

Propiedades dimensionales e inerciales del sistema fruto-pedicelo del mango relacionadas con la cosecha por vibración*

Dimensional and inertial properties of the fruit-stem system of mango related with harvest by vibration

Pedro Ramón Mayans Céspedes^{1§}, Gilberto de Jesús López Cansteñs¹, Eugenio Romanchik Kriuchkova¹ y Luciano Pérez Sobrevilla¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola- Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Texcoco, México. C. P. 56230. Tel: 5959521680. (alelopez10@hotmail.com; eugenior@correo.chapingo.mx; sobrevill2002@hotmail.com). [§]Autor para correspondencia: mayans@correo.chapingo.mx.

Resumen

Para el diseño y operación de máquinas cosechadoras de mango por vibración, es necesario conocer las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-pedicelo, ya que constituyen los datos de entrada para la evaluación de los modelos teóricos empleados en el análisis de la dinámica del sistema, así como su modelación con el fin de conocer los modos y regímenes de vibración más apropiados para el desprendimiento de los frutos. El presente trabajo tiene como objetivo determinar las características dimensionales del sistema fruto-pedicelo del mango (*Mangifera indica* L.) y las propiedades inerciales del fruto. Para ello, se elaboró una metodología y se seleccionaron los medios e instrumentos de medición con las precisiones establecidas en las normas mexicanas. Las mediciones se realizaron en una parcela experimental de mango de la variedad Manila, ubicada en Ídolos, Veracruz; en junio de 2013, obteniéndose los valores medios del diámetro polar, ecuatorial mínimo y máximo del fruto, la longitud y diámetro del pedicelo así como la masa, los momentos de inercia y la densidad volumétrica de los frutos, para tres estadios de maduración. El análisis de varianza mostró que existen diferencias significativas entre las medias para 95% del nivel de significancia en las propiedades para frutos maduros, con maduración

Abstract

For the design and operation of mango harvesting machines by vibration, is necessary to know the physical-mechanical properties of fruit-stem system, since they constitute the input data for the evaluation of the theoretical models used in the analysis of dynamic systems, thus its modeling in order to know the most appropriate modes and regimes of vibration for detachment of fruits. This study aims to determine the dimensional characteristics of fruit-stem system of mango (*Mangifera indica* L.) and the inertial properties of fruit. For this, a methodology was developed and selected the means and instruments of measurement with points established in Mexican standards. The measurements were performed in an experimental plot of Manila mango, located in Idolos, Veracruz; in June 2013, obtaining average values of fruit polar diameter, minimum and maximum equatorial, length and diameter of stem as well as mass, moments of inertia and bulk density of fruits, for three stages of maturation. Analysis of variance showed significant differences between means for 95% level of significance in the properties for ripe fruits, with physiological maturation and greens, which favors the application of vibration regimes that allow fruit to drop according to maturation level.

* Recibido: julio de 2014
Aceptado: diciembre de 2014

fisiológica y verdes, lo que favorece la aplicación de regímenes de vibración que permita la caída de los frutos de acuerdo al nivel de maduración.

Palabras clave: *Mangifera indica* L., frecuencia natural, resonancia, selectividad.

Introducción

El sistema máquina-árbol-fruto es un sistema complejo compuesto de varios subsistemas, uno de los modelos más completos para el estudio de este sistema fue elaborada por Llanes *et al.* (2000) y su aplicación ha sido validada experimentalmente con éxito durante el desprendimiento de frutos por vibración en cítricos, guayaba y café. Al ser acoplado el vibrador a un punto de excitación del árbol, se aplica a éste una fuerza excitadora y como resultado de esta excitación en el punto de aplicación, se generará un movimiento vibratorio originando un desplazamiento del punto de aplicación de la excitación que estará determinado por los parámetros de diseño y operación del equipo vibrador, tales como la masa desbalanceada, masa total del vibrador, frecuencia de las oscilaciones y excentricidad de la masa desbalanceada así como la magnitud y fase de la impedancia mecánica.

Las vibraciones aplicadas al punto de excitación se transmiten a través de la estructura del árbol hasta el subsistema fruto-pedicelo, el estudio de la transmisión de las vibraciones a través de la estructura del árbol es necesario con vista a determinar la amplitud de las vibraciones que excitan al subsistema fruto-pedicelo en diferentes zonas del árbol.

