

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FUERZA DE FRACTURA EN FRUTAS TROPICALES: EL TOMATE DE ÁRBOL (*Cyphomandra betacea* Sendt)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FORCE OF FRACTURE IN TROPICAL FRUITS: TREE TOMATO (*Cyphomandra betacea* Sendt)

HÉCTOR J. CIRO V

*Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
hjciro@unalmed.edu.co*

DIEGO L. VAHOS M

*Ingeniero Agrícola.. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
dlvahos@yahoo.com*

CARLOS JULIO MÁRQUEZ C

*Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
cjmarque@unalmed.edu.co*

Recibido para revisar 14 de Abril de 2004, aceptado 16 de Julio de 2004, versión final 20 de Agosto de 2004

RESUMEN: Tomates de árbol (*Cyphomandra betacea* Sendt) fueron sometidos a carga de compresión unidireccional, utilizando un texturómetro TA.XT2i. Los ensayos se realizaron según dos sentido de carga (longitudinal y transversal) y cuatro velocidades (1,3,6,9 mm/s). Los resultados mostraron que la fuerza de fractura es independiente de la dirección de la carga, con un promedio de 1,71 N (16,77 kgf) y de su velocidad de aplicación. Igualmente, los tiempos de fractura se reducen cuando se incrementa la velocidad de la carga.

PALABRAS CLAVE: Fractura, viscoelasticidad, carga de compresión, daño mecánico.

ABSTRACT: Using the texture analyzer TA.XT2i, samples of tree tomato (*Cyphomandra betacea*) were subjected to a unidirectional compression load. Two load directions (longitudinal and transversal) and four loading rates (1, 3, 6, 9 mm/s) were used. The results showed that the fracture force is not dependent upon the direction of load and speed rate. The average fracture force was 1, 71 N (16, 77 kgf). Also, the fracture time is reduced when the load velocity is increased.

KEY-WORDS: Fracture, visco-elasticity, compression load, mechanical damage.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia la producción de tomate de árbol, la cual es una fruta exótica, permite satisfacer una alta demanda con diversos

finés, con gran acogida entre los consumidores. Estos volúmenes de producción, además de los riesgos de contaminación por agroquímicos y problemas fitosanitarios, también se ve expuesta a

condicionantes de manejo que afectan su calidad, protección y presentación. Dadas estas circunstancias, resulta pertinente estudiar a nivel experimental alguno de los factores que afectan las anteriores variables. Los materiales biológicos, entre ellos el tomate de árbol, desde su cosecha y en los procesos y prácticas de manipulación y transporte están sometidos a diversas condiciones de fuerzas o cargas aplicadas, como consecuencia de ese manejo, las cuales transversal y longitudinal; admitiendo, que dicho comportamiento puede estar afectado por una combinación de múltiples factores o características físicas, químicas, térmicas y mecánicas del producto.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ASPECTOS GENERALES DEL TOMATE DE ÁRBOL

El tomate de árbol (*Cyphomandra betacea* Sendt), es originario de Filipinas y América Latina. A nivel comercial se produce en Filipinas, Nueva Zelanda, Kenia, Brasil, India Ecuador, Perú y Colombia. Es una baya de diferentes formas; son redondos aplanados y ovalados. La corteza o epicarpio liso es de color rojo o amarillo; la pulpa o mesocarpio es jugoso ligeramente ácido, de color anaranjado, amarillo y rojo según la variedad (Gutiérrez y López, 1999).

De acuerdo a Gutiérrez y López (1999) el tomate de árbol debe ser acondicionado para su comercialización teniendo en consideración las exigencias de cada mercado y los requisitos para conservar su calidad. Para esto deben realizarse labores de selección, clasificación y empaque. El empaque es importante en la poscosecha de tomate de árbol, ya que este influye en la conservación de la calidad, la protección y presentación del producto. Los que técnicamente protegen más al tomate de árbol son la canastilla plástica y el cartón corrugado.

