó que el efecto del tiempo que duran las semillas dentro de la cámara húmeda es significativo, con un r^2 de 0,98, lo cual indica que el 98 % de la variabilidad observada en la absorción de agua puede explicarse por el tiempo en horas que permanecen las semillas dentro de la cámara y se representa con la ecuación $Y= 0,22 t +0,48$; con la anterior ecuación se puede predecir los gramos de agua absorbida por hora y por el método gravimétrico se determinó inicialmente la humedad de las semillas, utilizando la siguiente ecuación:

$$H_f = \frac{(W_i - W_f) \times 100}{W_i} \quad (5)$$

Donde:

H_f : Humedad final b.h (en base húmeda), %

W_i : peso inicial, g

W_f : peso final, g.

A partir de semillas con una humedad inicial de 13%, el tiempo que fue necesario mantener las muestras en la cámara húmeda para obtener semillas con los siguientes niveles de humedad fue:

14% (b.h.) = 45 horas

18 % (b.h.) = 235 horas

22% (b.h.) = 444 horas.

Con este procedimiento se obtuvo una homogeneidad de absorción sin daños mecánicos en la testa de la semilla, lográndose obtener una nueva metodología de hidratación de semillas que hasta el momento no ha sido reportada en investigaciones sobre cambios físico-mecánicos por efecto de la humedad.

Para obtener semillas con un 10% humedad b.h., éstas fueron deshidratadas en horno de convección forzada, a una temperatura de 45°C por 48 horas y una humedad relativa de 65%. La humedad requerida se determinó inicialmente por medio del método gravimétrico, utilizando la ecuación (5).

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. Las humedades de las semillas fueron verificadas antes de cada prueba, de acuerdo al standard; S352.2 (ASABE, 2006).

5.3 MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las características físicas evaluadas fueron; dimensiones ortogonales, tamaño, esfericidad, área superficial, área proyectada, masa, densidad real, densidad aparente, porosidad, coeficiente de fricción, y ángulo de reposo. A continuación se explican los procedimientos que se utilizaron.

5.3.1 Dimensiones y tamaño. Las dimensiones ortogonales (longitud (L), ancho (W), espesor (T) fueron determinadas con un micrómetro de una exactitud de 0,001 mm. A partir de ellas, se calculó el diámetro medio geométrico (D_g) y el diámetro medio aritmético (D_a) (Altuntas, 2007; Cetil, 2007; Dursun *et al.* 2007), utilizando las siguientes ecuaciones:

$$D_a = \frac{(L + W + T)}{3} \quad (6)$$

$$D_g = (L \cdot W \cdot T)^{1/3} \quad (7)$$

Para estas propiedades se trabajó con una muestra de 80 semillas tomadas al azar para cada nivel de humedad.

5.3.2 **Esfericidad.** Con las dimensiones ortogonales anteriormente determinadas y al mismo tamaño muestral, se aplicó la ecuación (8) para evaluar la esfericidad de las semillas Dursun *et al.* (2007), Joshi *et al.* (1993) y Dutta (1988).

$$\phi = \frac{D_g}{L} \quad (8)$$

Donde:

ϕ : esfericidad (adimensional)

D_g : diámetro geométrico (mm)

L : longitud (mm)

5.3.3 **Área superficial.** El área superficial fue también determinada con el mismo tamaño de muestra usando las dimensiones ortogonales, aplicando la ecuación (9) Jain y Bal (1997).

$$S = \frac{\pi.W.L^2}{2.L - W} \quad (9)$$

Donde:

S : área superficial, (mm²)

W : ancho, (mm)

L : longitud, (mm)

5.3.4 Área proyectada y dimensiones ortogonales. El área proyectada y también las dimensiones ortogonales de las semillas, se determinaron aplicando el método de procesamiento de imagen de acuerdo a la metodología propuesta por (Sahoo y Srivastava, 2002 y Bulent, 2007). Para esta prueba se utilizaron 80 semillas (repeticiones) tomadas al azar por cada nivel de humedad. Las semillas fueron fotografiadas en diferentes planos a la misma distancia a las mismas condiciones de iluminación, con una cámara digital Canon® Power shop A460 de 5,0 MP. Las imágenes adquiridas fueron almacenadas en un computador equipado con un software de procesamiento de imagen (Matrox Inspector 2.2®), con el cual se determinó el área proyectada (A_p) en (mm^2) y las dimensiones de longitud, ancho y espesor en (mm) en cada plano, basada en recuento del número de píxeles.

Para estas pruebas se montó la cámara sobre un soporte metálico fijo con una base plana de fondo blanco; en la parte superior de la cámara se acopló una lámpara circular de luz blanca (Figura 5), de esta manera se garantizó que la fotografías se tomarán a la misma distancia, con igual intensidad de luz difusa, evitando distorsiones de las imágenes por efecto de sombras y contrastes de fondo (Koc , 2007).



Figura 5. Montaje para el análisis de imágenes.

La distancia entre la base y el lente de la cámara fue de 80 mm. Cada semilla fue colocada en el centro de la base ubicada en tres planos diferentes (longitudinal 1, transversal 2 y horizontal 3). Para sostener las semillas en los planos longitudinal y transversal se utilizó una lámina delgada de plastilina como adherente (Figura 6).



Figura 6. Imagen adquirida de la vitabosa en tres planos (1.longitudinal, 2. transversal 3. horizontal).

La imagen original se convirtió a una imagen en escala de grises con un valor de 256 niveles que va desde el negro con un valor de (cero) hasta el blanco (255), luego fue transformada a una imagen binaria de dos niveles, (Figura 7). Para evaluar los parámetros de interés se trabajó con el nivel de gris medio de la superficie de la semilla, definiéndose los siguientes umbrales de niveles de gris para la segmentación de las imágenes:

Posición longitudinal: 118

Posición transversal: 108

Posición horizontal: 115

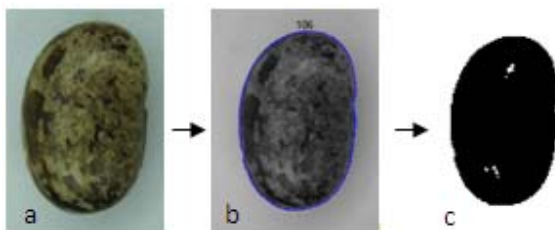


Figura 7. Imagen de la semilla de vitabosa en el plano horizontal a) imagen original b) imagen en la escala de grises c) Imagen binaria

En el programa de análisis de imagen, las dimensiones (en pixeles) de las fotografías fueron transformadas a unidades de longitud en (mm), mediante los factores de calibración (pixel//mm) indicados en la Tabla 1, hallados en ambas direcciones (X y Y) a partir de 10 imágenes de semillas por cada nivel de humedad en los tres planos antes indicados.

Tabla 1. Factores de calibración (pixel/mm) de las imágenes de semillas de vitabosa en diferentes planos y porcentajes de humedad

Humedad	Longitudinal		Transversal		Horizontal	
	Eje		Eje		Eje	
	x	y	x	y	x	y
10	54,85	54,41	48,60	47,85	46,45	46,15
14	54,75	55,60	49,50	48,60	46,80	46,40
18	57,50	56,00	50,70	48,20	45,80	45,70
22	55,85	55,92	48,85	47,15	44,80	44,70

Se obtuvo un total de 24 factores de conversión, los cuales se utilizaron en cada caso para realizar la determinación de longitud (mm), ancho (mm), espesor (mm) y área proyectada (mm²) de las semillas.

5.3.5 **Masa.** Con un tamaño muestral de 1000 semillas, pesadas en una balanza electrónica con 0,001 g de precisión, se determinó la masa (g). Se realizaron tres repeticiones por cada nivel de humedad (Bart-Plange, 2003)..

5.3.6 **Densidad aparente.** Se determinó por el método de desplazamiento de líquido, utilizando un recipiente aforado de 100 mL (con una precisión de 0,1 mL), el cual se llenó con 50 mL de agua destilada; luego, se sumergieron 20 gramos de semilla por un tiempo corto de 10 segundos, evitando que el grano absorbiera agua. El volumen del agua desplazada se registró por lectura directa en la escala del recipiente. La densidad aparente (ρ_a), en g/cm³, de las semillas se determinó como la relación entre el peso de semillas (g) y

volumen del agua desplazada (1mL = 1cm³). Se realizaron 10 repeticiones por cada nivel de humedad (Olajide y Ade-Omowaye, 1999 y Amin, 2004).

5.3.7 Densidad a granel. Para determinar la densidad a granel (ρ_b) se utilizó un recipiente aforado de 500 cm³, el cual se llenó con semillas sin compactar los granos, luego se pesaron las semillas en una balanza electrónica de 0,001 g de precisión. La densidad a granel se determinó con la relación: masa (peso en g de las semillas que ocuparon los 500 cm³) sobre el volumen (volumen ocupado por las semillas, en este caso fue 500 cm³) (Singh y Goswami, 1996). La prueba se realizó con 10 repeticiones por cada nivel de humedad.

5.3.8 Porosidad. La porosidad fue calculada a partir de los valores de densidad aparente y la densidad a granel obtenidos anteriormente, utilizando la ecuación (10) (Altuntas y Yildiz, 2007):

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_a} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

Donde:

ε : porosidad, %

ρ_b : densidad a granel, (g/cm³)

ρ_a : densidad aparente, (g/cm³)

5.3.9 Coeficiente de fricción. Los coeficientes de fricción estático y dinámico fueron evaluados en cinco superficies de diferentes materiales: acero inoxidable, aglomerado de madera, hierro galvanizado, caucho y polivinilo de cloruro (pvc) para los diferentes niveles de humedad de las semillas. Estos materiales se seleccionaron considerando que son los más comúnmente empleados para superficies de transporte en una planta de procesamiento agroindustrial.

Para realizar las pruebas se diseñó un montaje con un sistema de acoplamiento de superficie intercambiable para utilizar con el analizador de textura universal (TA.XT Plus, Stable Micro System), empleando la celda de carga de 50 kg. El texturómetro permitió en un modo de prueba de tensión y con la ayuda de una polea, ejercer una fuerza horizontal sobre una caja sin fondo de poco peso que contiene y permite el desplazamiento de la muestra de semillas a una velocidad constante de 10 mm/s (Figura 8). Las semillas, previamente pesadas, fueron depositadas en la caja de madera, con unas dimensiones de 90 x 90 x 90 mm. La caja que contiene las semillas se colocó sobre la superficie de prueba y se levantó 3mm para lograr que solo las semillas tengan contacto con la superficie y evitar que las paredes de la caja tuvieran contacto directo con la superficie de prueba, luego se ejerció una fuerza paralela a la superficie horizontal. La fuerza para desplazar la caja con las semillas sobre las superficies fue registrada directamente por el texturómetro. La fricción entre la polea y el cable conectado al texturometro fue considerada despreciable e igual para todas las superficies (Amin, 2004).



Figura 8. Montaje experimental para evaluar el coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción estático se registró como la fuerza máxima necesaria para empezar a mover el material, y se determinó con la ecuación (11):

$$\mu_o = \frac{F_o}{W} \quad (11)$$

Donde:

μ_o : coeficiente de fricción estático (adimensional)

F_o : fuerza máxima requerida para mover la muestra, kilogramos fuerza (kgf).

W : peso de las semillas más peso de la caja vacía, kilogramos fuerza (kgf).

El coeficiente de fricción dinámico (μ) se determinó de la misma manera, pero registrando la fuerza (F) que desplazó la muestra de masa (W) a una velocidad constante de 10 mm/s y se utilizó la ecuación (12) (Altuntas y Yildiz, 2007).

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (12)$$

Para estas pruebas se utilizaron muestras de 548 g de semilla y la caja vacía pesó 202 g. y se realizaron con 10 repeticiones por cada superficie y nivel de humedad.

5.3.10 **Angulo de reposo.** Para esta prueba fue necesario un montaje con un acople especial al analizador de textura universal (TA.XT Plus, Stable Micro System), lo cual garantizó que el equipo, en modo de prueba de tensión levantara el tubo contenedor de la semillas a velocidad constante evitando la variabilidad por efecto de movimiento desuniforme (Figura 9).



Figura 9. Montaje experimental para evaluar el ángulo de reposo.