El árbol es sometido a vibraciones forzadas; diferentes puntos de su estructura oscilarán en el estado estacionario con la frecuencia correspondiente a la frecuencia de excitación, dependiendo de la amplitud y fase de las oscilaciones de estos puntos, así será el comportamiento modal que asuma el fruto en el árbol ante esta frecuencia. La transmisión de las vibraciones a la estructura del árbol estará determinado por la amplitud y frecuencia en el punto de excitación, así como las características dimensionales y propiedades físico-mecánicas del árbol, tales como el módulo de elasticidad a la flexión y a la torsión, coeficiente de Poisson, la densidad volumétrica, razón de amortiguamiento, así como los momentos de inercia de las ramas entre otras.

Keywords: *Mangifera indica* L., natural frequency, resonance, selectivity.

Introduction

The tree-fruit-machine system is a complex system composed of several subsystems, one of the most complete models for the study of this system was developed by Llanes *et al.* (2000) and its application has been validated experimentally with success during fruit detachment through vibration in citrus, guava and coffee. Being coupled the vibrator to a excitation point of the tree, an exciting force is applied and as a result of the excitation at the point of application, a vibratory movement is generated causing a displacement of the point of application of excitation that will be determined by design parameters and operation of the vibrating equipment, such as the unbalanced mass, total mass of the vibrator, frequency of oscillations and unbalanced mass eccentricity, thus magnitude and phase of mechanical impedance.

The vibrations applied to the point of excitation are transmitted through tree structure to the fruit-stem subsystem; the study of vibration transmission through tree structure is necessary trying to determine the amplitude of vibrations that excite the fruit-stem subsystem in different zones of the tree.

The tree is subjected to forced vibrations; different points of its structure oscillate in a steady state with the corresponding frequency to the excitation frequency depending on the amplitude and phase of the oscillations of these points, thus is the modal behavior that the fruit in the tree will assume facing this frequency. The transmission of vibrations to tree structure is determined by the amplitude and frequency at the excitation point and the dimensional characteristics and physical-mechanical properties of the tree, such as modulus of elasticity to bending and torsion, Poisson coefficient, bulk density, damping ratio, and moment of inertia of branches among others.

The sinusoidal excitation frequency and the amplitude will cause the oscillation of the fruit-stem subsystem and occurrence of the bending moment in the abscission zone, which must overcome the bending moment required to achieve the detachment of the fruit. The vibration mode

La excitación sinusoidal de la frecuencia y la amplitud provocará la oscilación del subsistema fruto-pedicelo y la aparición del momento flector en la zona de abscisión, que debe superar el momento flector necesario para lograr el desprendimiento del fruto. El modo de vibración que asuma el subsistema fruto-pedicelo estará dado por la amplitud y frecuencia de las oscilaciones y por las propiedades físico-mecánicas tales como el diámetro polar, el diámetro ecuatorial mínimo, el diámetro ecuatorial máximo, el diámetro y longitud del pedicelo, masa del fruto, densidad volumétrica del fruto y los momentos de inercia en el eje menor y en el eje mayor, la rigidez, módulo de elasticidad a la flexión y a la torsión, el coeficiente de Poisson y el momento flector de desprendimiento del pedicelo.

Determinar el comportamiento modal y regímenes de vibración para el desprendimiento de los frutos del mango, constituyen un problema de alta dificultad por tantas variables involucradas. Abordar este estudio experimental requeriría de gran inversión de recursos y tiempo por lo que se recomienda abordarlo mediante la modelación matemática.

La modelación del sistema fruto-pedicelo, ha sido una herramienta utilizada durante las investigaciones relacionadas con la cosecha mecanizada de frutas por vibración desde la década de los 60 (Fridley y Adrián, 1960; Rumsey, 1967; Cooke y Rand, 1969; Varlamov, 1972; Bobeva, 1972). El análisis de la dinámica del sistema fruto-pedicelo, dirigido a determinar la respuesta de frecuencias de dicho sistema cuando es sometido a una excitación armónica ha sido objeto de diferentes modelaciones.

La práctica científica en los últimos años se ha visto modernizada de forma acelerada gracias a los medios de cómputo y de poderosos software de apoyo al diseño asistido por computadoras, así como el análisis por elementos finitos (CAD-3D y FEA) por sus siglas en inglés respectivamente; ponen en manos de los investigadores poderosas herramientas que posibilitan abordar con menos restricciones en la idealización de los fenómenos, temáticas tales como las que se presentan en esta investigación.

La determinación de las propiedades físico-mecánicas de los frutos y del sistema fruto-pedicelo, es una etapa indispensable para determinar los modos de vibración que experimenta este sistema (Cooke y Parchomchuk, 1972). El conocimiento de las propiedades físico-mecánicas es necesaria, con vistas a contar con los datos requeridos para

that fruit-stem subsystem assume is given by amplitude and frequency of the oscillations and for the physical-mechanical properties, such as polar diameter, minimum equatorial diameter, maximum equatorial diameter, diameter and length of stem, fruit mass, bulk density of the fruit and the moments of inertia in the minor and major axis, stiffness, modulus of elasticity at bending and torsion, Poisson's coefficient and bending moment of detachment from stem.