2.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE FRACTURA

De acuerdo a Mohsenin (1986) y Strohshine (1999) los productos biológicos dentro de los

pueden ocasionar gran daño mecánico que afectan su calidad y precio. Por tanto, identificar las magnitudes de esas cargas y esfuerzos resulta determinante, para mejorar las técnicas de empaque, transporte, manejo y control de daño mecánico, y así conservar su calidad. Los modelos reológicos pueden dar razón de ese comportamiento mecánico, al someter el producto a fuerzas de fractura, aplicando compresión en dirección

cuales se encuentran los productos agrícolas y alimentos pueden considerarse materiales de ingeniería de naturaleza viscoelástica y altamente caracterizados por su anisotropía, cuya respuesta ante la imposición de diferentes cargas o esfuerzos es una información básica necesaria para el desarrollo de procesos mecanizados de cosecha, transporte, manejo, control de calidad, requerimientos de empaque, almacenamiento, procesos de transformación y control de daño mecánico.

La fractura de un material sólido puede considerarse como una propiedad mecánica del material donde ocurre una separación en dos o más partes bajo la acción de un determinado esfuerzo (Dieter, 1986; Smith, 1996 y Dowling, 1998). Además Anderson (1991) argumenta que un material se fractura cuando suficiente esfuerzo y trabajo son aplicados a nivel atómico para romper los enlaces que mantienen los átomos juntos, donde la resistencia del enlace es suministrada por las fuerzas atractivas entre átomos.

Desde un punto de vista macroscópico la fractura puede ser descrita a nivel macroscópico como la formación de grietas o ranuras en el producto existiendo varios modos de fractura: fractura simple, frágil y dúctil, donde cada modo de fractura está caracterizado por tres pasos: inicialización de la grieta, propagación de la grieta y falla final (Strohshine, 1999 y Bourne, 2002). Sin embargo, existen otros tipos de falla en los cuales las células pueden ser fracturadas situación esta que ocurre especialmente en frutas y vegetales cuando existe un daño por "magulladura", el cual de acuerdo a Mohsenin (1986), es un daño mecánico ocasionado por

una fuerza externa que puede ocasionar cambios de sabor, alteración química del color sin romper la superficie del producto.

Bourne (2002) y Craig (1999), definen la fractura frágil como aquella en la cual existe una pequeña o no existe deformación plástica antes de la fractura y es caracterizada por una baja absorción de energía, mientras que la falla dúctil existe una substancial deformación plástica con alta absorción de energía antes de la ruptura.

Para productos vegetales, Abbot y Lu (1996) y Khan y Vincent (1993), analizaron el efecto de la dirección de carga en manzanas frescas y papas frescas respectivamente, concluyendo que la manzana es un material anisotrópico mientras que la papa posee un comportamiento isotrópico.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 LOCALIZACIÓN

El trabajo de investigación fue realizado en el laboratorio de Ingeniería de Procesos Agrícolas del departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, a una temperatura ambiental promedio de 22 °C y humedad relativa de 65%.

3.2 MATERIALES

- 100 unidades de tomate de árbol con grado de madurez promedio entre 4 y 5,

según tabla de color de la norma técnica colombiana N.T.C. 4105.

- Texturómetro TA.XT2i, versión 2.64.
- Plato de compresión de 100 mm.
- Software: Texture Expert Exceed, Stable Micro Systems, London, U.K.
- Computador Pentium IV.
- Balanza humidimétrica, Precisa HA300.
- Calibrador digital.
- Bolsas plásticas.
- Balanza gravimétrica, OHAUS Navigator (0,1g).
- Refractómetro escala 0-32%.
- pH-metro Schott CG840B.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Caracterización físico-química.

Antes de realizar los ensayos a compresión, el tomate de árbol fue caracterizado midiendo sus dimensiones geométricas (diámetro mayor, medio y menor), masa, humedad en base húmeda, grados Brix y pH.

3.3.2 Pruebas de fractura. Usando un texturómetro TA.XT2i, el tomate de árbol fue sometido a pruebas de compresión unidireccional según un sentido de carga y velocidad de compresión como lo muestran las Figuras 1 y 2.

