

PROPIEDADES MECÁNICAS Y MADURACIÓN DE FRUTOS DE MANGO (*Mangifera indica* L.) BAJO COMPRESIÓN AXIAL

MECHANICAL PROPERTIES AND RIPENING OF MANGO FRUITS (*Mangifera indica* L.) UNDER AXIAL COMPRESSION

Artemio Pérez-López^{1*}; Carlos Alberto Villaseñor-Perea²; Verónica Crisanto-Martínez¹;
J. Joel E Corrales-García¹

¹Departamento de Ingeniería Agroindustrial. ²Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO. Correo-e: aperezl.dia@gmail.com (*Autor responsable)

RESUMEN

La producción de mango en México es una actividad económicamente importante, sin embargo, un inadecuado manejo durante las operaciones postcosecha provoca daños mecánicos en el producto modificando su metabolismo y acelerando la senescencia. El conocimiento de las propiedades mecánicas del fruto son un referente importante para el diseño de materiales de empaque y operaciones de manejo postcosecha. En este trabajo se evaluaron las propiedades mecánicas del fruto de mango bajo pruebas de compresión axial dinámica, la pérdida de peso, la relación °Brix/acidez y color de los frutos durante el periodo de maduración. Los resultados mostraron que el límite elástico del tejido del fruto se tiene a una distancia de 2.3 cm con una carga de compresión de 1.95 kN y una deformación de 13.3 %. El punto de biocedencia se localizó a 2.6 cm, con una carga máxima de compresión de 1.89 kN y una deformación de 22.9 %. La rigidez del tejido mostrada por el valor del módulo de Young correspondió con la carga requerida para deformar el fruto. Los frutos sometidos a compresión mecánica alcanzaron un color amarillo rojizo intenso, además del desarrollo de un mejor sabor con respecto a los frutos intactos después de 10 días de almacenamiento. Estos resultados muestran que la compresión estimuló el metabolismo de maduración de los frutos.

Palabras clave adicionales: *Mangifera indica*, módulo de Young, fuerza de compresión, límite elástico, punto de biocedencia.

ABSTRACT

The mango production in Mexico is an economically important activity, nevertheless, an inadequate handling in the postharvest operations causes mechanical damages in the product changing its metabolism and accelerating the senescence. The knowledge of the mechanical properties of fruits is considered an important aspect in the design of packing materials and operations of handling postharvest. The mechanical properties of mango fruit under dynamic axial compression tests, weight loss, the ratio ° Brix/acidity and color of fruits during ripening were evaluated. The results showed that the elastic limit of the tissue of the fruit was reached at a distance of 2.3 cm with a compression load of 1.95 kN and a deformation of 13.3%. The bioyield point was located at 2.6 cm with a maximum compression load of 1.89 kN and a deformation of 22.9 %. The rigidity of the tissue shown by the value of the Young's modulus corresponded with the required load to deform the fruit. The fruits put under mechanical compression reached a yellow reddish color and, besides, the development of a better flavor with respect to the intact fruits after 10 days of storage. These results showed that the compression stimulated the metabolism of ripening of fruits.

Additional key words: *Mangifera indica*, Young modulus, compression load, elastic limit, bioyield point.

INTRODUCCIÓN

El mango (*Mangifera indica* L.) es un importante fruto tropical por su gran demanda en el mercado internacional donde México es uno de los principales exportadores. Los frutos de mango son sometidos constantemente a daños mecánicos desde el momento de la cosecha y durante el transporte al ser colocados en cajas de plástico o madera que son apilados en varios niveles donde reciben básicamente daños por compresión. Dependiendo del nivel del daño, puede haber cambios en el metabolismo normal de los frutos que conducen a una aceleración de la senescencia o éstos pueden ser promotores de la incidencia de enfermedades (Mohsenin, 1977; Ruiz, 1991; Hahn, 2004).