Determine the modal behavior and vibration regimes for detachment of mango fruit, constitutes a problem of high difficulty for the many variables involved. Addressing to this experimental study would require large investment of resources and time so it is recommended to address through mathematical modeling.

Modeling fruit-stem system has been a tool used in research related to mechanical harvesting of fruits by vibration from the 60s (Fridley and Adrian, 1960; Rumsey, 1967; Cooke and Rand, 1969; Varlamov, 1972; Bobeva, 1972). The analysis of the dynamics of the fruit-stem system, designed to determine the frequency response of the system when subjected to a harmonic excitation, has been object of different modeling.

Scientific practice in recent years has been rapidly modernized thanks to computers and powerful software to support computer aided design thus finite element analysis (CAD-3D and FEA) for short English respectively; powerful tools that enable researchers to approach with fewer restrictions in the idealization of phenomena, issues such as those presented in this research.

Determination of physical-mechanical properties of fruit and fruit-stem system is a critical stage to determine the vibration modes that this system experiences (Cooke and Parchomchuk, 1972). Knowledge of physical-mechanical properties is necessary in order to have data required for the simulation of the fruit-stem system, by using CAD-3D software, as well as for the determination of the different modes of vibration from the system using finite element analysis software.

Different physical-mechanical properties of mango have been determined by several authors, as Ramírez *et al.* (2006); Infoagro (2012). In all cases mass, polar diameter and maximum equatorial for some varieties of fruits was determined, however, these properties are insufficient to

la simulación del sistema fruto-pedículo del mango mediante el uso del software CAD-3D, así como para la determinación de los diferentes modos de vibración del sistema utilizando software de análisis por elementos finitos.

Diferentes propiedades físico-mecánicas de los frutos del mango han sido determinadas por varios autores, como Ramírez *et al.* (2006); Infoagro (2012). En todos los casos determinaron la masa, diámetro polar y ecuatorial máximo del fruto para algunas variedades, sin embargo; estas propiedades son insuficientes para aplicar la modelación matemática con vistas a conocer los modos y los regímenes de vibración óptimos que garanticen la cosecha selectiva de los frutos.

Santos (2012), determinó algunas propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-pedículo del mango de la variedad Ataulfo; sin embargo, no tuvo en cuenta los estadios de maduración de los frutos, siendo un aspecto indispensable para el análisis de la selectividad la cosecha mecanizada por vibración.

Materiales y métodos

Determinación de las características dimensionales de los frutos y pedicelos

En la Figura 1 se muestra la acotación de las diferentes magnitudes objeto de medición durante la determinación de las características dimensionales de frutos y pedicelos. Las dimensiones correspondientes a los diámetros de los frutos (d_1 , d_2 , d_3) así como el diámetro medio y longitud del pedicelo (d_p , L_p) se determinaron con un micrómetro digital de precisión ± 0.01 mm. Como quiera que los pedicelos no sean perfectamente cilíndricos se midieron en su parte central como se muestra en la Figura 1.

Materiales y métodos para la determinación de las propiedades inerciales de los frutos

La masa del fruto se determinó con una balanza analítica (Figura 2a) con una precisión ± 0.1 g colocándose los frutos de uno en uno sobre la misma; para la densidad volumétrica los frutos fueron colocados dentro de una probeta graduada con agua (Figura 2b), determinándose el volumen del líquido desplazado por los mismos.

apply mathematical modeling in order to know the modes and regimes to optimal vibration that guarantee selective harvesting of fruits.

Santos (2012) determined some physical-mechanical properties of the fruit-stem system from Ataulfo mango variety; however, did not take into account the stages of fruit ripening, being a prerequisite for the analysis of selectivity for mechanized harvesting by vibration.

Materials and methods

Determination of dimensional characteristics of fruits and stems

Figure 1 shows the measurement of different magnitudes during the determination of the dimensional characteristics of fruits and stems. The corresponding fruit diameters (d_1 , d_2 , d_3) and the average diameter and length of stem (d_p , L_p) measured with a digital micrometer accuracy ± 0.01 mm. Since stems are not perfectly cylindrical, these were measured in the central part as shown in Figure 1.

