

Determinación de Algunas Propiedades Físicas y Mecánicas de la Panela Granulada

Blanca L. Fajardo N.*, Diana P. Molina D.**, Julio E. Ospina M.***, Hugo R. García B.****,

RESUMEN

La caracterización de las propiedades mecánicas, nutricionales y organolépticas de la nueva presentación de la panela, conocida como panela granulada, es importante en la adaptación de equipos y procesos productivos para incrementar en forma significativa las formulaciones alimentarias y los productos industriales donde se utilice ésta como materia prima y para ofrecer parámetros y recomendaciones para el consumidor en el nivel doméstico.

El objetivo del presente estudio fue la determinación de las propiedades físicas y mecánicas más importantes de la panela granulada [3]. Los resultados promedio fueron:

***Contenido de humedad: 2,33 % (b.h.); densidad real: 1,48 g/cm³; densidad aparente: 0,67 g/cm³; porosidad: 0,54 (dec); diámetro medio de partícula: 0,97 mm; ángulo de reposo: 47 °.**

***Color: los cinco colores predominantes en orden de importancia fueron: amarillo ocre, cobre, ocre tostado, sienna y naranja mineral.**

***Pérdida de carga : en los tamaños de partícula en estudio se encontraron las siguientes ecuaciones :**

$$\text{Tamiz 2,5 mm : } Q/A = 19,12 * (\Delta P/L)^{0,37}$$

$$\text{Tamiz 1 mm : } Q/A = 0,02 * (\Delta P/L)^{1,35}$$

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país panelero. De las 424.000 ha. sembradas en caña, 246.000 corresponden a la producción de panela; de los 1.024 municipios que existen en el país, en 236 de ellos se cultiva la caña para panela. De lo anterior se desprende que este sector tenga una participación bastante significativa en el PIB agrícola (5,8%) y sea una de las principales fuentes de empleo rural (12,3%) [4,5,11].

La panela se define como un producto sólido obtenido por la evaporación de los jugos clarificados de la caña de azúcar y se presenta generalmente en bloques cuya forma varía (cilíndrico, cúbico, etcétera) de acuerdo con las costumbres de la región [4,11]. La panela granulada se obtiene por el batido

intenso de las mieles en el momento de alcanzar el punto de panela y su presentación final es en forma de polvo o granos ligeramente esféricos, cuyos diámetros pueden variar de 1 mm a 2,5 mm (terrones). Esta nueva presentación, por sus características (fácil disolución en líquidos y uso instantáneo) es una de las alternativas más viables para alcanzar nuevos estratos de consumidores, domésticos e industriales, recuperar algunos mercados y posicionarlo en el nivel internacional [3].

El presente estudio se enfocó hacia la determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de la panela granulada, y se realizó con muestras de las principales regiones productoras del país [3,11]: la hoya del río Suárez, Antioquia y Cundinamarca.

Las propiedades físicas en estudio fueron: contenido de humedad, densidad aparente y real, porosidad, tamaño de las partículas y el color.

Granulometría: el tamaño de partícula se determina en término de diámetro medio y desviación estándar usando las siguientes ecuaciones :

$$dmp = \log^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i * \log at}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad (1) [1]$$

$$sd = \log^{-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i * (\log at - \log dmp)^2}{\sum_{i=1}^n W_i}} \quad (2) [1]$$

Donde :

dmp : diámetro medio de la partícula (mm).

w_i : peso del producto retenido en cada tamiz (g).

at : tamaño de la abertura del tamiz (mm).

sd : desviación estándar.

n : número de tamices más fondo.