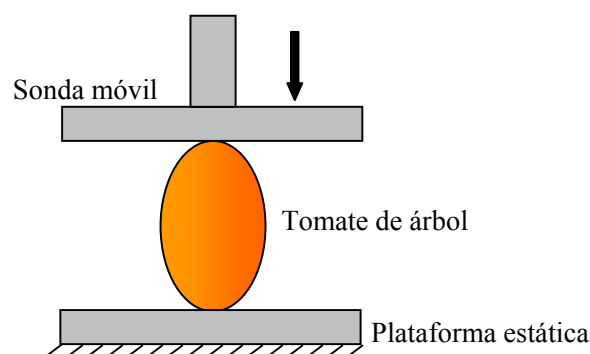


Figura 1. Prueba de fractura a compresión en dirección longitudinal.
Figure 1. Test of fracture to compression in longitudinal direction.

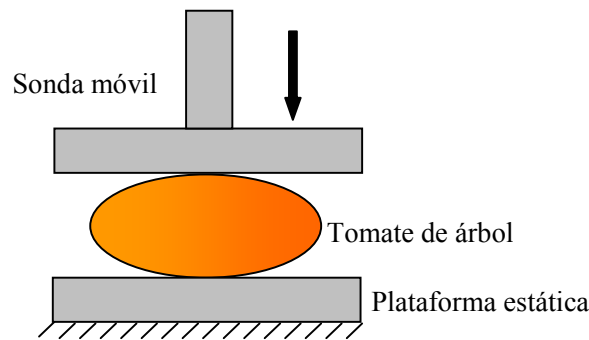


Figura 2. Prueba de fractura a compresión en dirección transversal.
Figure 2. Test of fracture to compression in transversal direction.

Las velocidades de compresión seleccionadas fueron de 1, 3, 6 y 9 mm/s. La información obtenida de estos ensayos fue procesada via computador usando el software “Texture Expert Exceed”. Para cada velocidad y en cada sentido de carga se hicieron diez (10) repeticiones. La fuerza de fractura se determinó a partir de la información grafica de Fuerza v.s. Tiempo.

3.3.3. Análisis estadístico. Se realizó un arreglo factorial 4x2x10 (cuatro velocidades, dos sentidos de carga y diez repeticiones) para un total de 80 unidades experimentales y 8 tratamientos. Para los resultados de cada tratamiento se hizo un análisis de varianza y pruebas Duncan a un nivel de significancia al 5%. Además se estableció un análisis de correlación entre las propiedades geométricas y la masa del producto con la fuerza de fractura obtenida. Estos análisis fueron realizados usando el paquete estadístico S.A.S., versión 8.0.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL TOMATE DE ÁRBOL

En la Tabla 1, se muestra los promedios obtenidos para las dimensiones geométricas, pH, masa, grados Brix y humedad en base húmeda. De la Tabla 1, se puede observar que el tomate de árbol toma una configuración ovoide donde su diámetro mayor es 54% superior comparado con el diámetro menor.

Los valores de pH representando un producto ácido, grados Brix y contenido de humedad concuerdan con los valores reportados por Gutiérrez y López (1999).

4.2 FUERZAS DE FRACTURA

En la Tabla 2, se muestra las fuerzas de fractura en sentido de carga longitudinal y transversal según la velocidad de compresión. Para una velocidad de compresión dada, un análisis de varianza al 5% no mostró diferencias significativas en el sentido de carga en la variable de respuesta fuerza de fractura.

Tabla 1. Generalidades físico químicas del tomate de árbol.

Table 1. Physical and Chemical properties of tree tomato.

CARACTERÍSTICA	PROMEDIO
Diámetro mayor (mm)	76,1
Diámetro menor (mm)	49,5
Diámetro medio (mm)	62,1
Masa del fruto (g)	100,11
pH	3,53
Grados Brix	8,8
Humedad base húmeda (%)	88,2

Tabla 2. Fuerzas de fractura en dirección longitudinal y transversal para el tomate de árbol.