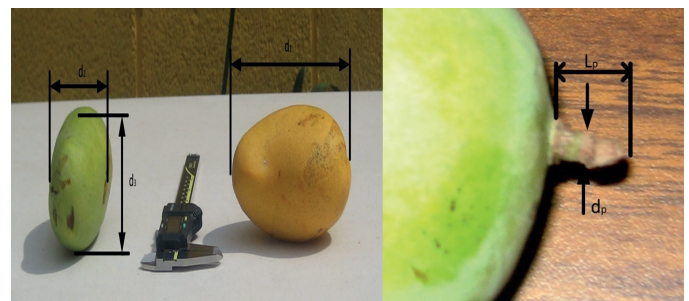


Figura 1. Características dimensionales del sistema fruto-pedículo.

Figure 1. Dimensional characteristics of the fruit-stem system.

Materials and methods to determine inertial properties of the fruits

Fruit mass was determined with an analytical scale (Figure 2a) with an accuracy ± 0.1 g placing one by one the fruits on the scale; for bulk density fruits were placed in a graduated cylinder with water (Figure 2b), determining the volume of liquid displaced thereby.

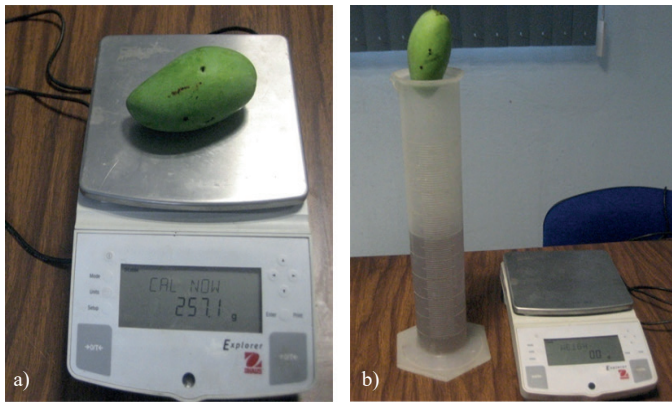


Figura 2. Medición de la masa y densidad volumétrica de los frutos.

Figure 2. Measuring mass and bulk densities of the fruit.

La precisión de la probeta fue de ± 5 mL. La densidad volumétrica se calculó con la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{m}{v} 1000 \quad 1)$$

Donde: ρ = densidad volumétrica de los frutos (kg m^{-3}); m = masa del fruto (g); v = volumen del agua desplazada por el fruto (mL).

El momento de inercia del fruto se obtiene de forma indirecta, para lo cual se confeccionó un péndulo torsional formado por una cuerda de acero para guitarra de 40 cm de longitud y 1 mm de diámetro, del cual pende el fruto de uno de sus extremos (Figura 3), el mango se atraviesa con la cuerda por su centro de masa según los ejes X o Y trazados en dirección del diámetro ecuatorial mínimo y máximo respectivamente, con el fin de determinar el momento de inercia según ambos ejes. El otro extremo libre de la cuerda se fijó a un soporte universal. Una vez compuesto el péndulo, se hace oscilar libremente en el plano XZ o YZ a partir de una desviación inicial de 90° cronometrándose el tiempo invertido en completar 10 oscilaciones libres del sistema.

El momento de inercia (I) para cada muestra se determina utilizando la expresión para la frecuencia de las oscilaciones libres del péndulo torsional.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{I}} \quad 2)$$

Donde: f = frecuencia de las oscilaciones libres (Hz); I = momento de inercia del fruto (N m s^2); k = constante de la cuerda la cual se determina haciendo oscilar un cilindro metálico (Figura 4) de momento de inercia conocido, es decir; el momento del cilindro patrón es:

The accuracy of the graduated cylinder was ± 5 mL. Bulk density was calculated with the following expression:

$$\rho = \frac{m}{v} 1000 \quad 1)$$

Where: ρ = bulk density of fruit (kg m^{-3}); m = mass of fruit (g); v = volume of water displaced by the fruit (mL).

The moment of inertia of the fruit is obtained indirectly, for which was made a torsional pendulum consisting of a steel cord guitar of 40 cm in length and 1 mm diameter, from where the fruit hangs at one end (Figure 3), the mango is pierced with the string through the center of mass according to the X or Y axis in direction of the minimum and maximum equatorial diameter respectively, in order to determine the moment of inertia by both axes. The other free end of the string is attached to a universal support. Once the pendulum ready, is oscillated freely in the XZ or YZ plane from an initial deflection of 90° recording the time invested in fulfilling 10 free oscillations of the system.