* Ingeniera Agrícola, Universidad Nacional de Colombia

** Ingeniera Agrícola, Universidad Nacional de Colombia

*** Ingeniero Agrícola MSc. Director del Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia

**** Ingeniero Agrícola MSc. Coordinador del Programa Nacional de Maquinaria y Postcosecha, CORPOICA, Santa Fe de Bogotá

Con las siguientes condiciones se estima el área total de la superficie de las partículas en la muestra:

$$Ase = \left(\frac{ffa * Wt}{ffv * \rho} \right) * e^{(0,5 * (\ln sdg))^2 - (\ln tpc)} \quad (3) [1]$$

$$Np = \left(\frac{Wt}{ffv * \rho} \right) * e^{(4,5 * (\ln sdg))^2 - 3 * (\ln tpc)} \quad (4) [1]$$

Donde :

- Ase* :área superficial estimada de la muestra (cm²).
ffa :factor de forma para calcular el área de partícula ; π si la partícula es esférica.
Wt :masa de la muestra (g).
ffv :factor de forma para calcular el volumen de la partícula.
 ρ :densidad del material (g/cm³).
sd :desviación estándar geométrica log- normal de la población para la distribución de la masa; se usa sd como un estimativo.
tpc :tamaño de la partícula común o diámetro de la población para la distribución de la masa, se usa *dmp* como estimativo.
Np :número de partículas por muestra.

Color : el color de la panela granulada constituye un factor importante que está sujeto a los siguientes aspectos:

- * Uso de aditivos.
- * Variedad de caña usada en el proceso.
- * Grados Brix.
- * Contenido de azúcares.
- * Contenido de humedad.
- * Tamaño de partícula [1].

Las propiedades mecánicas en estudio fueron:

Ángulo de reposo: existen dos tipos de ángulo de reposo: estático y dinámico. El ángulo de reposo dinámico es aquel que se forma cuando el material estando en reposo entra en movimiento y el ángulo de reposo estático es el que adoptan los productos al deslizarse sobre sí mismos, [8].

Pérdida de carga: es la pérdida de presión que sufre una corriente de aire al atravesar una masa granular. Depende de la velocidad, la viscosidad y densidad del aire que atraviesa la masa y de propiedades físicas del producto tales como: forma, rugosidad, tamaño, porosidad, contenido de humedad [2,8,10].

Existen algunos modelos matemáticos registrados en la literatura cuyo objetivo es la predicción de los patrones de pérdida de presión en productos almacenados. Shedd [13] presentó, en un estudio, curvas de pérdida de presión para diferentes productos agrícolas, generando la siguiente ecuación:

$$\frac{Q}{A} = a \times \left[\frac{\Delta P}{L} \right]^b \quad (5), [13]$$

Donde:

- ΔP : caída de presión (Pa, mm de agua).
L : altura de la columna de grano (m).
Q : caudal del aire (m³/min).
A : área transversal (m²).
a y *b* : constantes de cada producto.

I. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en los laboratorios de postcosecha del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia.

Para la caracterización de la panela granulada se utilizaron muestras procedentes de la provincia de Gualivá (Cundinamarca), Antioquia y la hoya del río Suárez (departamentos de Boyacá y Santander) tomadas en un trapiche por región y tres molindas por trapiche. Se analizó además una muestra constituida por la mezcla de 2 kg de cada una de las muestras anteriores. En cada prueba se hicieron 15 repeticiones por muestra, en concordancia con el diseño estadístico usado: diseño aleatorio simple con submuestreo.

A. CONTENIDO DE HUMEDAD

Para la determinación del contenido de humedad de la panela granulada se usó el método universal de la estufa, con las siguientes condiciones (consideradas las más apropiadas para evitar el deterioro de los azúcares) [4]: una temperatura de 60°C, durante 24 horas.

B. DENSIDAD APARENTE

En la determinación de la densidad aparente, se usó el procedimiento estipulado por la norma NTC 852 Parte 1 [7], que hace uso de la balanza volumétrica.

C. DENSIDAD REAL

Con los resultados de porosidad y densidad aparente, se determinó la densidad real.

D. POROSIDAD

Para la determinación de esta propiedad se empleó un prototipo de laboratorio construido en el laboratorio de postcosecha del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, de acuerdo con lo establecido por Moshenin [2,8].

Con las lecturas de P_1 y P_2 obtenidas de las mediciones se determinó la porosidad usando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 0,8866 \quad (6) [10]$$

Donde :

n : porosidad, decimal.

P_1 : presión de entrada.

P_2 : presión en el grano.