Para determinar el ángulo de reposo, se utilizó un tubo de plástico de 76,2 mm de diámetro interno y 200 mm de longitud, el cual fue acoplado al texturómetro, de tal manera que descansa perpendicularmente en una superficie horizontal. En esta posición el tubo fue llenado con la muestra de semillas hasta una altura de 150 mm. Luego accionando el texturómetro se levantó el tubo a una velocidad constante de 10 mm/s, hasta lograr que todas las semillas fluyeran del tubo formando un montón sobre la superficie horizontal. Se determinó la altura y el diámetro del montón formado sobre la superficie. El ángulo de reposo fue medido utilizando la ecuación (13) (Jha, 1999).

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2H}{D} \right) \quad (13)$$

Donde:

θ = ángulo de reposo.

H = altura del montón, mm

D = diámetro de la base del montón, mm.

Para estos ensayos, el tamaño de muestra fue el número de semillas que ocuparon el 75% del volumen del tubo. Se realizaron 10 repeticiones para cada nivel de humedad.

5.4 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

La evaluación de las características mecánicas de las semillas, fue realizada a granos individuales tomados al azar para cada nivel de humedad y posición (longitudinal, horizontal y transversal) con 20 repeticiones. Las pruebas de compresión uniaxial se realizaron con una máquina de ensayo universal (Instron modelo 5569) equipada con una

celda de carga de 50 kN, (Figura 10). 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.

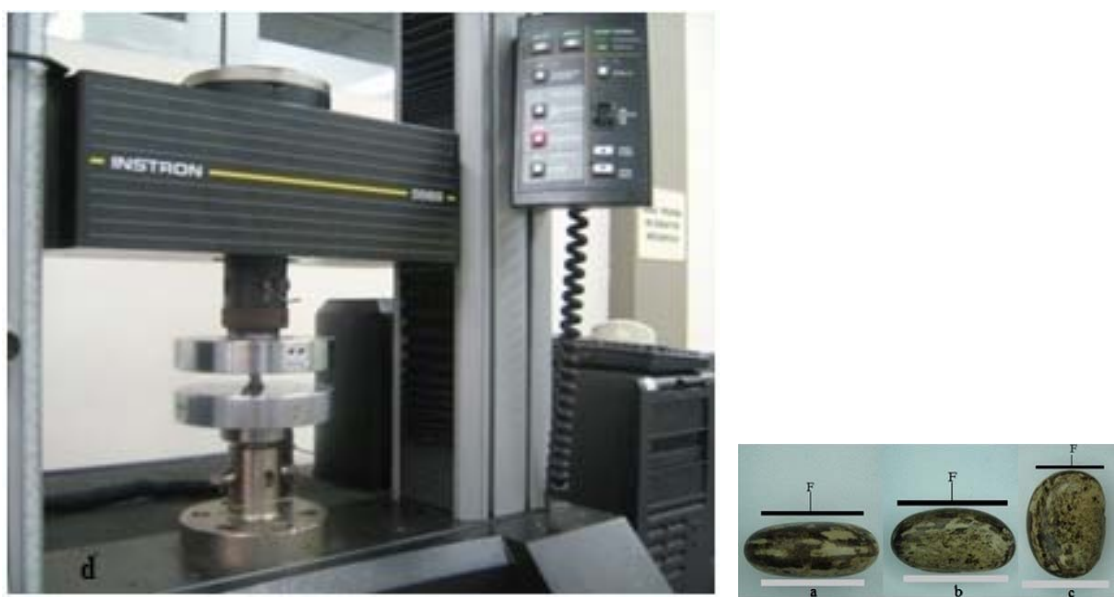


Figura 10. Prueba de compresión uniaxial entre dos platos planos a) plano horizontal, b) Plano transversal, c) Plano longitudinal de la semilla de vitabosa, d) Máquina de ensayo universal (Instron 5569).

5.4.1 Medición del módulo proporcional de deformabilidad. Debido a la dificultad para obtener formas geométricas bien definidas de las semillas de vitabosa para las pruebas de compresión, se utilizó el método de compresión de materiales biológicos de forma convexa, propuesto por Mohsenin (1986), donde se calcula el módulo de deformabilidad o también llamado por ASABE (2006) como módulo de elasticidad aparente; basado en la

ecuación de Hertz en su teoría esfuerzo de contacto, aplicada en mecánica de sólidos. Este método se utiliza en las pruebas de compresión de materiales intactos como: semillas, frutas, hortalizas, huevos etc., donde los platos planos de compresión del equipo hace contacto con un cuerpo de forma convexa, aplicando la ecuación (14).

$$E = \frac{0,338K^{3/2} F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (14)$$

Donde:

E : Módulo de deformabilidad o elasticidad aparente (Pa)

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 $\cos\theta$ con la ecuación (15)

Los radios de curvatura R y r se calcularon utilizando la circunscripción de sus dos ejes de la semilla que se encuentran en contacto con los platos del equipo, como se muestra la Figura 11.

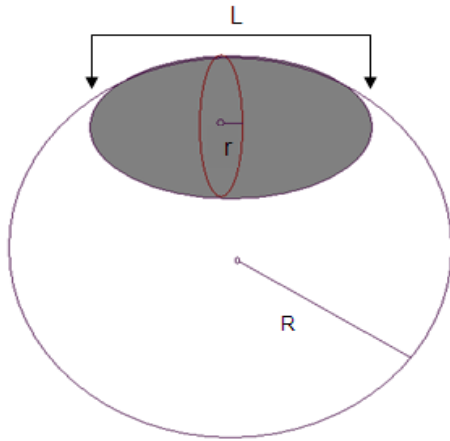


Figura 11. Esquema para calcular los radios de curvatura de la semilla en plano horizontal.

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)

Para efectuar la circunscripción se utilizó el programa editor de gráficos rasterizados y vectoriales (Jasc Paint Shop Pro 8®) y las imágenes en los tres planos, adquiridas previamente de las semillas que se le realizó la prueba de compresión. La circunscripción de cada eje se importó al programa de análisis de imágenes (Matrox Inspector 2.2), para determinar el radio de la circunferencia formada en los dos ejes de la superficie de contacto de la semilla. Las conversiones de pixeles a milímetros fueron las mismas mencionadas anteriormente para medir las dimensiones ortogonales y el área proyectada. Las Figuras 12 y 13, muestran el procedimiento para obtener el radio de curvatura en la posición horizontal

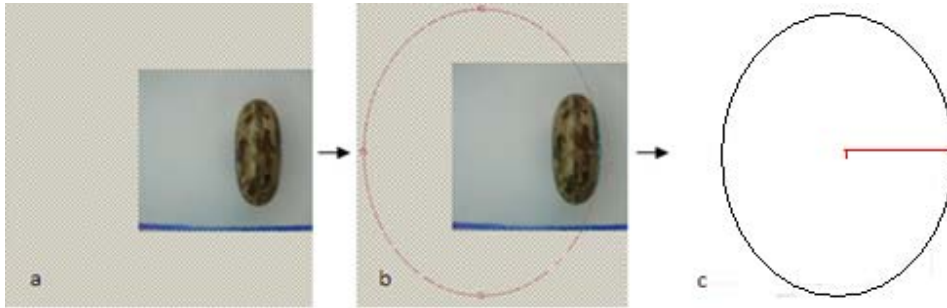


Figura 12. Radio de curvatura mayor (R) para el plano horizontal. a) Imagen original en el editor de gráficos. b) Imagen con la circunscripción en el editor de gráficos. c) Imagen b importada a Matrox inpector 2.2.

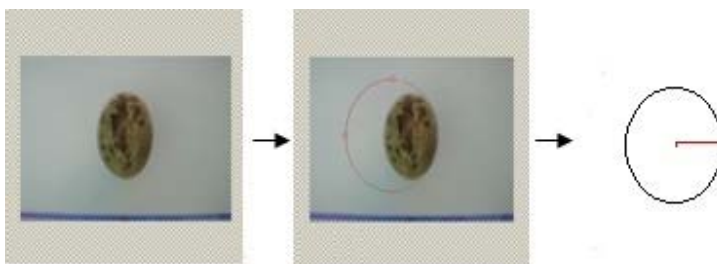


Figura 13. Radio de curvatura menor (r) para la plano horizontal.

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, el cual se determinó con la ecuación (15).

$$\mathbf{Cos \beta = \frac{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{R_1}\right)}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1}\right)}} \quad (15)$$

Donde:

β = Ángulo de curvatura de las superficies de contacto.

A partir del ángulo de curvatura se halló el valor de la constante K de la Tabla 2, la cual es una forma simplificada de una extensa tabla dada por Kosman y Cunningham en 1962 para resolver ecuaciones cuando los planos de curvatura de dos cuerpos en contacto no coinciden, (Mohsenin, 1986).

Tabla 2. Valores de la constante K para los valores de las ecuaciones (16 y 17)

β	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$\text{Cos}\beta$	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

El módulo de deformabilidad es una función de la relación de *Poisson* (μ) que se asume como valor constante para cada material, pero su valor es desconocido para la semilla de vitabosa, por lo tanto, se determinó mejor otra variable proporcional al módulo de deformabilidad llamada módulo proporcional de deformabilidad (E_p), para las pruebas en el plano longitudinal y horizontal, considerando una simetría entre los extremos longitudinales y horizontales de la semilla ($r_1 = r_2$ y $R_1 = R_2$), se utilizó ecuación simplificada. (Couto *et al.*, 2002).

$$E_p = \frac{E}{(1-\mu^2)} = \frac{0.338K^{3/2} F}{D^{3/2}} \cdot \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (16)$$

Donde:

E_p = módulo proporcional de deformabilidad (Pa)

E : Módulo de deformabilidad o elasticidad aparente (Pa)

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)

Para el caso del plano transversal, dado que los dos extremos de la semilla no son simétricos, se utilizó la ecuación (17) (Couto *et al.*, 2002).

$$E_P = \frac{E}{(1-\mu^2)} = \frac{0.338K^{3/2} F}{D^{3/2}} \cdot \left[\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (17)$$

Todos los ensayos de compresión para determinar E_p se realizaron para dos valores (2% y 4%) de deformación unitaria respecto a la dimensión de la semilla según el plano o posición de la misma entre los platos paralelos de la máquina de ensayo; las deformaciones unitarias se eligieron para evaluar el efecto de la deformación sobre el E_p , cuando se utiliza ésta técnica es aconsejable realizar las pruebas con deformaciones por debajo del 5% (ASABE, 2006).

5.4.2 Medición de la fuerza de ruptura. Se determinó durante las pruebas de compresión anteriormente mencionadas, la fuerza máxima (N) requerida para fracturar la semilla, utilizando los datos que son registrados automáticamente por el equipo en cada prueba.

5.4.3 Medición de la deformación en el punto de ruptura. A partir de los datos registrados automáticamente por el equipo en las pruebas de fuerza de ruptura se determinó la deformación (mm) alcanzada cuando la semilla se fractura.

5.4.4 Medición de la energía absorbida. La energía adsorbida por la semilla fue calculada como el área bajo la curva de fuerza vs deformación hasta el punto de ruptura registrada por el equipo durante el ensayo de compresión. Se registró en Julios (J).

5.5 MEDICIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE MOLIENDA

Las pruebas fueron realizadas con un molino de martillos oscilatorios sin placa dentada con una capacidad de 400 kg/h, el molino tiene las siguientes especificaciones: los martillos tienen 100 mm, 20 mm y 0,3 mm de longitud ancho y espesor, respectivamente; los martillos están separados a 5mm; el tamiz tiene una abertura de 4 mm y el espacio entre los martillos y el tamiz es de 20mm. Es accionado por un motor eléctrico trifásico de 2300 vatios. Para evaluar el consumo de energía, el molino fue alimentado manualmente con seis baches de 100g de semilla intercalados por un tiempo de 10 segundos. Las lecturas de la corriente eléctrica (I) y el voltaje (V) durante la molienda fueron obtenidas con un

amperímetro de pinza Fluker® 337. Estas fueron registradas cada 2 segundos. Para la prueba se utilizó una muestra total de 100g de semilla por cada nivel de humedad, con 18 repeticiones. Según la ley de Watt la energía consumida de un motor eléctrico es directamente proporcional al voltaje y a la corriente eléctrica en la unidad de tiempo, entonces se utilizó la ecuación (18) (Guizo, 1977).

$$E = P \cdot t \quad (18)$$

Donde:

E : energía (W.s)

P : potencia (W)

t : tiempo (s)

$$P = V \cdot I \cdot \text{Cos}\phi \quad (19)$$

V : voltaje (V)

I : corriente eléctrica (A)

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

El consumo específico de energía durante la molienda se calculó con la ecuación (20) (Laskowski y Lysiak, 1999).

$$CEE = \frac{E}{M} \quad (20)$$

Donde:

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

E: energía consumida durante la molienda (W.s).