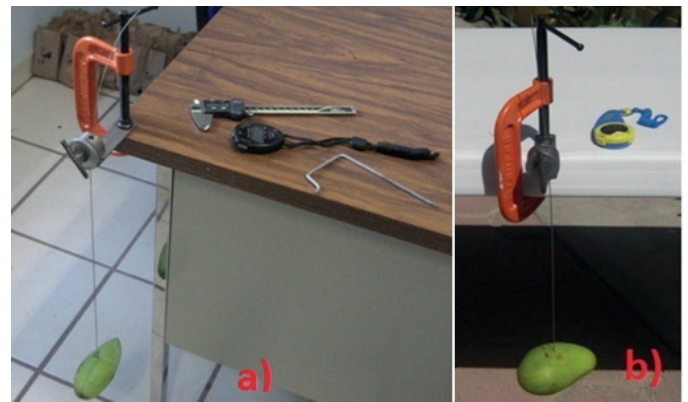


Figura 3. Determinación de los momentos de inercia del fruto: a) según el eje Y; y b) según el eje X.

Figure 3. Determination of the moments of inertia of fruit: a) along Y axis; and b) along X axis.

The moment of inertia (I) for each sample is determined using the expression for the frequency of free oscillations of the torsional pendulum.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{I}} \quad 2)$$

Donde: f = frecuencia de las oscilaciones libres (Hz); I = momento de inercia del fruto (N m s^2); k = constante de la cuerda la cual se determina haciendo oscilar un cilindro metálico (Figura 4) de momento de inercia conocido, es decir; el momento del cilindro patrón es:

$$I_c = \frac{1}{2} m_c r_c^2 \quad (3)$$

Donde: I_c = momento de inercia del cilindro patrón ($N\ m\ s^2$); r_c = radio del cilindro (m); m_c = masa del cilindro (kg).

Los valores de la masa y radio del cilindro fueron de 0.2188 kg y 0.018 m respectivamente que al sustituirlos en (3) da un momento de inercia de 0.000035445 $N\ m\ s^2$. La frecuencia de las oscilaciones libres del cilindro se obtienen experimentalmente a partir del periodo T de oscilaciones libres (Figura 3), después de sucesivas repeticiones, el periodo de una oscilación libre es de 1.25 s. Conociendo que la frecuencia de oscilaciones libres es el inverso del periodo se tiene que:

$$f = \frac{1}{T} = 0.8\ \text{Hz}$$

Con el resultado anterior y despejando la constante k de la cuerda de la expresión (2); se tiene finalmente que:

$$k = I_c 4\pi^2 f^2 \quad (4)$$

Sustituyendo los valores de I_c y f en la expresión (4) se obtiene una constante de la cuerda de 0.000895564 N m. Con el valor de la constante de la cuerda y las oscilaciones libres de los frutos, se sustituye en la expresión (2) obteniéndose los momentos de inercia en los ejes X y Y. El periodo de las oscilaciones libres se midió con un cronometro con precisión de ± 0.01 s.

Resultados y discusión

Los resultados de las mediciones de las propiedades físico-mecánicas (PFM) objeto de estudio fueron procesados estadísticamente por el paquete Statical Analys System (SAS) versión 8.0, Statgraphics Plus versión 5.1 y Microsoft Excel versión 2010, obteniéndose para cada PFM determinada experimentalmente en los tres estadios de maduración los valores medios (\bar{x}), error estándar de la media (e), desviación típica (σ) y el coeficiente de variación (cv); además se construyeron las curvas variacionales de distribución. Adicionalmente se efectuó la prueba de Tukey para detectar diferencias significativas entre los valores medios de cada propiedad en los tres estadios de maduración. En el Cuadro 1 se muestran los resultados del análisis de varianza para las diferentes propiedades objeto de estudio de acuerdo al estadio de maduración.

Where: f = frequency of free oscillations (Hz); I = moment of inertia of the fruit ($N\ m\ s^2$); k = constant of the string which is determined by oscillating a metal cylinder (Figure 4) of known moment of inertia, that is; the cylinder moment pattern is:

$$I_c = \frac{1}{2} m_c r_c^2 \quad (3)$$

Where: I_c = moment of inertia of the cylinder pattern ($N\ m\ s^2$); r_c = radius of the cylinder (m); m_c = mass of the cylinder (kg).



Figura 4. Péndulo torsional para determinar el momento de inercia del cilindro patrón.

Figure 4. Torsional pendulums to determine the moment of inertia of the cylinder pattern.

The values of mass and radius of the cylinder were 0.2188 kg and 0.018 m respectively and by replacing it in (3) gives a moment of inertia of 0.000035445 $N\ m\ s^2$. The frequency of free oscillations of the cylinder are obtained experimentally from free oscillation period T (Figure 3), after successive iterations, the free oscillation period is 1.25 s. Knowing that free oscillation frequency is the inverse of the period we have:

$$f = \frac{1}{T} = 0.8\ \text{Hz}$$

With the above result and solving for the constant k of the string from the expression (2); we have:

$$k = I_c 4\pi^2 f^2 \quad (4)$$

Substituting the values of I_c and f in expression (4) a string constant of 0.000895564 N m is obtained. With the value of the string constant and the free oscillation of the fruit, are replaced in expression (2) to obtain the moments of inertia in X and Y axes. The period of free oscillations was measured with a stopwatch with an accuracy of ± 0.01 s.