Debido a su naturaleza viscoelástica, el tejido de los frutos puede dañarse más fácilmente cuando la fuerza de compresión es pequeña y se aplica por un largo periodo de tiempo que cuando la carga se aplica por un periodo de tiempo corto; sin embargo, la deformación requerida para ocasionar una falla en el tejido del fruto es mayor que bajo condiciones de carga rápida (Chen y Sun, 1981). Cuando un fruto es sometido a una prueba de compresión el comportamiento del tejido del fruto, al principio, corresponde al de un cuerpo elástico que puede volver a su forma original si el esfuerzo es retirado. Para periodos más prolongados de estrés, el tejido del fruto tiene un comportamiento plástico en donde los tejidos no recuperan su forma original. Lo que ocurre en tal situación es que la energía liberada por la compresión es encausada para la salida del agua de las células, el movimiento de las células dentro del tejido o para el deslizamiento de microfibrillas en la matriz de la pared celular, lo que ocasiona una deformación permanente en la forma de la célula (Knee y Miller, 2002).

Los daños por compresión se pueden estudiar mediante pruebas de compresión mecánica por la interacción entre un esfuerzo y la deformación del producto como una función del tiempo, producidas por un patrón de carga. Mediante estas pruebas se pueden establecer el límite elástico, el punto de biocedencia y el punto de ruptura del material. En el límite elástico el tejido del fruto puede recuperar su forma original sin causar efectos fisiológicos significativos, en tanto que con una compresión más allá del punto de biocedencia se provoca ruptura en el tejido, lo que modifica el metabolismo del fruto (Mohsenin, 1970; Chen *et al.*, 1987; Hadfield *et al.*, 1995; Villaseñor-Perea *et al.*, 2006). Las células de las frutas contienen una mezcla compleja de compuestos fenólicos, muchos de los cuales son sustratos potenciales de la enzima catecol oxidasa que se localiza en los plastidios de las células intactas. Por ello, una ruptura de la célula es inevitablemente acompañada por un trastorno porque los sustratos y las enzimas entran en contacto. En presencia de oxígeno molecular, la catecolasa ataca a los grupos O-difenol formando quinonas y agua. Las quinonas tienden a polimerizarse naturalmente a compuestos oscuros que dan una apariencia de manchado de los tejidos (Knee y Miller, 2002).

El presente estudio estuvo encaminado a obtener valores de propiedades mecánicas de los frutos de mango por medio de pruebas de compresión mecánica en laboratorio. Estos datos

representan un referente importante en el conocimiento de parámetros ingenieriles que tendrían aplicación en el diseño de materiales de empaque y operaciones de manejo postcosecha del fruto. Asimismo, el monitoreo de la maduración del fruto permitirá conocer la carga límite permisible de compresión sin que éste muestre efectos negativos en el desarrollo de la maduración del fruto. De esta manera se plantearon como objetivos los siguientes: (a) evaluar las propiedades mecánicas del fruto de mango bajo pruebas de compresión axial dinámica y (b) evaluar la maduración del fruto sometido a diferentes distancias de compresión mecánica axial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó como material experimental frutos de mango cv Kent cosechados en madurez fisiológica y libre de daños mecánicos, provenientes de una parcela comercial ubicada en la comunidad de Las Varas, Nayarit, México. Se empleó el índice de cosecha del productor (8-9 °Brix y parámetros de color L*, a* y b* iguales a 43.3, -7.0 y 17.0, respectivamente). Los frutos se trasladaron en cajas de cartón con la finalidad de disminuir los daños mecánicos. Las pruebas mecánicas de compresión y las variables evaluadas durante la maduración se realizaron en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola y en el Laboratorio de Fisiología Postcosecha del Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, respectivamente.

Para el estudio mecánico de compresión se empleó una Máquina Universal de Ensayos Mecánicos INSTRON[®] (Universal Testing Machine) modelo 4469, con una velocidad de cruceta de 50 mm min⁻¹ y una celda de carga de 50 kN (Szczesniak, 1983; Villaseñor-Perea *et al.*, 2006). Las variables mecánicas de compresión evaluadas fueron: carga de compresión reportada en kN, porcentaje de deformación lateral del fruto por el esfuerzo aplicado y el módulo de Young en MPa.