Table 2. Forces of fracture in longitudinal and transversal directions for tree tomato.

VELOCIDAD (mm/s)	FUERZA DE FRACTURA	
	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
1,0	1,59 N (15,61 kgf)	1,63 N (15,93 kgf)
3,0	1,66 N (16,24 kgf)	1,80 N (17,67 kgf)
6,0	1,52 N (14,94 kgf)	1,90 N (18,57 kgf)
9,0	1,87 N (18,35 kgf)	1,72 N (16,82 kgf)

En las Tablas 3 y 4, se muestra la fuerza de fractura según su sentido de carga con su respectivo coeficiente de variación. Para un sentido de carga dado, un análisis de varianza al 5%, no mostró efecto de la velocidad de carga a compresión en la variable respuesta fuerza de fractura. El coeficiente de variación para la fuerza de fractura, en promedio fue mayor del 20%, el cual es un valor típico encontrado en la determinación de las propiedades mecánicas de alimentos biológicos. Los valores del coeficiente de variación pueden ser ocasionados a la heterogeneidad estructural global del material que puede ser representado por diferentes grados de madurez, épocas de cosecha, tipo de variedad y sistemas de manejo poscosecha.

Tabla 3. Fuerza de fractura en dirección longitudinal para el tomate de árbol.

Table 3. Forces of fracture in longitudinal direction for tree tomato.

VELOCIDAD (mm/s)	FUERZA DE FRACTURA	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)
1,0	1,59 N (15,61 kgf)	23,65
3,0	1,66 N (16,24 kgf)	21,17
6,0	1,52 N (14,94 kgf)	25,00
9,0	1,87 N (18,35 kgf)	27,01

Tabla 4. Fuerza de fractura en dirección transversal para el tomate de árbol.

Table 4. Forces of fracture in transversal direction for tree tomato.

VELOCIDAD (mm/s)	FUERZA DE FRACTURA	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)
1,0	1,63 N (15,93 kgf)	17,99
3,0	1,80 N (17,67 kgf)	24,11
6,0	1,90 N (18,57 kgf)	25,76
9,0	1,72 N (16,82 kgf)	24,87

Ya que el análisis estadístico no mostró diferencias significativas en la fuerza de fractura según su sentido de carga y velocidad de carga por compresión, un valor promedio para la fuerza de fractura superficial es de 1,71 N (16,77 kgf), representado por un valor promedio en sentido longitudinal de 1,66 N (16,28 kgf) y en sentido transversal de 1,76 N (17,25 kgf).

A pesar que los resultados no mostraron efecto de la velocidad de deformación sobre la variable fuerza de fractura, hay que tener en cuenta que la razón de deformación por compresión es vital cuando se pretende analizar el comportamiento reológico del producto en pruebas de relajación y fluencia.

En la Figura 3 y 4, se observa una curva típica de fractura superficial para el tomate de árbol a una velocidad de compresión de 1 mm/s, en la dirección transversal y longitudinal respectivamente. Se puede observar que el comportamiento de ambas curvas es diferente, en las cuales el punto de fractura corresponde a un decrecimiento de la fuerza con un incremento de la deformación. Situación similar ocurrió para velocidades de carga de 3, 6 y 9 mm/s.