Cuadro 1. Prueba de Tukey para las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-pedicelo del mango de la variedad Manila en tres estadios de maduración.

Table 1. Tukey test for physical-mechanical properties of the fruit-stem system of Manila mango variety in three stages of ripening.

Propiedad físico-mecánica	UM	Estadios de maduración		
		Maduros	MF	Verdes
Diámetro polar del fruto (d_1)	mm	123.73 a	120.01 a	101.09 b
Diámetro ecuatorial mínimo del fruto (d_2)	mm	61.73 a	59.71 a	53.12 b
Diámetro ecuatorial máximo del fruto (d_3)	mm	72.29 a	68.37 a	60.12 b
Diámetro medio del pedicelo (d_p)	mm	3.56 a	2.82 b	2.7 b
Longitud del pedicelo (L_p)	mm	10.07 a	9.30 ba	8.3 b
Masa del fruto (m)	g	307.1 a	260.9 b	192.3 c
Momento de inercia del fruto respecto al eje menor (I_x)	kg mm ²	270.35 a	231.08 a	142.47 b
Momento de inercia del fruto respecto al eje mayor (I_y)	kg mm ²	260.78 a	221.92 a	137.09 b
Densidad volumétrica del fruto (ρ)	kg m ⁻³	1078.7 a	1033.7 ba	1003.6 b

UM= unidad de medida; medias con la misma letra no son significativamente diferente; MF= maduración fisiológica.

En el Cuadro 1 se puede observar que el diámetro polar, ecuatorial mínimo y ecuatorial máximo de los frutos va aumentando desde los verdes a maduros, existiendo de acuerdo a la prueba de Tukey diferencias significativas para 95% de nivel de significancia entre los valores de estos parámetros para frutos verdes con relación a frutos con maduración fisiológica (pintones) y maduros. El incremento de estas dimensiones influye sobre la frecuencia natural de vibraciones del sistema fruto-pedicelo (SFP) en el sentido de su disminución lo que favorece los posibles índices de selectividad, ya que al seleccionar los regímenes de vibración óptimos produciría sólo la caída de los frutos maduros y pintones. En el cuadro 1 se aprecia una disminución del diámetro medio del pedicelo que va desde los frutos maduros a verdes, existiendo diferencias significativas entre los valores medios de los frutos maduros con respecto a pintones y verdes.

Este comportamiento pudiera favorecer la cosecha selectiva del mango por vibración, ya que los pedicelos gruesos están asociados a valores de frecuencias naturales relativamente altas, con relación a pedicelos más delgados; lo cual estaría a favor de hallar diferencias entre las frecuencias naturales en sistemas frutos-pedicelos con diferentes niveles de maduración. En cuanto a la longitud de los pedicelos se observa un incremento en los mismos que van desde los verdes a maduros, existiendo diferencias significativas entre la longitud de los pedicelos correspondiente a frutos maduros y verdes.

Results and discussion

The results of measurements of the physical-mechanical properties (PFM) under study were statistically processed by the Statical Analys System (SAS) version 8.0, Statgraphics Plus version 5.1 and Microsoft Excel 2010 version 2010, obtaining for each specific PFM experimentally determined in three stages of ripening, the mean values (\bar{x}), standard error of the mean (e), standard deviation (σ) and the coefficient of variation (cv); in addition variational distribution curves were constructed. Additionally Tukey test was performed to detect significant differences between the mean values of each property in the three stages of ripening. Table 1 shows the results of analysis of variance for different properties under study according to the stage of ripening.

In Table 1, it can be seen that the polar diameter, equatorial minimum and equatorial maximum of fruit increases from green to mature, existing, according to Tukey test significant differences for 95% level of significance between the values of these parameters for green fruits regarding physiological maturity (half-ripe) and mature. The increase of this dimensions influences the natural frequency of vibration from the fruit-stem system (SFP) regarding to its decrease which favors the potential selectivity index, as selecting optimal vibration regimens will produce the falling of ripe fruits and half ripe. Table 1 show a decrease in the average

Esta característica puede incidir favorablemente en la diferenciación de las frecuencias naturales de vibración de estos dos estadios de maduración, ya que pedicelos cortos (frutos verdes) necesitan de frecuencias naturales más altas para el desprendimiento del fruto que pedicelos más largos (frutos maduros). Sin embargo; la influencia de este parámetro sobre la frecuencia natural del SFP es contrario al diámetro del pedicelo por lo que se contrarrestan los efectos.