E. GRANULOMETRÍA

Para la determinación de esta propiedad, se siguió el procedimiento estipulado por la norma ASAE S319.2 [1], utilizada en la determinación del grado de finura de materiales alimenticios, utilizando tamices U.S. Standard, correspondientes a aberturas de : 160 μ , 250 μ , 400 μ , 500 μ , 630 μ , 1 mm, 2,5 mm. El tamaño de la partícula se determinó en términos del diámetro medio y la desviación estándar de la muestra, usando las ecuaciones 1, 2, 3 y 4.

F. COLOR

Para la determinación del color se tomó una muestra de la panela granulada retenida en cada tamiz y se comparó con la carta de colores Munsell para determinar el tono que más se ajustaba al color de esa muestra. Luego se compararon los colores obtenidos como predominantes, según análisis de frecuencia, con la carta de colores de Prismacolor y se asignó el nombre correspondiente.

G. PÉRDIDA DE CARGA

Por medio del prototipo de laboratorio construido en el Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, con base en Moshenin [3,8,10], se midió la pérdida de presión.

Con los datos de pérdidas de presión causadas por las diferentes muestras y velocidad del aire a la salida del equipo se determinaron las constantes para la ecuación 5.

H. ÁNGULO DE REPOSO

Utilizando el prototipo del laboratorio [10], se llevó a cabo el procedimiento para la determinación directa del ángulo de reposo estático [3].

II. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. CONTENIDO DE HUMEDAD

Las muestras se analizaron tal como salían del trapiche para su comercialización y por ello se cuenta con un único valor de contenido de humedad, lo cual dificulta la realización de

inferencias respecto al comportamiento del producto y sus propiedades a diferentes contenidos de humedad. el cuadro 1 muestra los valores promedio encontrados para las regiones estudiadas.

Como puede apreciarse en el cuadro 1, no hay grandes variaciones ni diferencias significativas en el valor del contenido de humedad para la panela de las tres regiones. Como no se realiza ningún tipo de secado, la humedad presentada es la que se puede llegar en las condiciones normales del proceso de elaboración de panela, afectada posiblemente por la humedad relativa de la región. Estos datos concuerdan con otros obtenidos por CORPOICA, según los cuales el contenido de humedad generalmente no supera el 3% [3].

Cuadro 1. Valores promedio del contenido de humedad, densidad, porosidad y ángulo de reposo para panela granulada según región [3].

Región	C.H. promedio (%) bh	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Porosidad (dec.)	Ángulo de reposo (grados)
Hoya del río Suárez	2,8	0,6	1,4	0,5	51
Antioquia	2,1	0,7	1,5	0,5	39
Guallivá	1,9	0,7	1,5	0,6	49
Mezcla	2,5	0,7	1,5	0,5	44

El contenido de humedad promedio de 2,33 % es inferior al de las harinas y ligeramente superior al del azúcar crudo. Además con un contenido de humedad bajo y con grado de higroscopicidad alto, como el de la panela, debe tenerse especial cuidado en el manejo de las condiciones ambientales en el almacenamiento y transporte del producto.

B. DENSIDAD

De acuerdo con el análisis de varianza, se encontraron diferencias significativas en cuanto a la densidad aparente de la panela de la hoya del río Suárez respecto a las otras regiones estudiadas, la cual posiblemente puede estar relacionada con el contenido de humedad de la muestra.

De manera global puede decirse que los valores promedio hallados se encuentran en el intervalo establecido para otros materiales granulares, y que éstos dependen en gran medida del tipo de muestra estudiada. Al comparar los valores obtenidos con los de otros productos granulados, se encuentra que los resultados de densidad aparente de la panela granulada se asemejan al del maíz molido (0,66 g/cm³), probablemente debido a que las partículas son similares en cuanto a tamaño, forma y heterogeneidad. En cuanto a la densidad real el valor es muy parecido al de la panela en bloque (1,34 g/cm³) siendo menor el del bloque debido a las imperfecciones de su geometría.

C. POROSIDAD

En el cuadro 1 se resumen los resultados promedio y según el análisis de varianza realizado se puede decir que estos no presentan diferencias, a un nivel de significancia del 5%.

Debido a la gran variedad de tamaños de partícula presentes en el producto, existe una mejor acomodación de las mismas, que permite reducir la cantidad de espacios vacíos. Lo anterior se refleja en que el valor promedio de la porosidad en la panela granulada es inferior al de otros materiales granulados. Al analizar la relación existente entre el contenido de humedad y la porosidad para las diferentes regiones (véase cuadro 1), se observa que ésta es inversamente proporcional.