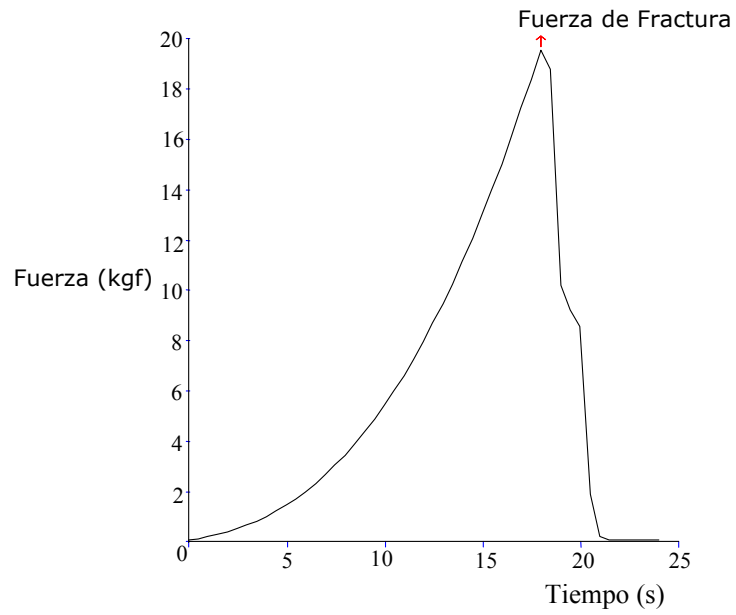


Figura 3. Curva de fractura del tomate de árbol en dirección transversal (Velocidad de carga = 1,0 mm/s)

Figure 3. Curve of fracture of tree tomato in transversal direction. (Speed of load. = 1,0 mm/s)

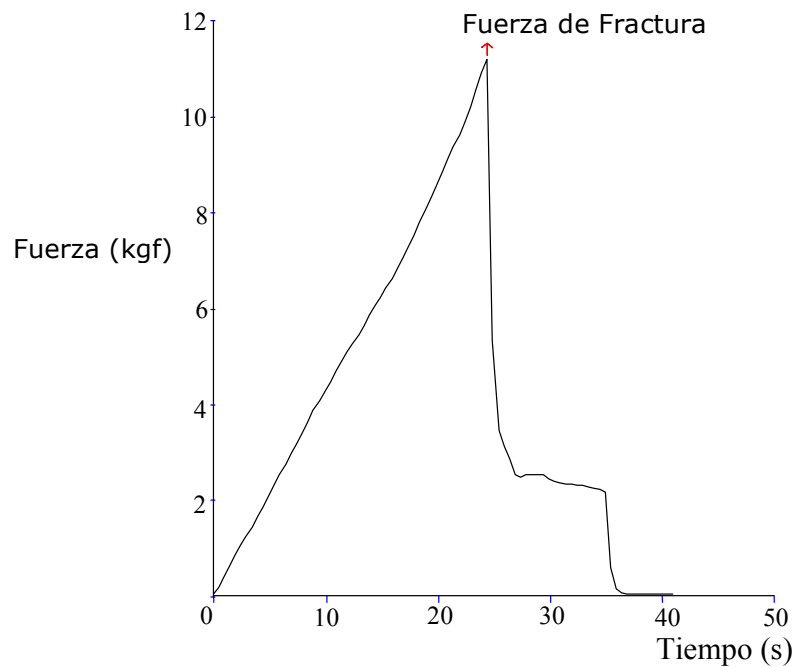


Figura 4. Curva de fractura del tomate de árbol en dirección longitudinal. (Velocidad de carga = 1,0 mm/s)

Figure 4. Curve of fracture of tree tomato in longitudinal direction. (Speed of load = 1,0 mm/s)

En las Figuras 5 y 6, 7 y 8, se observa el comportamiento típico de las pruebas de compresión cuando el tomate de árbol alcanza el punto de fractura superficial, a tasas de deformación de 3 y 6 mm/s. Situación similar ocurrió para una velocidad de carga de 9 mm/s. A partir del análisis de estas curvas, se puede observar que aunque la velocidad no tiene efecto estadístico sobre la fuerza de fractura superficial de tomate de árbol, el tiempo de fractura es menor a medida que se incrementa la velocidad de deformación por compresión.

También se observa que para cada velocidad en particular, la tendencia de variación de la fuerza hasta el punto de ruptura es diferente según el sentido de carga: en el sentido transversal la porción de la curva hasta el punto de fractura tiende a presentar algo de concavidad hacia arriba, mientras que en el

sentido de carga longitudinal esta porción tiende a ser lineal. Estas diferencias en las formas de la curva de flujo del material puede ser originado por la aparición de los dos mecanismos antagónicos de fractura interna y compactación estructural, además de las dimensiones del producto (Calzada y Peleg, 1978).