Con relación a la masa de los frutos se aprecian diferencias significativas entre sus valores medios para los tres estadios de maduración incrementándose del verde al maduro en orden ascendente. El aumento de esta propiedad influye sobre la frecuencia natural de vibración del SFP, en el sentido de su disminución, coincidiendo en la tendencia de la longitud de los pedicelos y las dimensiones del fruto lo que favorece posibles indicadores de selectividad. Con relación a la densidad másica del fruto, en el Cuadro 1 se aprecia un incremento del valor medio de esta propiedad con la maduración del fruto. Esta característica favorece la disminución de la frecuencia natural del SFP con los frutos maduros, influyendo sobre ésta en la misma dirección que la longitud de los pedicelos y las dimensiones del fruto. Esta situación favorece la existencia de condiciones propicias para elevar los indicadores de selectividad de la cosecha.

Con respecto a los momentos de inercia respecto al eje mayor y menor puede observarse que ambos aumentan a medida que el fruto madura, existiendo diferencias significativas entre los valores de los frutos verdes con relación a los maduros y pintones, lo que indica que posibles diferencias en las frecuencias propias de vibración. El efecto de la variación de los momentos de inercia sobre las frecuencias naturales del SFP, presenta un comportamiento similar al que provoca la masa de los frutos, por lo que la tendencia de variación influye positivamente sobre la presencia de condiciones favorables para la cosecha selectiva del mango.

En el Cuadro 2 están reflejados los valores de los estadígrafos de aquellas propiedades físico-mecánicas determinadas experimentalmente, observándose que en lo general el error estándar de la media y el coeficiente de variación van aumentando desde los frutos maduros a los verdes. Esta variación de los valores observados en las mediciones de los frutos verdes, se debe a que éstos se encuentran en diferente etapa de crecimiento y desarrollo, siendo un aspecto a considerar en la selección de la amplitud y frecuencia de las vibraciones, que permita sólo la caída de frutos maduros cuando la cosecha se realice con vibradores inerciales.

diameter of the stem that goes from ripe to green fruits, with significant differences between the mean values of the ripe fruit regarding half-ripe and green.

This behavior could favor selective harvesting of mango by vibration, since thick stems are associated with relatively high values of natural frequencies, compared to thinner stems; which would be in favor of finding differences between natural frequencies in fruit-stem systems with different levels of maturity. Regarding length of stem, it can be seen an increase thereof that go from green to mature, with significant differences between the length of the stem corresponding to mature and green fruits.

This feature can favorably affect the differentiation of natural frequencies of vibration of these two stages of ripening, since short stems (green fruit) need higher natural frequencies for detachment of the fruit than longer stems (ripe fruit). However; the influence of this parameter on natural frequency of SFP is contrary to the diameter of the stem, so the effects cancel.

Regarding the mass of the fruits significant differences between the mean values for the three stages of ripening green increasing from green to mature in ascending is appreciated. The increase of this property affects the natural frequency of vibration of SFP, regarding its decrease, coinciding in tendency of length stem and fruit dimensions, favoring potential selectivity indicators. Regarding to mass density of the fruit, in Table 1 can be seen an increase of the average value of this property with fruit ripening. This characteristic favors to reduce the natural frequency of SFP with ripe fruit, influencing on it the same direction as length of stem and fruit dimensions. This situation favors the existence of favorable conditions to increase selectivity indicators of harvest.

The moments of inertia regarding the major and minor axis, can be seen that both increase as fruit matures, having significant differences between values of green fruits in relation to ripe and half-ripe, indicating possible differences in natural vibration of frequencies. The effect of variation of the moments of inertia on natural frequencies of SFP, show a similar behavior as that by fruit mass, so that the trend of variation affects positively on favorable conditions for selective harvesting of Mango.

In Table 2 are reflected the statistical values of those physical-mechanical properties determined experimentally, showing that standard error of mean and coefficient of variation are increasing from ripe to green fruits. This variation of the values observed in the measurements of green fruit, is because this are in different stages of growth and development,

Cuadro 2. Valores de los estadígrafos de las características dimensionales del sistema fruto-pedículo e inerciales del fruto para tres estadios de maduración.

Table 2. Statistical values of dimensional characteristics of fruit-stem system and inertial for three stages of fruit ripening.