Los frutos fueron comprimidos con el pedúnculo en posición horizontal paralelo al plato de compresión y tres distancias de desplazamiento de la cruceta del equipo de compresión definidas como límite elástico (LE) a 2.3 cm, punto de biocedencia (PB) a 2.6 cm y punto de ruptura del fruto (PR) a 3.2 cm. Estas distancias de desplazamiento de cruceta para los niveles de compresión se establecieron mediante pruebas preliminares comprimiendo 20 frutos de mango, de donde se obtuvo la curva de carga de compresión contra desplazamiento de cruceta correspondiente (Szczesniak, 1983; Villaseñor-Perea *et al.*, 2006). La unidad experimental fue un fruto de mango y se evaluaron con tres repeticiones las variables mecánicas en el día inicial. Posteriormente un lote de frutos se sometió a compresión a las distancias LE y PB y se les sometió a evaluación en los días 0, 2, 4, 6, 8 y 10 de almacenamiento a temperatura ambiente (20 ± 2 °C) en términos de pérdida fisiológica de peso, sólidos solubles totales, acidez titulable y el color. Por otro lado, como testigo se manejó un lote de frutos sin compresión (T). En el tratamiento PR sólo se evaluaron las variables mecánicas.

La determinación de SST se realizó según el método de la AOAC (1980) con la ayuda de un refractómetro manual marca ATAGO[®] con escala de 0-32 % y el resultado se expresó en °Brix. La acidez titulable se determinó por el método de titulación con hidróxido de sodio 0.1 N propuesto por la AOAC (1980) y los resultados se expresaron como % de ácido cítrico. El peso de los frutos se registró diariamente en una balanza digital Ohaus[®] de 0.1 g de sensibilidad y se calculó el porcentaje de pérdida fisiológica de peso con base en el peso inicial. El color externo se midió en tres posiciones distintas en la superficie del fruto con un colorímetro Hunter Lab modelo Mini Scan XE Plus No. 45/0-L Hunter Lab[®] en datos en escala Cielab (L*, a* y b*) con los que se calcularon el índice de pureza o cromaticidad $\left(\sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}\right)$ (C*) y el ángulo de tono $\left(\tan^{-1} b^* / a^*\right)$ (H*) (McGuire, 1992). Las variables respuesta estudiadas se sometieron a un análisis de varianza y cuando se detectaron diferencias se procedió a realizar pruebas de comparación de medias con la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) entre los tratamientos por cada día de evaluación. Para ello se utilizó el paquete computacional Statistical Analysis System versión 6.12 (SAS, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carga de Compresión, Deformación Porcentual y Módulo de Young

La carga de compresión para alcanzar el límite elástico en los frutos de mango fue de 1.95 kN. Con ese nivel de carga el tejido del fruto tuvo una deformación de 13.3 % (Cuadro 1). En el punto de biocedencia la carga máxima fue 1.89 kN con una deformación de 22.91 %. Algunos investigadores mencionan que una carga de compresión más allá del punto de biocedencia puede ocasionar una falla en algún elemento estructural del tejido del fruto (Mohsenin, 1970; Szczesniak, 1983). El módulo de Young mostró que la rigidez en el tejido del fruto (Chen *et al.* 1987) fue ligeramente mayor en el límite elástico (1.57 MPa) que en el punto de biocedencia (1.42 MPa), lo que coincide con la carga requerida para deformarlo. En el punto de ruptura (3.2 cm) la rigidez que mostró el tejido del fruto (1.47 MPa) fue probablemente favorecida por la firmeza de la semilla, debido a que se requirió de mayor carga (2.8 kN) para poder romper el fruto una vez que éste alcanzó un 35.17 % de deformación.