En forma generalizada para el sentido de carga longitudinal pareciera no existir un aparente predominio de un mecanismo sobre otro, lo que hace una relación casi lineal entre fuerza-deformación. Para la carga en sentido transversal existe un aumento aparente de la resistencia del producto, predominando el mecanismo de compactación de los elementos fracturados produciendo una estructura más densa, situación que se refleja en la concavidad de la curva hacia arriba.

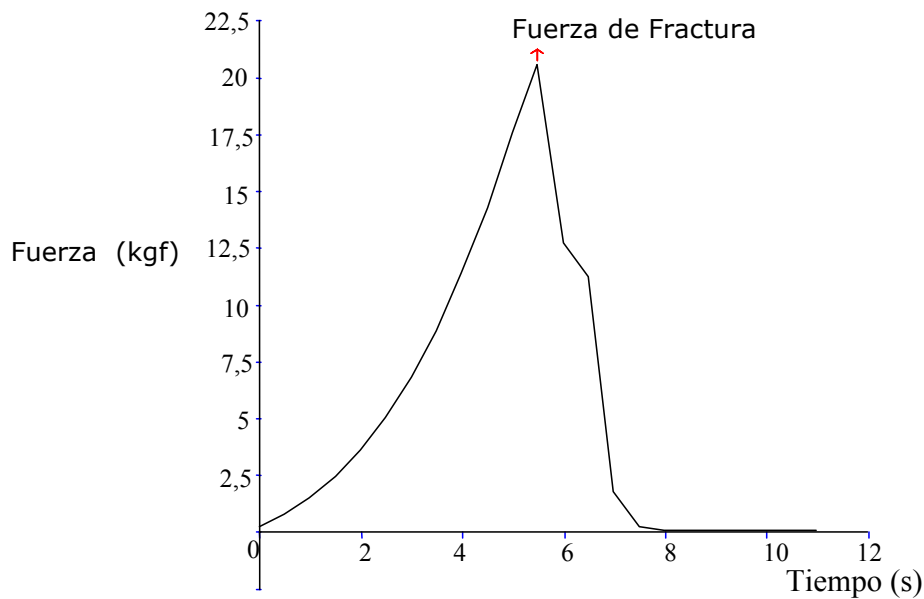


Figura 5. Curva de fractura del tomate de árbol en dirección transversal (Velocidad de carga = 3,0 mm/s)

Figure 5. Curve of fracture of tree tomato in transversal direction. (Speed of load = 3,0 mm/s)