D. GRANULOMETRÍA

Luego de haber realizado las pruebas granulométricas se logró determinar que el juego de tamices escogido es el adecuado, pues si bien el producto no es retenido en gran proporción en las últimas cribas (0,25 y 0,16 mm), sí pasa a través de todas. La tabla 2 muestra los resultados del tamaño de los granos promedio.

Cuadro 2. Análisis granulométrico promedio de la panela de las tres regiones [3].

Región	H. río Suárez	Antioquia	Gualivá	Mezcla
At (mm)	% Retención	% Retención	% Retención	% Retención
2,5	38,9	47,4	26,9	40,4
1	25,7	24,7	22,5	28
0,63	18,6	13	47,6	22,4
0,5	8,7	4,5	0,5	5,9
0,4	3,7	2,4	1,6	2,3
0,25	3,7	5,2		0,4
0,16	0,3	2,3		0,09
Fondo		0,4		

Como se aprecia en el cuadro 2 y en la figura 1, el mayor porcentaje del producto se concentra en los tamices con orificios de 2,5 y 1 mm. Lo anterior se corrobora al trazar el d_{50} sobre esa figura, resultado del análisis granulométrico; excepto en la región de Gualivá donde la muestra se encuentra en condiciones de mayor uniformidad.

Si se compara el tamaño de los granos con el del azúcar, se encontrará que el de la panela granulada es similar al del azúcar cuyo tamaño de grano es de grueso a medio [3].

Los resultados de diámetro medio de partícula (D. M. P) y número de partículas en 100 g (N. P), para las tres regiones en estudio, se resumen en el cuadro 3.

Cuadro 3. Principales características granulométricas para la las tres regiones estudiadas [3].

Región	D.M.P(mm)	N.P en 100 g
Hoya río Suárez	0,96	176.433
Antioquia	0,97	57.821
Gualivá	0,97	180.960

Considerando que el diámetro medio de partícula no es representativo de la diversidad de diámetros que se presentan en la masa de granos y que además considera únicamente partículas esféricas, puede afirmarse con un 95 % de confianza que el valor es el mismo para las tres regiones y que por lo tanto la cantidad de partículas demasiado grandes o pequeñas

presentes en la muestra no es suficiente como para alterar el diámetro medio de la panela de alguna de las tres regiones.

De la comparación entre los cuadros 2 y 3 puede inferirse que la razón por la cual el número de partículas de la región de Antioquia es el menor es porque está cuenta con el mayor porcentaje de partículas cuyo tamaño supera los 2,5 mm de diámetro [3].

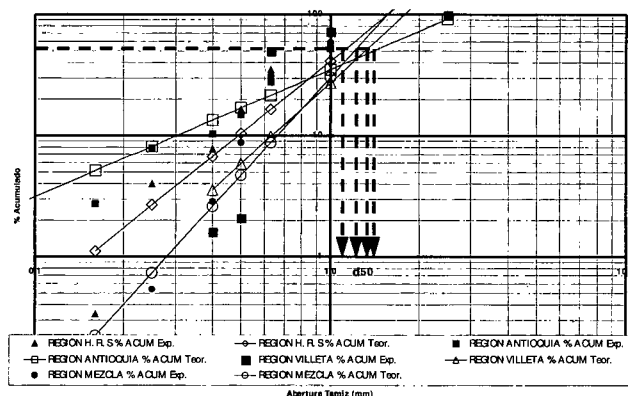


Figura 1 Analisis Granulometrico para tres regiones en estudio

E. COLOR

Para la determinación del color de las muestras se realizó una separación inicial por tamices, debido a que el tamaño de partícula influye sustancialmente en el color del producto; lo anterior puede deducirse del análisis de la frecuencia del color presentado en el cuadro 4.

Cuadro 4. Análisis de frecuencia de color para las regiones estudiadas [3].