En frutos de melón se reportan valores de carga de compresión entre 0.41 a 1.95 kN para alcanzar los límites elástico, punto de biocedencia y ruptura del fruto, respectivamente. Esto debido a que la rigidez del tejido del fruto fue menor (0.12 a 0.38 MPa) y por tanto experimentaron deformación de hasta 51.4 % en el momento de la ruptura (Villaseñor-Perea *et al.*, 2006). Algunos estudios mencionan que debido a la presencia de elementos viscosos en la estructura reológica de un material, la carga de compresión y la deformación son influenciados por la forma y la posición del material durante la prueba de compresión (Culioli y Sherman, 1976).

Villaseñor-Perea *et al.* (2006) reportó que el comportamiento fisiológico de frutos de melón sometidos a compresión no difiere estadísticamente del comportamiento fisiológico de un fruto intacto, en tanto la carga de compresión no exceda el límite elástico del fruto.

Pérdida de peso

No hubo diferencia significativa ($P > 0.05$) en la pérdida fisiológica de peso entre los frutos de mango intactos (T) y los comprimidos hasta el LE y PB en cada día de evaluación, durante el periodo de evaluación (Cuadro 2). Los resultados muestran que los frutos de mango, comprimidos hasta el PB, pueden recibir una carga de compresión de hasta 1.89 kN sin que esto tenga efectos en la pérdida fisiológica del fruto. Algunos investigadores afirman que la resistencia queda definida por una serie de características intrínsecas como son: el volumen, la forma y la composición externa (exocarpio) e interna (mesocarpio, endocarpio y embrión) de un fruto, y estos elementos actúan de diferente forma ante las mismas condiciones (Khan y Vincent, 1991). Asimismo, afectan el grado de madurez del fruto que tiene estrecha relación con los cambios hormonales o enzimáticos que propician el ablandamiento (Pantástico, 1984) y características como tipo de célula, forma, tamaño, dureza, volumen del espacio intercelular y la orientación del crecimiento celular (Iker y Szczesniak, 1990).

Relación °Brix/acidez

La relación °Brix/acidez es un indicativo del desarrollo del sabor característico de consumo del fruto, por lo que un incremento de ella refleja el grado de maduración. A partir del día

Cuadro 1. Propiedades mecánicas del fruto de mango cv Kent en estado de madurez fisiológica bajo tres niveles de compresión: límite elástico (LE), punto de biocedencia (PB) y punto de ruptura (PR).

	Nivel de compresión	Carga de compresión (kN)	Deformación (%)	Módulo de Young (MPa)
Media \pm desviación estándar	LE	1.95 \pm 0.29	13.31 \pm 1.03	1.57 \pm 0.19
	PB	1.89 \pm 0.47	22.91 \pm 0.60	1.42 \pm 0.36
	PR	2.84 \pm 0.67	35.17 \pm 2.63	1.47 \pm 0.24
Coeficiente de Variación (%)	LE	15.29	7.78	12.35
	PB	25.26	2.64	25.71
	PR	23.66	7.50	16.85

cuatro la relación °Brix/acidez incrementó significativamente en los frutos comprimidos hasta PB con respecto al fruto intacto (Cuadro 2). Cuando los frutos de mango alcanzaron la madurez de consumo (día 10), la relación °Brix/acidez mostró cambios significativos ($P < 0.05$) entre los frutos manejados como testigo y los que se sometieron a pruebas de compresión, siendo estos valores de 20.89, 20.49 y 29.03. Este cambio indica que en los frutos comprimidos hasta LE y PB hubo incrementos en el contenido de sólidos solubles totales y disminución en el contenido del ácido cítrico.