M: cantidad de semilla molida (kg).

Los valores de energía consumida durante la molienda fue registrada por un tiempo de 10 segundos que fue el intervalo de cada bache.

5.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Las variables fueron analizadas con un diseño completamente aleatorizado. El área proyectada, fuerza de ruptura, energía absorbida y deformación se realizó bajo un arreglo factorial 4x3 (factor: humedad, nivel: plano de la semilla). Para el módulo proporcional de deformabilidad se realizó bajo un arreglo factorial 4x3x2 (factor: humedad, nivel: plano de la semilla, nivel: deformación) y el coeficiente de fricción se realizó bajo un arreglo factorial de 7 x 4 (factor: superficies y nivel: humedad).

Los resultados fueron analizados a partir del análisis de varianza. La prueba F fue utilizada para determinar el efecto significativo de cada tratamiento, para identificar diferencias significativas entre las medias utilizó la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 95 % ($\alpha = 0.05$). El análisis fue realizado con el paquete estadístico SAS versión 8.0.

Para determinar la relación entre la humedad y las propiedades físicas y mecánicas se realizaron análisis de regresión lineal y no lineal de los valores promedios de cada variable evaluada.

6. RESULTADOS

6.1 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS.

6.1.1 **Evaluación de las dimensiones ortogonales, diámetro medio geométrico y diámetro medio aritmético.** Las dimensiones de longitud, ancho y espesor de las semillas de vitabosa se incrementaron en promedio en un 5,6%, 5,6% y 6,8%, respectivamente, cuando se aumentó el contenido de humedad en el rango de 10% al 22% b.h.

El análisis de varianza reportó para estas tres dimensiones una diferencia estadística significativa para los niveles de humedad, indicando que la humedad influye significativamente en las dimensiones ortogonales de la semilla de vitabosa (Tabla 3).

Comparando las medias entre los diferentes contenidos de humedad, se encontró que la longitud no tiene diferencia estadística entre los contenidos de humedad 10 y 14%; 14 y 18%, mientras que el ancho se incrementó significativamente para todos los contenidos de humedad y para el espesor no se encontró diferencia estadística significativa en los contenidos de humedad del 18 y 22%.

Tabla 3. Medias de longitud (L), ancho (W) y espesor (T) de la semilla de vitabosa, para los diferentes contenidos de humedad

Humedad	L (mm)	W (mm)	T (mm)
10	16,29 ± 0,68 a	10,68 ± 0,27 a	6,94 ± 0,28 a
14	16,52 ± 0,65 ab	10,82 ± 0,24 b	6,98 ± 0,3 b
18	16,76 ± 0,68 b	11,02 ± 0,28 c	7,18 ± 0,32 c
22	17,21 ± 0,61 c	11,28 ± 0,25 d	7,41 ± 0,32 c

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= 80)

Similares resultados fueron encontrados en otras semillas por Altuntas y Yildiz (2007), en semillas de haba, Dursun y Dursun (2005) en alcaparra, Bart-Plange y Baryeh (2003) en cacao, Abalone (2004) en amarantho, Garnayak *et al.* (2008) en Jatropha, Amin *et al.* (2004) en lenteja y Karababa (2006) en cilantro; quienes manifiestan que un incremento de la humedad de la semilla genera un estiramiento de los tejidos proporcionalmente en sus tres planos longitudinales sin cambiar su forma. Contrariamente a lo hallado en vitabosa, los investigadores Coskuner y karababa (2007) encontraron que la longitud de la semilla de cilantro (*Coriandrum sativo*) disminuye cuando la humedad se incrementa de 7,1 a 16,05 %. Según los autores esto se debe a un cambio de forma de la semilla volviéndose globular por el estiramiento de los bordes longitudinales cuando se incrementan los contenidos de humedad. Mientras que Baumer *et al.* (2006) en semillas de girasol (*Helianthus annus* L) no encontraron cambios de la longitud, ancho y espesor cuando la humedad se incrementa en un rango de 3,7 a 15,6 %.

La Tabla 4 presenta las ecuaciones de regresión ajustadas a los valores experimentales de las dimensiones ortogonales de la semilla de vitabosa, en función al contenido de humedad.

Tabla 4. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento de las dimensiones ortogonales en función de la humedad de la semilla de vitabosa

Dimensión	Ecuación para dimensiones ortogonales		
	$D = aM + b$		
	a	b	R ²
Longitud	0,08	15,49	0,97
Ancho	0,05	10,15	0,98
Espesor	0,04	6,48	0,93

M= contenido de humedad de la semilla (% b.h.)

El diámetro medio aritmético (D_a) y el diámetro medio geométrico (D_g) se incrementaron en promedio de un 5,8 % y 5,9 %, respectivamente, en el rango de 10% al 22% de humedad.

El análisis de varianza reportó diferencias estadísticas significativas entre los contenidos de humedad, comparando las medias de los tratamientos, se encontró que D_a se incrementó significativamente con los contenidos de humedad, mientras que D_g no cambió significativamente para los contenidos de humedad de 10 y 14% (Tabla 5).

Tabla 5. Medias del diámetro medio aritmético (D_a) y diámetro medio geométrico (D_g) de la semilla de vitabosa en los diferentes niveles de humedad

Humedad	D_a	D_g
10	11,31 ± 0,32 a	10,65± 0,28 a
14	11,44 ± 0,32 b	10,76± 0,29 a
18	11,65± 0,31 c	10,98 ± 0,28 b
22	11,97 ± 0,29 d	11,28 ± 0,27 c

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= 80)

En la Tabla 6 se presentan las ecuaciones de regresión ajustadas a los valores experimentales del (D_a) y (D_g) de la semilla de vitabosa, en función al contenido de humedad.

Tabla 6. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento del tamaño medio de la semilla de vitabosa en función de la humedad.

Dimensión	Ecuación para el tamaño medio		
	$D = aM + b$		
	a	b	R^2
D_a	0,054	10,71	0,96
D_g	0,052	10,07	0,96

M= contenido de humedad de la semilla (% b.h.)

6.1.2 Evaluación de las dimensiones ortogonales con análisis de imagen. Las dimensiones ortogonales también se evaluaron aplicando la técnica de análisis de imagen. En la grafica 14 muestran las dimensiones ortogonales de la semilla de vitabosa para los diferentes niveles de humedad con los dos métodos (análisis de imagen y medición manual con el micrómetro digital).

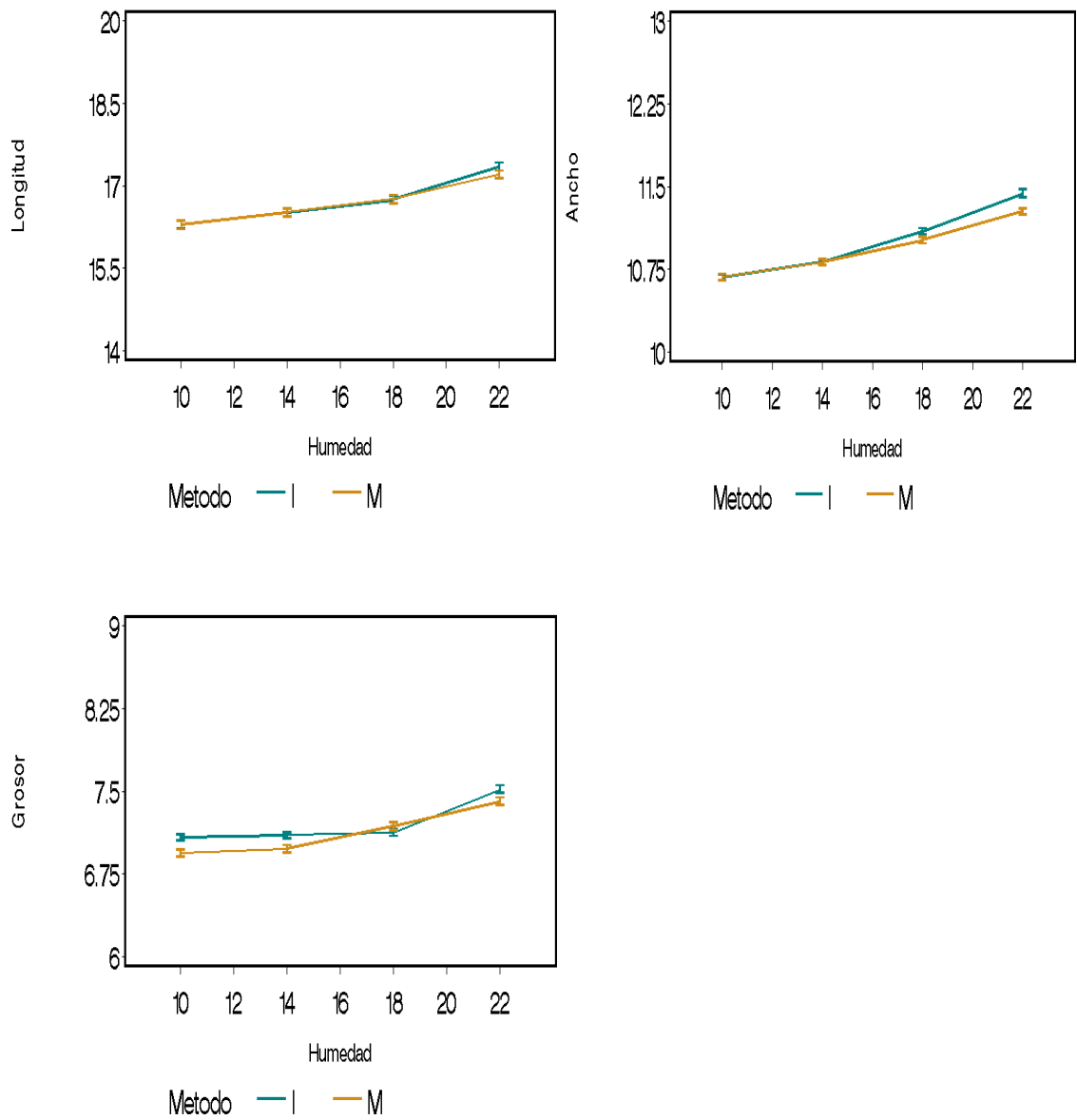


Figura 14. Dimensiones ortogonales registradas en diferentes niveles de humedad por dos métodos I: análisis de imagen; M: calibrador manual

Para evaluar la precisión de la técnica de análisis de imagen en las mediciones las características geométricas de la semilla de vitabosa bajo diferentes contenidos de humedad, se comparó con las obtenidas manualmente por el calibrador manual como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Dimensiones ortogonales de las semillas de vitabosa, medidas por la técnica de calibrador manual y análisis de imagen

Humedad	Longitud		Ancho		Espesor	
	Calibrador	Imagen	Calibrador	Imagen	Calibrador	Imagen
10	16,29 ± 0,68	16,31 ± 0,64	10,68 ± 0,27	10,68 ± 0,27	6,94 ± 0,28 *	7,08 ± 0,26*
14	16,52 ± 0,65	16,52 ± 0,68	10,82 ± 0,24	10,82 ± 0,26	6,98± 0,3	7,1 ± 0,25
18	16,76 ± 0,68	16,75 ± 0,71	11,02 ± 0,28	11,09 ± 0,28	7,18±0,32	7,13 ± 0,26
22	17,21 ± 0,61	17,35 ± 0,64	11,28 ± 0,25	11,44 ± 0,32	7,41±0,32 *	7,52 ± 0,31*

* Valores significativamente diferentes ($p < 0,05$). Los valores son expresados como la media ± desviación estándar (n= 80)

Según el análisis de varianza las medidas de longitud y ancho registradas por los dos métodos no presentaron diferencias significativas; esto demuestra que la técnica de análisis de imagen es una buena herramienta para determinar las características geométricas de longitud y ancho de la semilla de vitabosa. Sin embargo las dimensiones del espesor presentaron diferencias estadísticas significativas entre los dos métodos. Comparando las medias de las dimensiones del espesor de la semilla obtenidas por los dos métodos en cada contenido de humedad, se obtuvo que en las semillas con un contenido de humedad del 14 y 18 % las dimensiones del espesor no presentaron diferencias significativas, mientras la

semillas con un contenido de humedad del 10 y 22% las dimensiones de espesor presentaron diferencias significativas con respecto a los dos métodos. Lo cual nos indica que el método de análisis de imagen para determinar las dimensiones del espesor de la semilla de vitabosa perdió exactitud hacia los dos extremos del contenido de humedad; con un margen de error del 2% para semillas con un contenido de humedad del 10% y 1,5% para semillas con un 22% de humedad, se podría atribuir la causa a que las imágenes de la semilla en el plano transversal donde se determinó el espesor presentó variabilidad de tonalidades de la superficie, entre bordes oscuros, blancos y brillantes; lo cual distorsiona la segmentación real de la imagen binaria, afectando el recuento de píxeles.