Tamiz	Región hoya río Suárez	Región Antioquia	Región Villeta	Mezcla
2,5	2	5,2	4	2,4 3
1,0	1	2,3	4	5
0,63	1	1,2	3	4,3
0,5	1	1,2	2	2
0,4	1	1	2	5
0,25	1	1		1
0,16	1	1		1
Fondo	1			

En el cuadro 4 se muestran los resultados del análisis de frecuencia en orden de importancia para cada región. Para interpretar este cuadro debe tenerse en cuenta la siguiente codificación, en la cual los nombres de los colores corresponden a los equivalentes de la carta Munsell en la carta de colores Prismacolor:

- 1: amarillo ocre.
- 2: ocre tostado.
- 3: naranja mineral.
- 4: sienna.
- 5: cobre.

Los colores predominantes fueron 1, 5, 2, 4 y 3. Estos cinco colores se encuentran en la carta que se presenta en la figura 2.



Figura 2. Carta de colores establecida para las tres regiones estudiadas [3].

De la comparación entre el cuadro 4 y la figura 2 puede deducirse que el color se vuelve más oscuro a mayor tamaño de partícula; o, lo que sería lo mismo, que el tamaño de la partícula influye sustancialmente en la determinación del color, ya que cuando el tamaño de partícula es pequeño el color del producto es más claro.

F. PÉRDIDA DE CARGA

En la determinación de esta propiedad se utilizó el material retenido en los tamices 2,5 mm y 1 mm por considerarlos los más representativos de acuerdo con el análisis granulométrico.

Como puede observarse en la figura 3, el caudal requerido para vencer la resistencia al paso del aire a través del producto cambia según el tamaño de partícula. Para el material retenido por el tamiz de abertura 1 mm, varió entre 30 m³/min/m² y 100 m³/min/m², en tanto que para el material retenido en el tamiz de abertura 2,5 mm, se encuentra entre 100 m³/min/m² y 200 m³/min/m².

La pérdida o caída de presión del aire en ambos casos se determinó entre 200 mm y 500 mm de C.A./m. Esta franja de valores es bastante superior al de los granos cuyo valor generalmente oscila entre 2 mm y 100 mm de C.A./m [10]. Entre las posibles causas de este comportamiento pueden considerarse las siguientes:

- Alta porosidad.
- Alta rugosidad superficial de las partículas.
- Heterogeneidad en forma y tamaño de las mismas.

Las ecuaciones obtenidas con sus coeficientes de correlación y los intervalos de pérdida de presión y caudales se presentan a continuación:

- Tamiz 2,5 mm : $\Delta P/L = ((Q/A)^{1/0,37}) / 19,12$ $R^2 = 0,64$
- Tamiz 1 mm : $\Delta P/L = ((Q/A)^{1/1,35}) / 0,02$ $R^2 = 0,71$
- Tamiz 1 mm : DP/L: 200 a 500 mm C.A./m
Q/A: 30 a 100 m³/min/m²
- Tamiz 2,5 mm : DP/L: 200 a 500 mm C.A./m
Q/A: 100 a 200 m³/min/m²

G. ÁNGULO DE REPOSO

El cuadro 1 resume los resultados obtenidos experimentalmente y en ellos el valor que más se aleja del promedio general es el de la región de Antioquia, debido posiblemente a la heterogeneidad de la muestra.

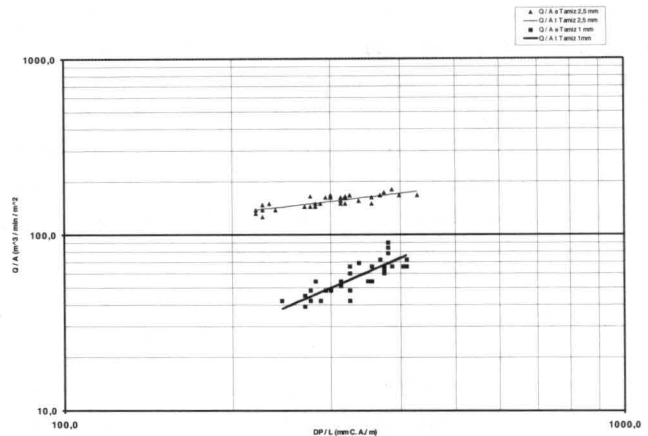


Figura 3. Pérdida de Carga Tamices 1 y 2,5 mm

Al comparar los valores de ángulo de reposo obtenidos para panela granulada, con los de contenido de humedad (véase cuadro 1), se corrobora que el contenido de humedad influye de manera significativa en el comportamiento de esta propiedad. En general y hasta cierto límite de humedad, a mayor contenido de humedad, mayor será su ángulo de reposo.