Color de la Cáscara

Hubo diferencia estadística significativa en los valores de L^* entre los frutos intactos (T) y aquellos que fueron comprimidos hasta LE y PB en cada día de evaluación (Cuadro 3). Generalmente, se observó un incremento en los valores de L^* , cromaticidad y ángulo de tono de cada tratamiento durante los 10 días de almacenamiento. De esta forma, cuando los frutos alcanzaron la madurez de consumo (día 10) el color de la piel de frutos comprimidos hasta PB se tornó amarillo rojizo más intenso ($H^*=57.0$ y $C^*=31.36$) que en los comprimidos hasta LE ($H^*=59.0$ y $C^*=25.57$). Esta coloración de ambos tratamientos difirió ($P < 0.05$) de la coloración desarrollada por los frutos T ($H^*=66.9$ y $C^*=21.44$). Cabe mencionar que el color típico del mango cv. Kent en estado maduro es un verde amarillento con chapeo rojo en la base del fruto. Los resultados obtenidos indican que la

carga aplicada estimuló eventos fisiológicos que influyeron en el desarrollo del color y por tanto en la maduración del fruto (Yang y Hoffman, 1984; Báez-Sañudo *et al.*, 2002). Sin embargo, en frutos de melón, se ha encontrado evidencia de que estos eventos fisiológicos ocurren de manera acelerada conduciendo a senescencia cuando la carga de compresión va más allá del límite elástico (Hadfield *et al.*, 1995; Villaseñor-Perea *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

El fruto de mango cv. Kent en estado de madurez fisiológico tuvo límite elástico a 2.3 cm con una carga de compresión de 1.95 kN y una deformación del 13.3 %. El punto de biocedencia se localizó a 2.6 cm con una carga máxima de compresión de 1.89 kN y una deformación porcentual de 22.91. La relación °Brix/acidez y la cromaticidad mostraron un incremento, en tanto que el ángulo de tono disminuyó de manera significativa entre los frutos sometidos a compresión mecánica y aquellos sin comprimir después de 10 días de almacenamiento. El color desarrollado en el fruto fue un amarillo rojizo intenso. Los valores en el módulo de Young fueron 1.57 MPa para LE y 1.42 MPa para PB, lo que coincidió con la carga requerida para deformarlo. En el punto de ruptura (3.2 cm) la rigidez que mostró el tejido del fruto (1.47 MPa) fue favorecida por la firmeza de la semilla, debido a que se requirió de mayor carga (2.8 kN) para poder romperlo.

Cuadro 2. Pérdida de peso y relación °Brix/acidez en frutos de mango cv. Kent almacenados a temperatura ambiente sin comprimir (T) y comprimidos axialmente hasta límite elástico (LE) y punto de biocedencia (PB).

Día	Pérdida de peso (%)			°Brix/acidez		
	T	LE	PB	T	LE	PB
0	0 a ^z	0 a	0 a	7.75 a ^z	7.30 a	7.66 a
2	1.18 a	1.17 a	1.23 a	8.96 a	7.94 a	8.73 a
4	3.82 a	3.71 a	3.92 a	12.12 b	14.28 a	13.40 a
6	6.31 a	6.20 a	6.53 a	18.08 b	18.62 b	19.82 a
8	9.07 a	9.04 a	8.97 a	20.89 b	20.49 b	29.03 a
10	11.76 a	11.68 a	11.69 a	22.78 b	45.94 a	42.85 a

^zMedias con letra diferente, en renglones, indican diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey con una $P \leq 0.05$.

Cuadro 3. Valores de luminosidad (L^*), cromaticidad (C^*) y ángulo de tono (H^*) en frutos de mango cv. Kent almacenados a temperatura ambiente sin comprimir (T) y comprimidos axialmente hasta límite elástico (LE) y punto de biocedencia (PB).