Según los resultados el método de análisis de imagen sirve para determinar con gran exactitud las características geométricas de la semilla de vitabosa. Este método es importante para el diseño de sistemas automáticos de clasificación y control de calidad de la semilla.

6.1.3 La esfericidad. La Tabla 8 muestra la esfericidad (ϕ) con relación al contenido de humedad.

Tabla 8. Medias de la esfericidad (ϕ) de las semillas de vitabosa en los diferentes niveles de humedad

Humedad	ϕ	Rango
10	0,65 \pm 0.02 a	0,63 - 0,69
14	0,65 \pm 0.02 a	0,61 - 0,69
18	0,66 \pm 0.02 a	0,62 - 0,70
22	0,66 \pm 0.02 a	0,63 - 0,70

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Los valores son expresados como media \pm desviación estándar ($n = 80$) El análisis de varianza mostró que la humedad no tiene efecto significativo sobre la

esfericidad. Igual resultado encontraron Bart-Plange y Baryeh (2003), en semillas de cacao (*Theobroma cacao*), aunque en otras investigaciones realizadas por Abalone *et al.* (2004), Altuntas *et al.* (2005), Dursun y Dursun (2005), Selvi *et al.* (2006), Cetin (2007) Coskuner y karababa (2007) se reportan cambios leves cuando se incrementa la humedad de las semillas. Los resultados indican que la forma de la semilla no cambia por efectos de la humedad, es decir que la semilla sigue conservando sus proporciones ortogonales.

6.1.4 Área superficial. El área superficial de las semillas de vitabosa se incrementó en promedio de 11,5%, en el intervalo de 10 a 22% de humedad.

El análisis de varianza reportó que la humedad influye significativamente sobre el área superficial. El incremento del área superficial puede ser debido a un dilatamiento de las semillas cuando absorben humedad, formando una mayor área de contacto. Comparando las medias de los tratamientos se observó una diferencia estadística significativa para los diferentes contenidos de humedad (Tabla 9).

Tabla 9. Medias del área superficial (S) de la semilla de vitabosa en diferentes contenidos de humedad

Humedad	S (mm²)	Rango (mm²)
10	407,0 5± 21,51 a	364,92 – 461,48
14	417,58 ± 19,25 b	371,81 – 463,16
18	432,43 ± 21,61 c	398,38 – 488,45
22	453,69 ± 19,9 d	414,10 – 505,35

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$). Los valores son expresados como la media \pm desviación estándar (n= 80)

Los investigadores Garnayak *et al.* (2008), Karababa (2006), Dursun y Dursun (2005) y Selvi *et al.* (2006); reportaron un incremento del área superficial con la humedad, de las semillas de jatropha, maíz “reventón o popcorn” (*Zea Mays var. averta*), alcaparra y lino, respectivamente; los anteriores autores mencionan que el área superficial se incrementa por las semillas aumentan de volumen. La variación del área superficial de la semilla de vitabosa se representa con la ecuación lineal $S = 3,87M + 365,7$, con un coeficiente de determinación de 0.98.

6.1.5 Área proyectada. El área proyectada (A_p), en los tres planos de la semilla se incrementó cuando se aumentó el contenido de humedad (Tabla 10). El análisis de varianza indica que tanto la humedad como la orientación de la semilla tienen un efecto significativo sobre el área proyectada. Similar resultados encontraron los investigadores Dursun y Dursun (2005) en semillas de alcaparra y Cetin (2007) en frijol var. Barbania, quienes manifiestan que la humedad dilata las estructuras celulares de la semilla aumentando su tamaño dando origen a una mayor área proyectada y una mayor área

superficial. Comparando las medias, el A_p en el plano horizontal no fue significativamente diferente entre los contenidos de humedad del 10% y el 14%, y en los planos longitudinal y transversal A_p no difirió significativamente para los contenidos de humedad del 10, 14 y 18%; según los resultados el A_p es influenciada por grandes incrementos de humedad.

Tabla 10. Medias del área proyectada (mm^2) de la semilla de vitabosa, en diferentes niveles de humedad y orientación

Humedad	Orientación de la semilla		
	Horizontal	Transversal	Longitudinal
10	141,00 \pm 8,23 a	95,90 \pm 6,38 b	59,96 \pm 4,62 c
14	144,02 \pm 8,22 a	96,30 \pm 6,24 b	60,33 \pm 4,60 c
18	149,49 \pm 8,74 d	97,31 \pm 4,24 b	61,33 \pm 4,15 c
22	160,17 \pm 9,11 e	106,44 \pm 6,78 f	64,19 \pm 4,78 g

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 media \pm desviación estándar ($n = 80$)

El área proyectada mayor fue para el plano horizontal, seguido del plano transversal; siendo el mayor valor de A_p fue de 160.17mm^2 para las semillas con un contenido de humedad de 22 %, mientras que el menor valor de A_p fue de $59,96\text{mm}^2$ para las semillas dispuestas en el plano longitudinal con un contenido de humedad de 10%. Los valores en los diferentes planos están influenciados directamente por la forma de la semilla (elipsoide) y el incremento del área proyecta por la humedad se debe a un dilatamiento volumétrico de la semilla ocasionado por cambios estructurales de la matrix de las proteínas y almidones que hacen parte de la estructura de la semilla.

En la Tabla 11 muestran las ecuaciones lineales que representan la relación entre el área proyectada y el contenido de humedad para los diferentes planos de la semilla.

Tabla 11. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento del área proyectada en función al contenido de humedad de la semilla de vitabosa para los diferentes planos

Plano	Ecuación para el área proyectada		
	$A_p = aM + b$		
	a	b	R ²
H	1,57	123,40	0,93
T	0,82	85,93	0,71
L	0,34	55,97	0,85

M= contenido de humedad de la semilla (% b.h.)

6.1.6 **Masa.** El análisis de varianza reportó un efecto significativo de la humedad sobre la masa de la semilla. Efectuando la comparación de las medias de los tratamientos se observó que la masa no fue significativamente diferente entre los contenidos de humedad de 14% y 18%, de igual manera entre el 18% y 22%. Igual tendencia fue registrada en otras semillas por los investigadores Dursun y Dursun (2005) en Alcaparra, Coskuner y Karababa (2007) en cilantro, Cetin (2007) en frijol var. Barbunia, Garnayak *et al.* (2008) en Jatropha, Vilche *et al.* (2003) en quinua y Karababa (2006) en maíz “reventón o popcorn.

La Tabla 12 muestra la media de la masa de 1000 semillas de vitabosa para los diferentes contenidos de humedad.

Tabla 12. Medias de la masa de 1000 semillas de vitabosa en diferentes contenidos de humedad

Humedad	Masa (g/1000 semillas)	Rango
10	909,04 ± 13,87 a	894,71 - 922,40
14	969,85 ± 12,04 b	956,51 - 980,00
18	1006,92 ± 19,84 bc	984,08 - 1020,00
22	1035,55 ± 11,43 c	1024,40 - 1047,24

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$). Los valores son expresados como media ± desviación estándar ($n = 3$)

La masa variación de la masa por el contenido de humedad de las semillas es representa con la ecuación $Masa\ 1000\ semillas = 10,41M + 813,70M$, con coeficiente de determinación de R^2 de 0,97.

El análisis de varianza reportó una correlación altamente significativa, lo cual indica que la variación de la masa se debe a cambios de humedad de la semilla y se puede decir que al aumentar la humedad en las semillas el peso del agua se adiciona al peso del grano.

6.1.7 Densidad aparente, Densidad a granel y Porosidad. La Tabla 13 presenta los valores promedios de la densidad aparente, densidad a granel y porosidad en los diferentes niveles de humedad. Se observó que la densidad aparente y la densidad a granel decrecen, mientras que la porosidad se incrementó cuando aumentó la humedad, la densidad aparente de la semilla disminuye debido a que en mayores contenidos de humedad la densidad del agua; que a su vez es menor, influye sobre la densidad de la semilla, la densidad a granel disminuye con la humedad porque las semillas aumentan de tamaño, lo

cual hace que las semillas con altos contenidos de humedad ocupen más espacio. Comparando las medias se encontró que la densidad aparente no cambia significativamente entre los contenidos de humedad del 10, 14 y 18% y entre 18 y 22%, sin embargo la densidad a granel fue significativamente diferente en todos los contenidos de humedad, y la porosidad no presentó cambios significativos entre los contenidos de humedad 10 y 14% y entre 14 y 18%.

Según el análisis de varianza la humedad ejerce un efecto significativo sobre la densidad aparente, la densidad a granel y la porosidad. Similares resultados fueron encontrados en otras semillas por, Aviara *et al.* (1999), Amin *et al.* (2004) en lenteja, Abalone *et al.* (2004) en amaranth, Altuntas *et al.* (2005) en fenugreek, Nimkar (2005) en moth gran (*Vigna aconitifolia*), Karababa (2006) en maíz “reventón o popcorn” (*Zea Mays var. averta*) y (*Trigonella foenum-graceum* L.), Cetin (2007) en frijol var Barbunia, Coskuner y Karababa (2007) en cilantro. Las semillas con altos contenidos de humedad ocupan más espacio para su almacenamiento.

Tabla 13. Medias de la densidad aparente (ρ_a), densidad a granel (ρ_b) y porosidad (ϵ) de la semilla de vitabosa en función al contenido de humedad

Humedad	ρ_a (g/cm³)	ρ_b (g/cm³)	ϵ (%)
10	1,32 ± 0,01 a	0,88 ± 0,01 a	33,03 ± 0,55 a
14	1,31 ± 0,01 a	0,87 ± 0,01 b	33,60 ± 1,23 ab
18	1,30 ± 0,02 ab	0,85 ± 0,01 c	34,51 ± 1,45 b
22	1,29 ± 0,03 b	0,82 ± 0,003 d	36,19 ± 1,28 c

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Los valores son expresados como media ± desviación estándar (n= 10)

En la Tabla 14 se presentan las ecuaciones de regresión ajustadas a los valores experimentales de densidad aparente, densidad a granel y porosidad de la semilla de vitabosa, en función al contenido de humedad.

Tabla 14. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento de las densidades y la porosidad de la semilla de vitabosa en función de la humedad

Variable	Ecuación		
	$D = aM + b$		
	a	b	R ²
D. real	0,02	1,35	0,99
D. aparente	-0,005	0,94	0,95
Porosidad	0,26	30,17	0,94

M= contenido de humedad de la semilla (% b.h.)

6.1.8 Coeficiente de fricción. En las Tablas 15 y 16 muestra los valores medios del coeficiente de fricción estático (μ_0) y dinámico (μ) en función del contenido de humedad de las semillas para diferentes superficies de contacto. Ambos coeficientes de fricción se incrementaron cuando los contenidos de humedad aumentaron dentro de cada superficie estudiada y son diferentes entre superficies dentro de cada contenido de humedad; siendo en su orden de mayor a menor caucho, pvc, lona, acero inoxidable, hierro galvanizado y aglomerado de madera, y, pvc, caucho, lona, acero inoxidable, hierro galvanizado y aglomerado de madera, para los coeficientes estático y dinámico, respectivamente. El coeficiente estático de fricción fue mayor que el coeficiente dinámico de fricción en todas las superficies estudiadas y en los diferentes niveles de humedad, resultados que

concuerdan con otros autores (Amin *et al.*, 2004) y Altuntas *et al.*, 2005), ellos manifiestan que la fuerza necesario para mantener la muestra en movimiento es menor por la fuerza de inercia originada después del primer esfuerzo.