De acuerdo con el análisis de varianza, la panela de la hoya del río Suárez presenta diferencias significativas que no le permiten incluirse dentro de un promedio general.

Si se compara el valor promedio de ángulo de reposo (46°) con el máximo obtenido para otros materiales granulares, éste se aproxima a los máximos establecidos para arena seca y azúcar granulado (45°). Esto es comprensible en la medida en que el contenido de humedad de los tres productos debe ser bastante similar, por lo que se descartaría en este caso una influencia mayor de la forma y tamaño de las partículas.

CONCLUSIONES

Al comparar los resultados obtenidos para las pruebas de contenido de humedad, densidad aparente, densidad real y porosidad, con los de otros productos granulares, se encontró que los primeros están dentro de los intervalos establecidos como normales para la mayoría de productos granulares. Las variaciones encontradas en la panela obedecen a modificaciones en sus características básicas.

Los resultados promedio obtenidos para las propiedades de la panela proveniente de las tres regiones en estudio se expresan a continuación:

El contenido de humedad promedio es de 2,33 %, la densidad aparente es de 0,67 g/cm³, la densidad real es de 1,48 g/cm³, la porosidad es de 0,64 y el ángulo de reposo es de 47°.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la relación que se presenta entre el ángulo de reposo y el contenido de humedad es directamente proporcional. En tanto que la relación del contenido de humedad con la porosidad es inversamente proporcional.

La metodología utilizada para la determinación del color se considera adecuada, en tanto que la carta Munsell plantea una amplia gama de colores, que puede ser referenciada a la carta de colores Prismacolor®, permitiendo establecer fácilmente el color para la panela granulada.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASAE. *Agricultural Engineers Yearbook of Standards*. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Mi, USA. 1995.
2. BAYONA, J. *Determinación de algunas propiedades fisicomecánicas del café beneficiado*. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agrícola. Bogotá, 1985.
3. FAJARDO N., B. y MOLINA D., D. P. *Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de la panela granulada*. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agrícola. Santa Fe de Bogotá. 1992.
4. GARCÍA B, H. R. "Elaboración de la panela granulada". En : *Artículos técnicos sobre el cultivo de la caña y la elaboración y la elaboración de panela*. CORPOICA, Tibaitatá. 1996.
5. HENAO, C. La panela, una agroindustria que se consolida. FEDEPANELA, Bogotá. 1994.
6. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Norma para la determinación del contenido de humedad para azúcar crudo, NTC 572 - 1995-08-23*. Santa Fe de Bogotá. ICONTEC. 1995.
7. ————. *Determinación de densidad aparente para café instantáneo. NTC 852, Parte 1*. ICONTEC, Santa Fe de Bogotá. 1992.
8. MOSHENIN, N. N. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. U.S.A. Gordon and Breach Science. Publishing. 1970.
9. OLIVEROS T., C. E. y ROA M., G. "Perdidas de presión por paso de aire a través del café pergamino, variedad caturra, dispuesto a granel". *Revista CENICAFE* No. 22. Enero - marzo de 1986. Chinchiná.
10. OSPINA, J. E. "Características físicas, mecánicas y térmicas de granos y semillas". *Revista ACOGRANOS*, Bogotá. 1987.
11. RODRÍGUEZ B., G. A. "La agroindustria panelera colombiana. Análisis de la producción, distribución y consumo". En : *El cultivo de la caña panelera, la elaboración de panela y la utilización de subproductos*. CORPOICA. Tibaitatá. 1996.
12. VEGA, B. y PERDOMO, M. *Determinación de algunas propiedades fisicomecánicas de la semilla de pasto braquiaria*. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agrícola, Santa Fe de Bogotá. 1996.
13. SHEED, C.K. "Resistance of grains and seeds to airflow". *Journal of the American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 34 No. 9. 1953.