Día	L^*			C^*			H^*		
	T	LE	PB	T	LE	PB	T	LE	PB
0	39.7 b ^z	41.7 a	42.8 a	16.32 a	16.19 a	16.24 a	157.1 a	154.4 a	158.5 a
2	39.6 b	41.7 a	42.4 a	16.17 a	16.06 a	16.50 a	157.1 a	154.1 a	154.9 a
4	39.2 b	42.0 a	44.6 a	16.51 b	16.79 b	18.34 a	154.6 a	150.6 a	151.2 a
6	40.5 b	43.9 a	46.2 a	17.88 b	19.14 b	21.02 a	97.2 b	90.8 b	76.4 a
8	41.2 b	44.5 a	45.9 a	20.11 b	21.83 ab	23.95 a	75.2 b	75.2 b	60.2 a
10	40.9 c	45.2 b	50.2 a	21.44 c	25.57 b	31.36 a	66.9 b	59.0 a	57.0 a

^zMedias con letra diferente, en renglones, indican diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey con una $P \leq 0.05$.

LITERATURA CITADA

- Association of Official Analytical Chemists. 1980. Official Methods of Analysis. Horwitz W. (ed.) 13th Ed. Benjamin Franklin Station, Washington, DC 20044. USA. 1018 p.
- Báez-Sañudo R.; Saucedo V. C.; Pérez R.B.; Bringas T. B.; Mendoza W.A.M. 2002. Efecto de la aplicación de cera comestible y agua caliente en la conservación de melón reticulado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(4): 375-379.
- Chen P.; Ruiz M.A.; Kader A.A. 1987. Study of impact and compression damage on Asian pears. *Transactions of the ASAE* 30(4): 1193-1197.
- Chen P.; Sun Z. 1981. Impact parameters related to postharvest bruising of apples. ASAE Paper No. 81-3041, St. Joseph, Michigan.
- Culioli J., Sherman P. 1976. Evaluation of gouda cheese firmness by compression tests. *Journal of Texture Studies* 7: 353-372

- Hadfield K.A.; Rose K.J.; Bennett A.B. 1995. The respiratory climacteric is present in charentais (*Cucumis melo* cv. Reticulatus f1 alpha) melons ripened on or off the plant. *Journal of Experimental Botany* 46: 1923-1925.
- Hahn F. 2004. Mango firmness sorter. *Biosystems Engineering* 89(3): 309-319.
- Ilker R.; Szczesniak A.S. 1990. Structural and chemical bases for texture of plant foodstuffs. *Journal of Texture Studies* 21: 1-36.
- Khan A.A.; Vincent J.F.V. 1991. Bruising and splitting of apple fruit under uni-axial compression and the role of skin in preventing damage. *Journal of Texture Studies* 22:251-263.
- Knee M.; Miler R. 2002. Mechanical injury. *In: Fruits Quality and its Biological Basis*. Knee M. (ed.). Sheffield Academic Press.
- McGuire R.G. 1992. Reporting of objective color measurements. *HortScience* 27: 1254-1255.
- Mohsenin N.N. 1970. Applications of engineering techniques to evaluation of texture of solid food materials. *Journal of Texture Studies* 1(2): 133-134.
- Mohsenin N.N. 1977. Characterization and failure in solid food with particular reference to fruits and vegetables. *Journal of Texture Studies* 8: 169-193.
- Pantástico E.B. 1984. Fisiología de la Post-recolección de Manejo y Utilización de frutas y Hortalizas Tropicales y Subtropicales. Ed. Continental S. A. México.
- Ruiz A.M. 1991. Damage mechanisms in the handling of fruits. *Cab International*. Wallingford R.U. USA. pp: 231-257 p.
- SAS. 1985. Statistical Analysis System. User'S Guide. Version 5th Ed., The SAS Institute. Cary. NC.
- Szczesniak, A.S. 1983. Physical properties of foods. *Institute of Technologists*, Amherst, Massachusetts. pp. 1-37.
- Villaseñor-Perea C.A.; Chávez F.S.H.; Saucedo V.C.; Salazar Z.A.; Landois P.L.; Hernández G.L. H. 2006. Comportamiento mecánico y fisiológico de frutos de melón (*Cucumis melo* L.) bajo compresión axial. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(2): 157-162.
- Yang S.E.; Hoffman N.E. 1984. Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology* 35: 155-189.