Tabla 15. Medias del coeficiente estático de fricción (μ_0) de las semillas de vitabosa, en diferentes superficies y contenidos de humedad

Humedad (%)	Superficies					
	Caucho	PVC	Acero Inox	Lona	Galvanizado	Madera
10	0,86 ± 0,02 aw	0,87 ± 0,07 aw	0,3 ± 0,02 bw	0,33 ± 0,02 bw	0,24 ± 0,01 cw	0,16 ± 0,01 dw
14	0,83 ± 0,03 aw	0,88 ± 0,09 aw	0,35 ± 0,02 bx	0,34 ± 0,02 bcw	0,29 ± 0,01 cx	0,21 ± 0,01 dx
18	1,04 ± 0,05 ax	1,09 ± 0,06 ax	0,44 ± 0,05 by	0,41 ± 0,02 bcx	0,38 ± 0,01 cy	0,3 ± 0,04 dy
22	1,05 ± 0,05 ax	1,13 ± 0,04 bx	0,58 ± 0,02 dz	0,45 ± 0,02 cy	0,4 ± 0,01 ez	0,36 ± 0,01 ez

Valores seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$), primer letra para la misma fila y segunda letra para la misma columna. Los valores son expresados como media ± desviación estándar (n= 10)

Tabla 16. Medias del coeficiente dinámico de fricción (μ) de las semillas de vitabosa, en diferentes superficies y contenidos de humedad

Humedad (%)	Superficies					
	Caucho	PVC	Acero Inox	Lona	Galvanizado	Madera
10	0,77 ± 0,03 aw	0,78 ± 0,06 aw	0,24 ± 0,01 cw	0,28 ± 0,01 bw	0,19 ± 0,004 dw	0,12 ± 0,004 ew
14	0,77 ± 0,04 aw	0,75 ± 0,05 aw	0,27 ± 0,01 bx	0,27 ± 0,01 bw	0,21 ± 0,005 cx	0,14 ± 0,004 dx
18	0,96 ± 0,04 ax	0,92 ± 0,04 ax	0,36 ± 0,02 cy	0,32 ± 0,01 bx	0,27 ± 0,01 dy	0,19 ± 0,01 ey
22	0,97 ± 0,05 ax	0,93 ± 0,05 bx	0,50 ± 0,02 dz	0,36 ± 0,02 cy	0,29 ± 0,01 ez	0,20 ± 0,01 fz

Valores seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$), primer letra para la misma fila y segunda letra para la misma columna. Los valores son expresados como media ± desviación estándar (n= 10)

Según el análisis de varianza, la humedad y el tipo de superficie tienen un efecto significativo sobre los coeficientes de fricción estático y dinámico. Estos resultados concuerdan con algunas investigaciones realizadas en otras semillas con diferentes superficies por Bart-Plange (2003), Dursun y Dursun (2005), Nimkar et al. (2005), Coskuner y Karababa, (2007), Gamayak *et al.* (2008); manifiestan que el coeficiente estático de fricción es mayor en contenidos de humedad altas por que el agua presente en las semillas ejerce una fuerza de adhesión en la superficie de contacto.

Comparando las medias del coeficiente estático de fricción entre superficies dentro de cada contenido de humedad, se obtuvieron los siguientes resultados: en semillas con un contenido de humedad del 10% no se encontraron diferencias estadísticas entre las superficies de caucho y pvc, y entre lona y acero inoxidable; en semillas con un contenido de humedad del 14 y 18% no hubo diferencias estadísticas entre las superficies de caucho y pvc, acero inoxidable y lona y entre lona y hierro galvanizado; en semillas con un contenido de humedad de 22% no se presentaron diferencias estadísticas entre las superficies hierro galvanizado y aglomerado de madera. Entre humedades dentro de cada superficie los resultados mostraron que las superficies de caucho y pvc, no presentaron diferencias estadísticas significativas, entre semillas con un contenido de humedad del 10 y 14% y del 18 y 22%; en las superficies de acero inoxidable, hierro galvanizado y aglomerado de madera μ_0 es estadísticamente diferente entre semillas con diferente

humedad; en la superficie de lona no se presentaron diferencias estadísticas entre las humedades del 10 y 14%.

Comparando las medias del coeficiente dinámico de fricción entre superficies para cada contenido de humedad se obtuvieron los siguientes resultados: en semillas con contenidos de humedad del 10 y 18% no se reportaron diferencias estadísticas entre las superficies de caucho y pvc; en semillas con una humedad del 14% no hubo diferencias estadísticas entre las superficies de caucho y pvc, y entre acero inoxidable y lona; en semillas con una humedad del 22%, se encontraron diferencias estadísticas entre todas las superficies evaluadas. Entre humedades dentro de cada superficie se obtuvieron los siguientes resultados: en las superficies de caucho y pvc no se encontraron diferencias estadísticas entre las semillas con humedades del 10 y 14% y entre semillas con humedades del 18 y 22%, mientras que en las superficies de acero inoxidable e hierro galvanizado los valores de μ fueron estadísticamente diferentes entre las semillas para todos los niveles de humedad; en la superficie de lona no se encontraron diferencias significativas entre las semillas con un contenido de humedad del 10 y 14%.

Las semillas con una humedad de 22%, sobre la superficie de pvc, experimentaron el mayor coeficiente estático de fricción (1,13), mientras que el mayor coeficiente dinámico de fricción (0,97), fue sobre la superficie de caucho con una humedad del 22% y los menores coeficientes de fricción estático y dinámico fueron 0,16 y 0,12, respectivamente,

obtenidos en semillas con un contenido de humedad del 10% sobre la superficie de aglomerado de madera.

Los materiales de caucho y pvc ejercen una mayor fuerza tangencial, lo cual requerirá de mayor esfuerzo en los sistemas de transporte de la semilla, siendo menos eficiente, con mayor consumo de energía y un flujo de masa unitaria reducida, mientras que los materiales de acero inoxidable, lona, hierro galvanizado y aglomerado de madera serian los materiales adecuados en los sistemas de transporte por que presentan menores fuerzas tangenciales, dando mejor eficiencia en el flujo de la masa unitaria. De otra parte para sistemas de transporte por bandas transportadoras las superficies más adecuadas son las que tienen mayor coeficiente de fricción; en este caso la superficie de caucho y p.v.c.

En la Tabla 17 se presentan las ecuaciones de regresión ajustadas a los valores experimentales de coeficiente de fricción estático y dinámico para la semilla de vitabosa, en función del contenido de humedad.

Tabla 17. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento del coeficiente de fricción de la semilla de vitabosa en función de la humedad

Variable	Superficie	Ecuación		
		$\mu = aM + b$		R^2
		a	b	
Coefficiente de fricción estático	Caucho	0,02	0,63	0,75
	PVC	0,04	0,60	0,87
	Acero inoxidable	0,02	0,04	0,95
	Lona	0,01	0,21	0,94
	Galvanizado	0,01	0,10	0,95
	Madera	0,02	0,02	0,98
Coefficiente de fricción dinámico	Caucho	0,02	0,06	0,82
	PVC	0,02	0,60	0,74
	Acero inoxidable	0,02	0,01	0,93
	Lona	0,01	0,19	0,83
	Galvanizado	0,01	0,10	0,95
	Madera	0,01	0,46	0,94

M= contenido de humedad de la semilla (% b.h.)

6.1.9 **Angulo de reposo.** En la Tabla 18 se presenta el ángulo de reposo de semillas para los diferentes contenidos de humedad. El mayor cambio en el ángulo de reposo se observó cuando las semillas pasaron de una humedad del 14 al 18%, en los intervalos de experimentación.

Tabla 18. Ángulo de reposo (θ) de la semilla de vitabosa con diferente contenido de humedad

Humedad (%)	θ (°)	Rango
10	16,90 ± 0,57 a	15,64 – 17,22
14	17,37 ± 0,86 a	15,64 – 18,26
18	21,28 ± 1,80 b	18,26 – 24,23
22	22,09 ± 1,32 b	19,80 – 24,23

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Los valores son expresados como media ± desviación estándar (n= 10)

El análisis de varianza mostró que la humedad influye significativamente en el ángulo de reposo, sin embargo el ángulo de reposo entre las semillas con una humedad del 10 y

14 % y entre la semillas con 18 y 22% de humedad, no presentó diferencias estadísticas. En investigaciones realizadas en otras semillas por Visvanatan *et al.* (1996), Bart-Plange (2003), Amin *et al.* (2004), Selvi *et al.* (2006), Coskuner y karababa (2007), Gamayak *et al.* (2008), hallaron el mismo efecto de la humedad sobre el ángulo de reposo aunque reportan valores más altos. Se podría explicar que el menor ángulo de reposo obtenido para las semillas de vitabosa se debe a sus características, como la superficie lisa de la testa, lo cual presenta menor fuerza de adhesión entre semillas y eso permite una mayor fluidez del grano. Un incremento del ángulo de reposo cuando se incrementa la humedad se debe a un incremento del área proyectada de la semilla, la cual puede incrementar la fricción interna de las semillas (Dursun y Dursun, 2005) y Pradhan (2008) manifiesta que un incremento del ángulo de reposo con la humedad se debe a una capa superficial en las semillas formando agregados de las semillas por la tensión superficial.

Los resultados indican que para el ángulo de reposo de la semilla de vitabosa en los intervalos de humedad evaluados fueron bajos, lo cual indica que la semilla presenta buena fluidez en tovas utilizadas para llenar o vaciar granos y en los sistemas de transporte por gravedad; según Carr citado por Barbosa *et al.* (2005), un ángulo de reposo cerca a 35° indica libre fluidez, 35° - 45° algo cohesivo, 45° -55° cohesivo (pérdida de libre fluidez), y mayores de 55 el flujo es limitado.

El modelo se ajustó a la relación lineal, entre ángulo de reposo y contenido de humedad de la semilla, y se expresa con la ecuación: $0,49M + 11,61$ con un coeficiente de determinación de 0,90.

6.2 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

6.2.1 **Módulo proporcional de deformabilidad.** El módulo proporcional de deformabilidad (E_p) fue menor cuando se aumentó el contenido de humedad y la deformación unitaria de la semilla de vitabosa en los tres planos de compresión. La semilla presentó mayor resistencia mecánica en el plano horizontal, para todos los contenidos de humedad y deformaciones unitarias; presentando la mayor resistencia de 3733,64 MPa, las semillas en el plano horizontal para una deformación de 2% con un contenido de humedad del 10%, y, la menor resistencia mecánica 21,11 MPa fue para las semillas en el plano longitudinal con una deformación del 4% y un contenido de humedad del 22%.

En la Tabla 19 se presentan los valores promedios con las desviaciones estándar del módulo proporcional de deformabilidad (E_p) para los cuatro contenidos de humedad evaluados, la orientación y la deformación unitaria de la semilla (porcentaje de deformación respecto a la dimensión según su orientación).

Tabla 19. Medias del módulo proporcional de deformabilidad, E_p , (MPa) de la semilla vitabosa, según el contenido de humedad, plano y deformación unitaria

CH	Deformación 2 %			Deformación 4 %		
	Longitudinal	Horizontal	Transversal	Longitudinal	Horizontal	Transversal
	Plano de la semilla					
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 ($n = 20$)

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas en la interacción de los factores: contenido de humedad, orientación y deformación unitaria. Comparando los valores medios de E_p , se obtuvieron los siguientes resultados:

Dentro de cada contenido de humedad se presentaron diferencias significativas entre los planos de orientación de la semilla y las deformaciones unitarias. Según Gupta y Das (2000) la dureza de la semilla depende de la dirección de la fuerza aplicada, debido a los arreglos de los tejidos del cotiledón, los cuales tiene un arreglo celular definido, se podría decir que las diferencias entre los tres planos es por su estructura física de la semilla.

Dentro de cada plano, en el plano longitudinal E_p fue estadísticamente diferente entre los contenidos de humedad y deformación unitaria; mientras que E_p en el plano horizontal y transversal no presentó diferencias estadísticas entre los contenidos de humedad de 18% y 22%.

Para las deformaciones unitarias de 2 y 4% los resultados obtenidos en la resistencia mecánica presentaron diferencias estadísticas, para los contenidos de humedad y los planos de orientación. Se puede inferir que al incrementar deformación de la semilla pierde resistencia mecánica por algunos cambios microestructurales de los tejidos de la semilla.

El módulo proporcional de deformabilidad de la semilla de vitabosa 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.* (2007) y por Couto, (2001) en frutos de café.