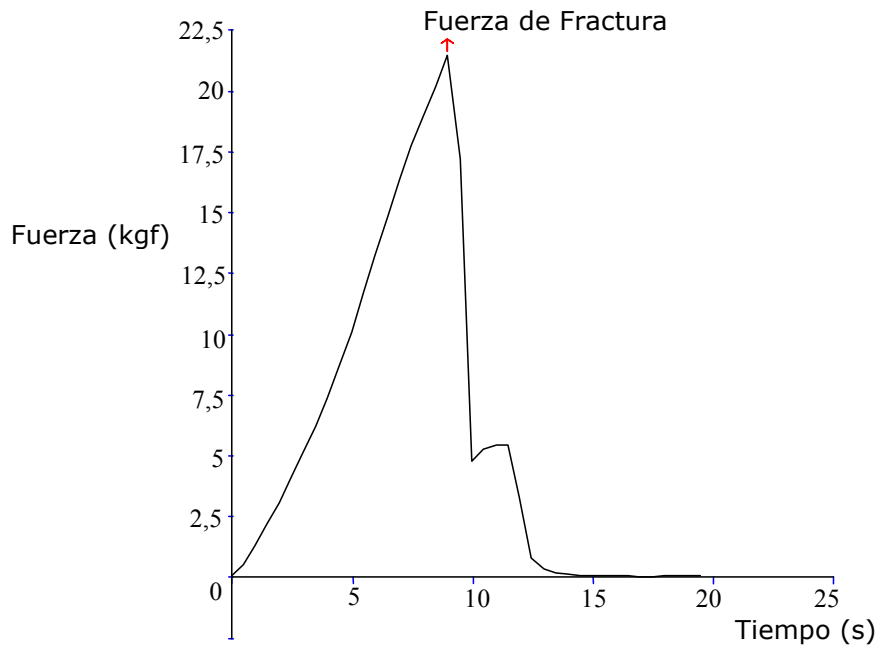


Figura 6. Curva de fractura del tomate de árbol en dirección longitudinal (Velocidad de carga = 3,0 mm/s)

Figure 6. Curve of fracture of tree tomato in longitudinal direction. (Speed of load = 3,0 mm/s)

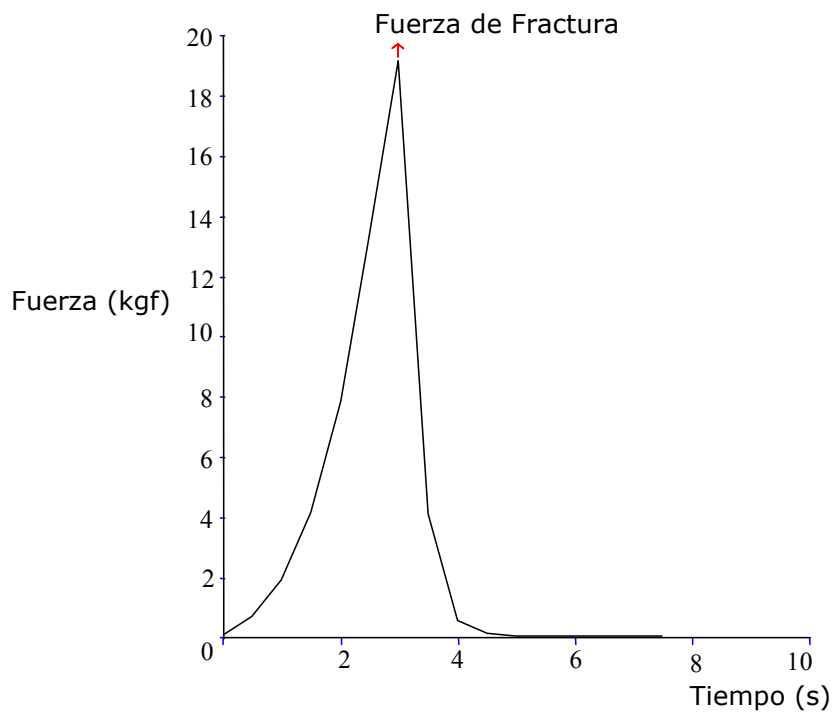


Figura 7. Curva de fractura del tomate de árbol en dirección transversal (Velocidad de carga = 6,0 mm/s)

Figure 7. Curve of fracture of tree tomato in transversal direction. (Speed of load = 6,0 mm/s)