La Tabla 20 presenta las ecuaciones de regresión ajustadas a los valores experimentales del módulo proporcional de deformabilidad de la semilla de vitabosa, en función al contenido de humedad y deformación para cada plano de compresión.

Tabla 20. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento del módulo proporcional de deformabilidad en función al contenido de humedad para los diferentes planos de la semilla de vitabosa

Plano	Deformación (%)	Ecuación				R ²
		$E_p = aM^3 + bM^2 + cM + d$				
		a	b	c	d	
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)

6.2.2 Deformación en el punto de ruptura. La humedad y la orientación de la semilla influyeron significativamente sobre la deformación en el punto de ruptura de la semilla.

Según el análisis de varianza, la humedad y la orientación influyen significativamente sobre la deformación de la semilla. Comparando las medias, la deformación de la semilla no fue influenciada significativamente a contenidos de humedad por encima del 14%. Las deformaciones en cada nivel de humedad fueron estadísticamente diferentes con respecto al plano de orientación de la semilla.

La Tabla 21 muestra los promedios de las deformaciones de las semillas con respecto al factor humedad y orientación, donde la deformación en el punto de ruptura se incrementó cuando aumentó el contenido de humedad en cada plano de orientación de la semilla; presentando la menor deformación en las semillas con un contenido de humedad del 10%

en el plano horizontal. Una mayor deformación se presentó en las semillas con un contenido de humedad del 22% en el plano longitudinal. Las semillas pierden sus propiedades de fracturabilidad con la humedad, donde requiere una mayor deformación para lograr fracturarse. La deformación no cambia significativamente cuando las semillas tienen altos contenidos de humedad, esto se presentó debido a que las semillas con contenidos de humedad del 10% y 14% la fractura se detectó fácilmente, pero en las semillas con contenidos de humedad del 18 y 22% la fractura se debió a un rompimiento de la testa.

Tabla 21. Deformación de la semilla de vitabosa hasta el punto de ruptura con diferente contenido de humedad y plano de orientación

Humedad	Deformación en punto de ruptura (mm)		
	Horizontal	Longitudinal	Transversal
10	1,0 ± 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 \pm desviación estándar ($n = 20$)

La deformación se incrementó significativamente entre el intervalo de humedad 10 al 14%; por encima de este intervalo la deformación se incrementó levemente; esto se debe posiblemente a que el punto de ruptura de las semillas por encima del 14% de humedad es poco perceptible e incluso no se observa por que la textura de la semilla cuando se incrementa la humedad tiende a ser plástica (viscoelástica), 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.

Las semillas de vitabosa con un contenido de humedad mayor al 14% pierden sus características de fragilidad, son más flexibles y esto hace que disminuya su fracturabilidad. Esta característica indicaría una menor eficiencia en los procesos de molienda o reducción de tamaño de partícula.

6.2.3 Fuerza de ruptura. El análisis de varianza presentó diferencias estadísticas significativas de la fuerza de ruptura para los contenidos de humedad y planos de orientación de la semilla.

En la Tabla 22 se muestra el efecto del contenido de humedad sobre la fuerza de ruptura y la energía absorbida en los tres planos de la semilla. La fuerza de ruptura (N) disminuyó cuando se incrementó la humedad en el plano longitudinal y transversal, siendo mayor en las semillas con un contenido de humedad del 10% y menor en las semillas con el 22% de humedad; mientras en el plano horizontal la fuerza de ruptura fue mayor en la humedad 14 % y fue menor para las semillas con un 22% de humedad. La fuerza de ruptura fue mayor en el plano horizontal que los demás planos para todos los niveles de humedad. Similar tendencia fue reportada por otros autores: Paulen (1978) en semillas de soya, Gupta y Das (2000) en girasol, Baumler *et al.* (2006) en safflower y en haba. Altuntas y Yildiz (2007) Estos últimos manifiestan que un intempestivo cambio de la tendencia de la fuerza de

ruptura las semillas absorben cierta cantidad de agua que llene los espacios internos de esto hace que el interior de la semilla llene los espacios en el interior de la semilla, volviéndose estructuralmente mas turgente y esto resulta un incremento de la fuerza de ruptura.

Se observó que el plano de aplicación de la fuerza influye significativamente dentro de cada contenido de humedad, presentando un mayor valor el plano horizontal con una fuerza de ruptura de 1960,46 N y un menor valor en el plano longitudinal con 214,13 N, para los contenidos de humedad de 14% y 22%, respectivamente. El contenido de humedad afectó significativamente dentro de cada plano de orientación, excepto en el plano longitudinal donde no se presentaron diferencias estadísticas entre los contenidos de humedad del 10 y 14%. De hecho Gupta y Das (2000), dicen que cuando se aplica a la semilla una fuerza externamente crea un esfuerzo en los tejidos internos del cotiledón causando ruptura del cotiledón, y esta fuerza depende de la dirección de la fuerza aplicada por que los tejidos del cotiledón tienen un arreglo celular definido. Según Saiedirad *et al.* (2008) dice; que la fuerza necesaria para fracturar la semilla depende del área donde se aplica la fuerza; a menor área menor fuerza requerida.

Según los resultados se evidencia un cambio brusco en las propiedades mecánicas de la semilla cuando los contenidos de humedad superan el 14%; se vuelve flexible y difícil de fracturar; la fractura fue levemente perceptible, precedida por una deformación plástica similar resultado encontró Lysiak y Laskowski (2004), en semillas de haba, donde menciona que 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.

Tabla 22. Fuerza de ruptura y energía absorbida de la semilla de vitabosa con diferente contenido de humedad y plano de orientación

H	Plano de orientación de la semilla					
	Fuerza de ruptura (N)			Energía absorbida (J)		
	Longitudinal	Horizontal	Transversal	Longitudinal	Horizontal	Transversal
10	592,64 ± 68,18 a	1328,51 ± 183,63 d	824,33 ± 78,17 h	0,41 ± 0,09 a	0,69 ± 0,29 d	0,34 ± 0,03 f
14	567,37 ± 52,66 a	1960,46 ± 228,75 e	645,76 ± 66,57 i	2,14 ± 0,42 b	2,76 ± 0,77 e	1,23 ± 0,39 g
18	363,82 ± 49,57 b	732,41 ± 129,22 f	384,23 ± 34,88 j	1,25 ± 0,24 c	0,87 ± 0,15 d	0,76 ± 0,10 h
22	214,13 ± 32,92 c	525,45 ± 89,27 g	319,14 ± 33,83 k	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)

Comparando la fuerza de ruptura de la semilla de vitabosa con la de semillas de haba reportada 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 de la semilla, según Stenvert y Kingswood, citado por Glenn y Sauders (1989), la dureza de un grano está relacionada con un alto contenido de proteína y el grado de adhesión de la matrix de la proteína con el almidón.

6.2.4 Energía absorbida. 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 todas las

posiciones de la semilla. Igual tendencia encontró Paulen (1978) y Lysiak y Laskowski (2004), en semillas de soya y haba, respectivamente.

Las semillas de vitabosa con una humedad inicial 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- 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%.

El mayor valor de energía absorbida (2,76 J) fue para las semillas en el plano horizontal con un contenido de humedad del 14 % y los valores más bajos fueron para las semillas en los planos transversal y longitudinal corresponde a 0,34 J y 0,41 J, respectivamente con un contenido de humedad del 10%, debido a que la semilla de vitabosa con contenidos de humedad bajos es más fracturable.

El efecto del plano de orientación de la semilla sobre la fuerza de ruptura y energía absorbida lo explica Saiedirad *et al.* (2008), Quienes dicen que la fuerza de ruptura y 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. Un caso particular se observó en la semilla de vitabosa donde la energía absorbida fue menor en el plano transversal, la cual tuvo un comportamiento elástico.

Según Mohsenin (1986) un incremento de la energía absorbida es un indicador de resistencia a la ruptura de la semilla mas 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 23 se presentan las ecuaciones de regresión ajustadas a los valores experimentales de la fuerza de ruptura, deformación y energía absorbida de la semilla de vitabosa, en función al contenido de humedad para cada plano de compresión.

Tabla 23. Ecuaciones ajustadas para expresar el comportamiento de la fuerza de ruptura, deformación en el punto de ruptura y energía absorbida en función al contenido de humedad para los diferentes planos de la semilla de vitabosa

Variable	Plano	Ecuación				R ²
		$D = aM^3 + bM^2 + cM + d$				
		a	b	c	d	
Fuerza ruptura	L	-	-	-33,47	970,10	0,93
	H	7,5	-373,20	5844	-27296	0,97
	T	-	-	-44,42	1254	0,96
Deformación ruptura	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	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

6.2.5 Consumo de energía de molienda. El consumo de energía específica, CEE, kJ/kg en el proceso de molienda se incrementó cuando se aumenta el contenido de humedad de la semilla, lo anterior es debido probablemente que cuando se incrementa la humedad las semillas se vuelven flácidas y difícil de fracturar.

El análisis de varianza reportó que la humedad influye significativamente en el consumo de energía en el proceso de molienda la semilla de vitabosa. El consumo de energía del molino 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, 2005 y 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 en 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.

En la Tabla 24 se presentan las medias de la energía específica consumida en los diferentes niveles de humedad. Para los contenidos de humedad del 10 y 14% el CEE no 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 obtenidos con vitabosa.

Tabla 24. Energía específica consumida en molienda para diferentes niveles de humedad durante 10 segundos

Humedad	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)

Según los resultados obtenidos las semillas con humedades entre el 10 y 14% presentaron un menor consumo de energía; traduciendo a un mejor desempeño del molino, al respecto

Laskowski y Dziki (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 se transfiere a la eficiencia en el proceso de molienda, por lo tanto las semillas de vitabosa que superen contenidos de humedad del 14% presentarán mayor consumo de energía; incrementando el costo económico del proceso.

La variación del consumo de energía específica por efecto del contenido de humedad de la semilla en el proceso de molienda se ajustó a la siguiente ecuación de regresión lineal:

$CEE = 3,76M + 61,88$, con un coeficiente de determinación de 0,92.

7. CONCLUSIONES

El contenido de humedad afectó significativamente las propiedades físico-mecánicas de la semilla de vitabosa. El tamaño, masa, área superficial, área proyectada, porosidad, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático y dinámico, y el consumo de energía específica en el proceso de molienda se incrementan con el contenido de humedad, mientras que la densidad aparente, densidad a granel, fuerza de ruptura y el módulo proporcional de deformabilidad disminuyen cuando se incrementa el contenido de humedad.

La humedad afecta de forma diferente las propiedades físicas y mecánicas, los valores encontrados pueden ser utilizados para el diseño de equipos de procesamiento industrial como también para el control de calidad de la semilla.

Otros factores como la orientación de la semilla afectan algunas propiedades físicas y mecánicas.

Las metodologías desarrolladas permitieron determinar el comportamiento físico – mecánico con la humedad, que pueden ser utilizadas para el estudio de otras semillas.

Las diferencias en las propiedades físico-mecánicas debidas a la humedad sugieren cambios en la estructura de la semilla.

El método de análisis de imagen sirve para determinar con gran exactitud las dimensiones ortogonales de la semilla de vitabosa.

8. RECOMENDACIONES

Con los resultados obtenidos en esta investigación se dan a conocer las características físicas - mecánicas de la semilla de vitabosa en el intervalo de humedad del 10 al 22% que pueden llegar a representar el agua contenida en los diferentes etapas del proceso (recolección, clasificación, deshidratación e hidratación, almacenaje y molienda); de esta manera se puede aportar al diseño de equipos y maquinaria necesarios en los procesos de transformación de la semilla.

Comparar las características físico-mecánicas de la semilla de vitabosa con respecto a diferentes condiciones de manejo agronómico (fertilización, distancias de siembra, épocas de siembra).

Evaluar el consumo de energía en los procesos de molienda con diferentes aberturas del tamiz del molino, en el intervalo de humedad del 10 -14%, para seleccionar el mejor comportamiento mecánico de la semilla de vitabosa.

9. BIBLIOGRAFÍA

ABALONE, R., CASSINERA, A., GASTON, A., y LARA, M. A. Some physical properties of amaranth seeds. *Biosystems Engineering* 2004; 89(1):109–117.

ALTUNTAS, Ebubekir y YILDIZ, Mehmet. Effect of moisture content on some physical and mechanical Properties of faba bean (*Vicia faba* L.) grains. *Journal of Food Engineering* 2007; 78: 174–183.

ALTUNTAS, Ebubekir; OZGOZ, Engin y TASER, Faruk O. Some physical properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) seeds. *Journal of Food Engineering* 2005; 71:37–43.

ALVARADO, J.D. Y AGUILERA J.M. Metodos para medir propiedades físicas en la industria de alimentos. España: Acribia 2001.pp. 136-138.

ANAGO, S.A.; OUEDRAOGO G.A. y LEDIN I. Effect of partly replacing cottonseed cake with *Mucuna spp.*(Var.Ghana) hay on feed intake and digestibility, milk yield and milk composition of zebu cows. *Tropical Animal Health and production* 2006; 38: 563-570.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERING (ASABE). Standards engineering practices data. 53 rd Ed. EEUU: 2006: 950 p.

AMIN M.N., HOSSAIN, M.A., ROY K.C. Effects of moisture content on some physical properties of lentil seeds. Journal of Food Engineering 2004; 65: 83–87.

ANAGO Sidibe, G.A.; OUEDRAOGO, G.A. y LEDIN I. Effect of partly replacing cottonseed cake with Mucuna spp. (var. Ghana) hay on feed intake and digestibility, milk yield and milk composition of Zebu cows. (artículo de internet) <http://www.springerlink.com/content/90x3tt6q5p160145/> (consulta: 14 abril de 2008).

ANDI. Comunicado de prensa Insumos no paran de subir 22 de febrero de 2008, (sitio en internet): <http://www.andi.com.co/camaras/balanceados/index.asp>. Acceso 13 abril 2008.

ANDREJKO, Dariusz y GROCHOWICZ, Jozef. Effect of the moisture content on compression energy and strength characteristic of lupine briquettes. Journal of Food Engineering 2007; 83: 116–120.

AVIARA, N.A., GWANDZANG, M.N., HAQUE, M.A. Physical properties of guna seed. Journal Agriculture Engineering 1999; 73: 105-111.

AYDIN, C. Some engineering properties of peanut and kernel. Journal of Food Engineering 2007; 79 (3): 810-816.

BALASUBRAMANIAN D. Physical Properties of Raw Cashew Nut. Journal of Agricultural Engineering research 2001; 78 (3): 291-297.

BARBOSA G., ORTEGA E., JULIANO P., YAN H. Food powders, Physical properties, Processing and Functionality. Food Engineering Series; Klumer Academic, New York, 2005; pp. 55-88.

BARGALE, Praven; IRUDAYARAJ, Joseph Y MARQUIS Bruno. Studies on rheological behaviour of canola and wheat. Journal Agriculture Engineering 1995; 61: 267-274.

BART-PLANGE, Ato Y BARYEH y Edward A. The physical properties of Category B cocoa beans. Journal of Food Engineering 2003; 60: 219-227.

BARYEH, E. A. Physical properties of millet. Journal of food Engineering 2002; 51 (1): 39 - 46.

BAUMLER, Erica; CUNIBERTI, Adela; NOLASCO, Susana y RICCOBENE Isabel. Moisture dependent physical and compression properties of safflower seed. *Journal of Food Engineering* 2006; 72: 134-140.

BUCKLES, Daniel; TRIOMPHE, Bernard Y SAIN, Gustavo. Los cultivos de cobertura en la agricultura en laderas: Innovación de los agricultores con *Mucuna* IDRC, Ottawa, Canada y CIMMYT, Mexico.(online), enero 1998 (citada enero 1999), disponible en: http://www.idrc.ca/es/ev-31738-201-1-DO_TOPIC.html.

BULENT ALI, Koc. Determination of watermelon volumen using ellipsoid approximation and image processing. *Post harvest Biology and Technology* 2007:1-6.

CAMARA A.; TOUPOU K.; DIALLO D. Y BERHE T. Studies on *Mucuna* as poultry and pig feed in the Republic of Guinea *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 2003; 1: 247–251.

CAREW L.B. y GERNAT A.G. Use of velvet beans, *Mucuna* spp., as a feed ingredient for poultry. *World's Poultry Science Journal*. (2006); 62:131-143.

CASTRO Quintero, Gilberto. Propiedades físicas de los productos vegetales, su sentido físico y aplicaciones Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias agropecuarias. Medellín: 1996. 103 p.

CETIN, Mustafa. Physical properties of barbunia bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Barbunia') seed. *Journal of Food Engineering* 2007; 80: 353–358.

CHAPARRO Acuña, Sandra Patricia. Efecto de diferentes procesos fisico-químicos en la reducción de factores antinutricionales de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*). Tesis de grado para optar el título de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Nacional, sede Medellín. 2009. 67p.

CHUNG Do Sup y HO LEE Chong. Physical and thermal properties of grains. En: *Preserving grain quality by aeration and in-store drying*. ACIAR, Malaysia. 1985. pp53-62.

CORREA, Paulo C.; RESENDE, Osvaldo; MENEZES, RIBEIRO, Deise; JARÉN, Carmen y ARAZURI, Silvia. Resistance of edible beans to compression. *Journal of Food Engineering*. 2007: 9-21.

COSKUN, Bulent M.; YALCIN, Ibrahim y OZARSLAN, Cengiz. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.) *Journal of Food Engineering* 2006; 74: 523–528.

COSKUNER Yalcin y KARABABA Ersan. Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.) *Journal of Food Engineering* 2007; 80: 408–416.

COUTO, S.A., BATISTA,C.S., PEIXOTO, A.B. Y DAVILLA, I.A. Comportamento mecánico de frutos de café: módulo de deformidade, Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental, 2002; 6 (2): 285- 294.

DEL CARMEN J.; GERNAT A G.; MYHRMAN R, y CAREW L. B. Evaluation of Raw and Heated Velvet Beans (*Mucuna pruriens*) as Feed Ingredients for Broilers. Poultry Science 1999; 78:866–872

DOMÍNGUEZ, Juan Carlos. En bolsas de granos y en el mercado mundial, los cereales jalonan los precios al alza. En: Tierras y ganado, El Tiempo, Bogotá:(15, feb., 2008).

DUKE *et al.* *Mucuna* sp. En : Handbook of Legumes of World Economic Importance 1981; pp.170-173. Citado por:TREJO LIZAMA WILBERT. Strategies to improve the use of limited nutrient resources in pig production in the tropics. En: Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics supplement 85, citado 2005.(sitio en internet), disponible <http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-1874.volltext.frei.pdf>. Acceso 10 de abril del 2008.

DURSUN, I. y DURSUN, E. Some Physical Properties of Caper Seed. Biosystems Engineering 2005; 92 (2):237–245.

DURSUN, I.; TUGRUL, K.M. y DURSUN, E. Some physical properties of sugarbeet seed. *Journal of Stored Products Research* 2007; 43: 149–155

DUTTA, S. k., NEMA, V.K., y BHARDWAJ, R.K. Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1988. 39, 259-268.

DZIKI D., Dairiusz. The crushing of wheat kernels and its consequence on the grinding process. *Powder Technology*. 2007:1–6.

DZIKI D., Dairiusz y LASKOWSKI, Janusz. Influence of selected factors on wheat grinding energy requirements. *TEKA*. 2005; 5: 56–64. (Sitio en internet), <http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/TMot5/Dziki.pdf>. Acceso 22 de abril de 2008.

ECHEVERRY C., RODRIGUEZ H. La vitabosa (*Mucuna deeringiana*), una alternativa para el mejoramiento de suelos y control de malezas. SENA Rionegro, 1997; 37 p.

EILITTA M. *Mucuna* as a Food and Feed: Selected Bibliography, (sitio en internet) www.cidicco.hn/newcidiccoenglish/mucuna_bibliography.htm. (2004). Acceso octubre 25 de 2007.

FAO, Ecoport The consilience engineering. (Sitio en internet). <http://ecoport.org/ep?searchType=begin&entity=mucuna>. Acceso 20 de abril de 2008.

FAO. Sistema de información de los recursos del pienso. (sitio en internet), <http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/afris/es/Data/266.HTM> Acceso 14 de abril de 2008.

GARNAYAK, D.K., PRADHAN R.C., Naik, S.N. y BHATNAGAR N. Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.). industrial crops and products 2008; 2 7: 123–129.

GLENN, G.M. y SAUDERS, R.M. Physical and structural properties of wheat endosperm associated with grain texture. Cereal Chemical 1989; 67 (2): 176-182.

GUIZO BERMUDEZ, Samuel. Instalaciones eléctricas. Universidad Nacional de Colombia,. Facultad de Arquitectura. Departamento de construcción. Medellín: 1977; P. 5-25.

GUPTA, R.K. y DAS, S.K. Fracture resistance of sunflower and kernel to compressive loading. Journal food engineering 2000; 46:1-8.

----- Physical properties of sunflower seeds. Journal agricultural and food Engineering 1997; 66: 1- 8.

HADDAD, Y.; MABILLE, F.; MERMET, A.; ABECASSIS, J. y BENET, J.C. Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding Behaviour. Powder Technology 1999; 105:89–94.

HENRY, Zachary A.; SU, BAOYI y ZHANG, Haibing. Resistance of Soya Beans to Compression. Journal Agriculture Engineering 2000; 76: 175-181.

ISIK E. y UNAL H (2007). Moisture- dependent physical properties of white speckled red kidney beans grains. Journal of Food Engineering 2007; 82 (2) : 209- 216.

IYAYI, E. A., TAIWO, V. O. The effect of diets incorporating *Mucuna (Mucuna pruriens)* seed meal on the performance of laying hens and broilers Ibadan, Nigeria. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 2003 ; 1 (2/3): 239-246.

JAIN, R.K., Y BAL, S. physical properties of pearl millet. Journal of Agricultural Engineering Research 1997; 66: 85-91.

JHA, S N. Physical and hygroscopic properties makhana. Journal of Agricultural Engineering Research 1999; 72 (2):145–150.

JOSHI, D.C.; DAS, S.K. y MUKHERJI, R.K. Physical properties of pumpkin seeds. Journal of Agricultural Engineering Research. 1993; 54: 219-229.

KANG, Y.S.; SPILLMAN, C.K y CHUNG, D.S. Mechanical properties of wheat. *Transaction of ASAE*. 1995; 38(2):573-578.

KARABABA, Ersan. Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering* 2006; 72:100–107.

KILICKAN, A. y GUNER M. Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (*Olea europaea L.*) under compression loading. *Journal of Food Engineering* 2008; 8: 222–228.

KOC, A. B. Determination of watermelon volume using ellipsoid approximation and image processing. *Postharvest Biology and Technology* 2007: 1-6.

LASKOWSKI, Janusz y LYSIAK Grzegorz. Use of compression behavior of legume seeds in view of impact grinding prediction. *Powder Technology* 1999; 105: 83–88.

LASKOWSKI, Janusz y SKONECKI, S. Influence of moisture on the physical properties and parameters of the compression process of legumes' seeds. *Agrophysics* 1997; 11: 245- 256.

LASKOWSKI, J.; SKONECKI, S. y LYSIAK, G. Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Institute of Agrophysics Poland. 2005, (sitio en internet) http://www.ipan.lublin.pl/mat_coe/mat_coe24.pdf. Acceso febrero 10 de 2008.

LEWICKI, PIOTR P. Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering*. 2004;61: 483–495.

LYSIAK, G.; LASKOWSKI, J. Investigation of mechanical properties of faba bean for grinding behavior prediction. *Acta Agrophysica* 2004; 4 (3): 753-762.

MAASDORP, B.; JIRI, O. y TEMBA, E. Contrasting adoption, management, productivity and utilization of *Mucuna* in two different smallholder farming systems in Zimbabwe. En: Whitbread, A.M. y Pengelly, B.C. *Tropical legumes for sustainable farming systems in southern Africa and Australia*. Australia: ACIAR. (en internet). 2004, P.155-163. <http://www.aciar.gov.au/publication/PR115>. ISSN. 1- 86320- 420- 2.

MATENGA, V.R., NGONGONI, N.T.; TITTERTON M. Y MAASDORP B.V. *Mucuna* seed as a feed ingredient for small ruminants and effect of ensiling on its nutritive value. *Tropical and Subtropical Agro ecosystems*. 2003; 1: 97-105.

MOHSENIN, Nuri N. Physical properties of food and agricultural materials, A Teaching Manual New York; 1886: P. 147.