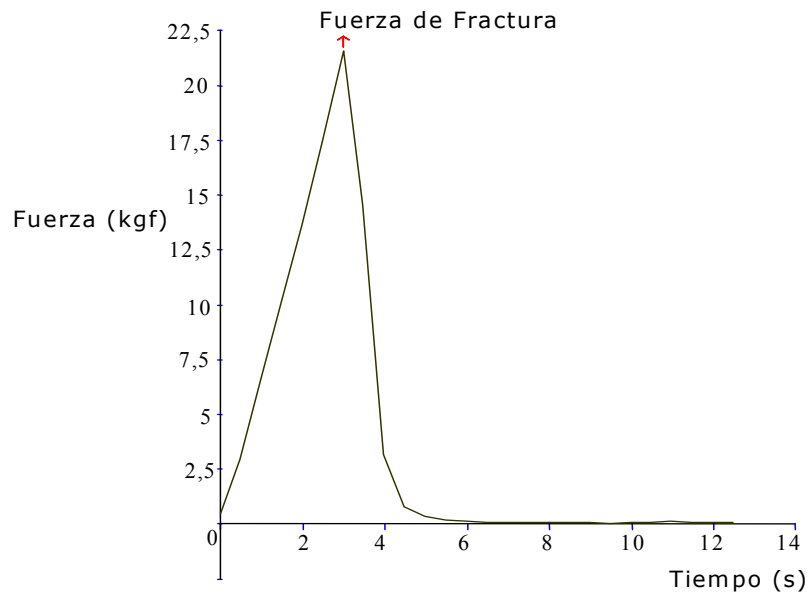


Figura 8. Curva de fractura del tomate de árbol en dirección longitudinal (Velocidad de carga = 6,0 mm/s).

Figure 8. Curve of fracture of tree tomato in longitudinal direction. (Speed of load = 6,0 mm/s)

5. CONCLUSIONES

- Para el tomate de árbol (*Cyphomandra betacea*) y grado de madurez entre 4 y 5, según índice de color, la fuerza de fractura es independiente de la dirección de la carga y toma un valor promedio a ensayos de compresión unidireccional de 1,71 N (16,77 kgf).
- El tomate de árbol puede considerarse como un material biológico frágil, en el cual su punto de biocedencia coincide con el punto de ruptura.
- Para un mismo grado de madurez, la fuerza de fractura en tomates de árbol es independiente de la velocidad de carga a compresión.

6. RECOMENDACIONES

- Desarrollar nuevos ensayos con diferentes grados de madurez con el fin de observar la posible dependencia de la fuerza de fractura con el grado de madurez.

- Analizar la microestructura de la pared de la fruta con el fin de relacionar este aspecto con el comportamiento mecánico a nivel macro.
- Tratar de desarrollar modelos matemáticos, ya sea fundamentales o empíricos que intenten predecir el comportamiento de falla del producto.
- Ya que se trata de una material de naturaleza biológica es indispensable analizar la respuesta del producto teniendo presente variables tales como humedad relativa, temperatura y presión interna (turgencia).

REFERENCIAS

- [1] ABBOTT, J.A. y R. Lu, Anisotropic mechanical properties of apples, *Transactions of the ASAE* 39, 1451-1459, 1996.
- [2] ANDERSON, T.L., Fracture mechanics: Fundamentals and applications, CRC Press, Inc., United States, 793, 2000.

- [3] BOURNE, Malcolm, Food texture and viscosity (Second edition), Academic Press, New York, 427, 2002.
- [4] CALZADA, J.F. y PELEG, M, Mechanical interpretation of compressive stress-strain relationships of solid foods, Journal of food science, 1087-1092, 1978.
- [5] CRAIG, Roy R., Mechanics of materials (Second edition), John Wiley and Sons, New York, 41-43, 1999.
- [6] DIETER, George E., Mechanical Metallurgy (Third edition), Mc-Graw Hill, United States, 241-242, 1986.
- [7] DOWLING, Norman E., Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue (Second edition), Prentice Hall, New Jersey, 1-20, 1998.
- [8] GUTIÉRREZ VÁSQUEZ Albeiro y MILLÁN LÓPEZ, Magda. Manejo Post-Cosecha y comercialización de tomate de árbol (*Cyphomandra betacea*). Fudesco, Armenia (Colombia). pp. 8,10,13 (Capítulo 1);pp.9,11-13 (Capítulo 2),1999.
- [9] KHAN, A.A. y J.F.V. Vincent, Compressive stiffness and fracture properties of apple and potato, *Journal of Texture Studies*, 24, 423-435, 1993.
- [10] MOHSENIN, Nury N., Physical properties of plant and animal materials: structure, physical, characteristics and mechanical properties, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 664, 1986.
- [11] SMITH, William F., Principles of material science and engineering (Third edition), Mc-GrawHill, Estados Unidos, 303-310, 1996.
- [12] STROSHINE, Richard, Physical properties of agricultural materials and food products. West Lafayette, Department of Agricultural and biological Engineering (Purdue University), 113-152, 1999.