----- . Physical properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York; 1970.

MULLER H.G. An introduction to food rheology. Traducido al Español: Burgos Justino Gonzáles. España: ACRIBIA; 1978; P.15-41.

MURTHY, C. T. y Suwendu Bhattacharya. Moisture Dependant Physical and Uniaxial Compression Properties of Black Pepper. Journal of Food Engineering 1998; 37:193-205.

MWITHIGA, Gikuru y SIFUNA, Masika Mark. Effect of moisture content on the physical properties of three varieties of sorghum seeds .Journal of Food Engineering 2006; 75: 480–486.

NIMKAR, P.M.; MANDWE, DIPALI S. y DUDHE, RENU M. Physical Properties of Moth Gram Biosystems Engineering 2005; 91 (2):183–189.

NORTHOFF, Erwin. Necesarias medidas urgentes para atenuar el impacto del alza de precios alimentarios en los pobres: FAO, Roma, abril 9 del 2008 (sitio en internet),

<http://www.fao.org/newsroom/es/news/2008/1000823/index.html>. Acceso 14 de abril de 2008.

OGUT, H. Some Physical Properties of White Lupin. *Journal Agricultural engineering* 1998; 69 : 273-277.

OLAJIDE, J. D. y ADE-OMOWAYE, B. I. O. Some physical properties of locust bean seed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999; 74(2): 213–215.

OSPINA MACHADO, Julio Ernesto. Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrícolas. Departamento de Ingeniería Agrícola Bogotá: 2001; P. 225.

PAULSEN, Marvin. Fracture resistense of soybeans to compresive loading. *Transactions ASAE* 1978; 2-7.

PRADHAN, R.C.; NAIK, S.N.; BHATNAGAR, N. and SWAIN, S.K. Moisture-dependent physical properties of Karanja (*Pongamia pinnata*) kernel. *Industrial Crops and Products*, 2008; 28(2):155-161.

PUGALENTHM, I.; VADIVEL, V. y SIDDHURAJU, P. Alternative Food/Feed Perspectives of an Underutilized Legume *Mucuna pruriens* var. *Utilis*—A Review. *Plant Foods for Human Nutrition* 2005; 60: 201–218.

RAJESHWAR, Yerra; GUPTA, Malaya y MAZUMDER, Upal K. *In Vitro* Lipid Peroxidation and Antimicrobial Activity of *Mucuna pruriens* Seeds (en internet). 2005; 4 (1):32-35 <http://ijpt.iuims.ac.ir>.ISSN 1735-2657.

RUIZ, Altisent. Propiedades físicas de productos agrícolas. Documento fotocopia. 2000: P. 2-22.

SAHOO. P. K. Y SRIVASTAVA, A.P. Physical Properties of Okra Seed. *Biosystems Engineering* 2002; 83(4), 441–448.

SAIEDIRAD, M.H *et al.* 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* 2008; 86: 565–572.

SATHIYANARAYANAN, L Y ARULMOZHIS. *Mucuna pruriens* Linn.-A Comprehensive Review *Pharmacognosy Review*. Jan- May, 2007; 1(1):1-6.

SELVI, Cagatay Kemal; PINAR Yunus y YESILOGLU, Elcin. Some Physical Properties of Linseed. *Biosystems Engineering* 2006; 95 (4), 607–612.

SHARMA Shri K; MULVANEY, Stevenj Y RIZVI, Syed S.H. *Ingeniería de alimentos*. México: Limusa; 2003: 20-44.

SINGH K. K. y GOSWAMI, T. K. Physical Properties of Cumin Seed. *Journal of Agricultural Engineering research*. 1996; 64, 93 – 98.

STROSHINE, Richard y HAMANN, Donald. Physical properties of agricultural materials and food products. Department of Food Science, North California State University 1993; 82-112.

SZABO, N. Memorias. Química y toxicidad del Mucuna. (Sitio en internet). Febrero 6 de 2000 .Disponible en <http://www.cidicco.hn/memoriamicuna.htm>. Acceso el 3 de marzo de 2008.

TEIXEIRA, A.A.; RICH, E.C. Y SZABO N.J. Water extraction of L-DOPA from *Mucuna* Bean. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 2003;1: 159 – 171.

TROPICAL FORAGES. An interactive selection tool. (sitio en internet) disponible en http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Mucuna_purriens.htm. Acceso el 3 de marzo de 2008.

UKACHUKWU. S.N. Optimum inclusion and replacement value of boiled *Mucuna cochinchinensis* for soybean meal in broiler diets. *Australian Journal of Experimental Agriculture* (en internet), 2007; 47(6) 672–676. <http://www.publish.csiro.au/paper/EA04184.htm>. Acceso 22 de abril de 2008.

UKACHUKWU, S.N. Y SZABO, N.J. Effect of processing, additives and vitamin b6 supplementation of *Mucuna pruriens* var *cochinchinensis* on broilers. *Tropical and Subtropical Agro ecosystems*. 2003; 1: 227 – 237.

VARNAMKHASTI, Ghasemi M. *et al.* Some physical properties of rough rice (*Oryza Sativa* L.) grain. *Journal of Cereal Science*.2007: 1-6.

VADIVEL V. y JANARDHANAN K. Nutritional and Antinutritional Characteristics of Seven South Indian Wild Legumes. *Plant Foods for Human Nutrition* .2005; 60: 69–75.

VILCHE, C.; GELY, M. y SANTALLA, E. Physical Properties of Quinoa Seeds. *Biosystems Engineering* 2003; 86 (1): 59–65.

VILLAMIZAR, F., et al. Inventario de las investigaciones realizadas en poscosecha de productos agrícolas en la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Grupo de poscosecha. Bogotá, 2004; 317 p.

VISVANATHAN, R.; PALANISAMY, P.T.; GOTHANDAPANI, L. y SREENARAYANAN, V. Physical Properties of Neem Nut. Journal of Agricultural Engineering research. 1996; 63:19 – 26.

VURSAVUS, K. y OZGUVEN, F. Fracture Resistance of Pine Nut to Compressive Loading. Biosystems Engineering 2005; 90 (2):185–191.

----- Mechanical behaviour of apricot pit under compression loading. Journal of Food Engineering, 2004; 65:255–261.

WALTHER P., Feistritzer. Manual de la producción, control de calidad y distribución de semilla de cereales: FAO. Roma, 1977; 89 p.

WUEST, Stewart. Vapour is the principal source of water imbibed by seeds in unsaturated soils. Journals cambridge.org, Seed Science Research (2007) 17, 3–9

WUEST, S.B., Albrecht, S.L. and Skirvin, K.W. Vapor transport vs. seed–soil contact in wheat germination. Agronomy Journal 1999; 91: 783–787. (en internet) <http://agron.scijournals.org/cgi/reprint91/5/783>. Acseo 25 de abril de 2009.

10. ANEXOS

ANEXO A. Anova: longitud de la semilla en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	37.0480521	12.3493507	28.70	<.0001
Error	316	135.9761327	0.4303042		
Corrected Total	319	173.0241848			

ANEXO B. Anova: ancho de la semilla en diferentes humedades

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	16.07625844	5.35875281	80.80	<.0001
Error	316	20.95802625	0.06632287		
Corrected Total	319	37.03428469			

ANEXO C Anova: espesor de la semilla en diferentes humedades

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	11.15844484	3.71948161	40.37	<.0001
Error	316	29.11207855	0.09212683		
Corrected Total	319	40.27052339			

ANEXO D Anova: diámetro medio aritmético de la semilla en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	19.95	6.65	67.92	<.0001
Error	316	30.93	0.10		
Corrected Total	319	50.88			

ANEXO E. Anova: diámetro medio geométrico de la semilla en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	18.92	6.31	78.78	<.0001
Error	316	25.30	0.08		
Corrected Total	319	44.22			

ANEXO F. Anova: longitud, interacción método vs humedad.

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	85.10351802	28.36783934	64.64	<.0001
Metodo	1	0.20313376	0.20313376	0.46	0.4965
Humedad*Metodo	3	0.57085252	0.19028417	0.43	0.7290

ANEXO G Anova: ancho, interacción método vs humedad.

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	42.50271125	14.16757042	193.89	<.0001
Metodo	1	0.56050562	0.56050562	7.67	0.0058
Humedad*Metodo	3	0.74660312	0.24886771	3.41	0.0174

ANEXO H Anova: espesor, interacción método vs humedad.

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	20.55607267	6.85202422	82.94	<.0001
Metodo	1	0.97926750	0.97926750	11.85	0.0006
Humedad*Metodo	3	1.02402362	0.34134121	4.13	0.0065

ANEXO I. Anova: esfericidad de la semilla en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	0.001	0.00031	1.12	0.34
Error	316	0.086	0.00027		
Corrected Total	319	0.087			

ANEXO J. Anova: área superficial de la semilla en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	98106.56	32702.19	77.11	<.0001
Error	316	134015.19	424.10		
Corrected Total	319	232121.75			

ANEXO K. Anova: Área proyectada, interacción humedad vs plano de orientación de la semilla.

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	18436.357	6145.452	141.56	<.0001
Posicion	2	1224908.194	612454.097	14107.4	<.0001
Posicion*Humedad	6	5478.799	913.133	21.03	<.0001

ANEXO L. Anova: masa de mil semillas en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	26845.15681	8948.38560	41.54	<.0001
Error	8	1723.33773	215.41722		
Corrected Total	11	28568.49454			

ANEXO M. Anova: densidad real en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	0.00612845	0.00204282	6.37	0.0014
Error	36	0.01155031	0.00032084		
Corrected Total	39	0.01767876			

ANEXO N. Anova: densidad aparente en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	0.02241311	0.00747104	92.42	<.0001
Error	36	0.00291008	0.00008084		
Corrected Total	39	0.02532319			

ANEXO Ñ. Anova: Porosidad en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	57.0225181	19.0075060	13.65	<.0001
Error	36	50.1210200	1.3922506		
Corrected Total	39	107.1435381			

ANEXO O. Anova: Coeficiente de fricción estático, interacción humedad vs posición.

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	1.69521611	0.56507204	444.27	<.0001
Superficie	5	21.27143027	4.25428605	3344.82	<.0001
Superficie*Humedad	15	0.21033088	0.01402206	11.02	<.0001

ANEXO P. Anova: coeficiente de fricción dinámico, interacción humedad vs posición.

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	0.92496554	0.30832185	410.39	<.0001
Superficie	5	19.48495473	3.89699095	5187.02	<.0001
Superficie*Humedad	15	0.24256375	0.01617092	21.52	<.0001

ANEXO Q. Anova: Angulo de reposo en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	210.9315275	70.3105092	46.54	<.0001
Error	36	54.3867700	1.5107436		
Corrected Total	39	265.3182975			

ANEXO R. Anova: módulo de deformabilidad, interacción humedad vs posición vs deformación.

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	146695648.9	48898549.6	801.68	<.0001
Posición	2	26239799.0	13119899.5	215.10	<.0001
deformación	1	29628307.6	29628307.6	485.75	<.0001
Humedad*Posicion	6	49892870.2	8315478.4	136.33	<.0001
Humedad*deformación	3	33481814.6	11160604.9	182.98	<.0001
Posicion*deformación	2	5982790.2	2991395.1	49.04	<.0001
Humeda*Posici*deform	6	11377815.6	1896302.6	31.09	<.0001

ANEXO S. . Anova: deformación en el punto de ruptura, interacción humedad vs plano de orientación de la semilla.

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	547.5353852	182.5117951	1353.96	<.0001
Posicion	2	404.9729967	202.4864983	1502.14	<.0001
Humedad*Posición	6	93.7615036	15.6269173	115.93	<.0001

ANEXO T. ANOVA: fuerza de ruptura interacción humedad vs posición

Source	DF	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	6747758.79	601.67	<.0001
Posicion	2	11426949.04	1018.89	<.0001
Humedad*Posicion	6	1671758.73	149.06	<.0001

ANEXO U. ANOVA: energía absorbida, interacción humedad vs posición

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Humedad	3	90.56	30.19	313.32	<.0001
Posicion	2	9.86	4.93	51.19	<.0001
Humedad*Posición	6	18.05	3.01	31.23	<.0001

ANEXO V. ANOVA: energía de molienda en diferentes humedades.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	22052.81975	7350.93992	64.03	<.0001
Error	68	7807.11131	114.81046		
Corrected Total	71	29859.93106			