PFM	Maduros				Maduración fisiológica				Verdes			
	x	e	σ	cv	x	E	σ	cv	x	e	σ	cv
d ₁	123.73	1.54	8.45	6.83	120.01	2.33	12.79	10.66	101.09	3.96	21.67	21.44
d ₂	61.73	0.75	4.09	6.63	59.71	0.81	4.45	7.45	53.12	1.69	9.25	17.42
d ₃	72.29	1.02	5.57	7.7	68.37	0.89	4.88	7.14	60.12	2.02	11.04	18.37
d _p	3.56	0.06	0.34	9.48	2.82	0.06	0.32	11.42	2.7	0.09	0.51	19.04
L _p	10.07	0.46	2.5	24.86	9.3	0.31	1.68	18.04	8.3	0.16	0.91	10.92
m	307.1	11.83	64.8	21.1	260.9	10.27	56.27	21.56	192.03	16.33	89.44	46.51

PFM= propiedades físico-mecánicas; d₁= diámetro polar del fruto; d₂= diámetro ecuatorial mínimo del fruto; d₃= diámetro ecuatorial máximo del fruto; d_p= diámetro medio del pedicelo; L_p= longitud del pedicelo; m= masa del fruto; x= valores medios; e= error estándar de la media; σ = desviación típica; cv= coeficiente de variación (%).

De las Figuras 5 a 10 se muestran las curvas variacionales de distribución de aquellas propiedades físico-mecánicas, que fueron determinadas experimentalmente en los tres estadios de maduración, en las mismas se observa que en todos los casos la media se encuentra en la proximidad del punto de mayor frecuencia, dándole un fuerte soporte desde el punto de vista estadístico a los resultados de las mediciones. Además la disposición de dichas curvas en los tres estadios de maduración, permite establecer estrategias sobre la elección de los regímenes de vibración, ya que cuando las curvas de determinada propiedad están superpuestas, tiene el mismo efecto ante un valor dado de amplitud y frecuencia de excitación, mientras que si están separadas el comportamiento es diferente.

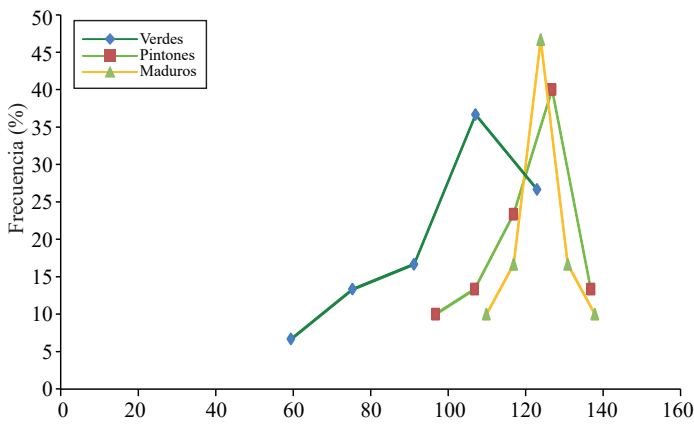


Figura 5. Curvas variacionales de los diámetros polar de los frutos.
Figure 5. Variational curves of polar diameters of the fruit.

being an aspect to consider in the selection of amplitude and frequency of vibrations, allowing only ripe fruits to fall when the harvest is performed with inertial vibrators.

From Figures 5 to 10 are shown variational distribution curves of those physical-mechanical properties, which were determined experimentally in the three stages of ripening, therein it is seen that in all cases the mean is in the vicinity of the point of higher frequency, giving a strong support from the statistical point of view to measurement results. Also the arrangement of the curves in the three stages of maturity, allows establishing strategies on choosing vibration regimes, since certain property curves are overlapped, has the same effect with a given value of amplitude and excitation frequency, whereas if separated the behavior is different.

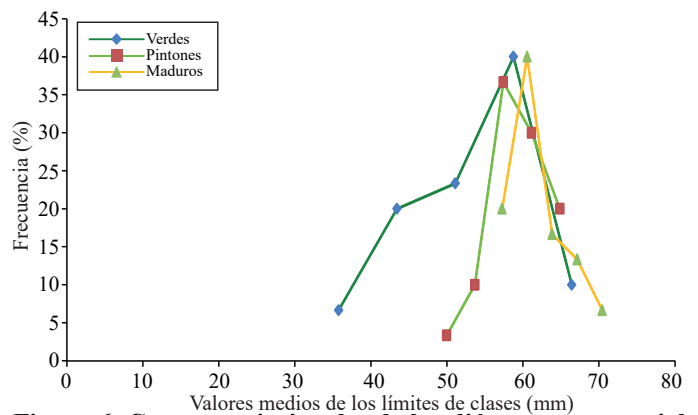


Figura 6. Curvas variacionales de los diámetros ecuatorial mínimo de los frutos.
Figure 6. Variational curves of minimum equatorial diameter of the fruits.

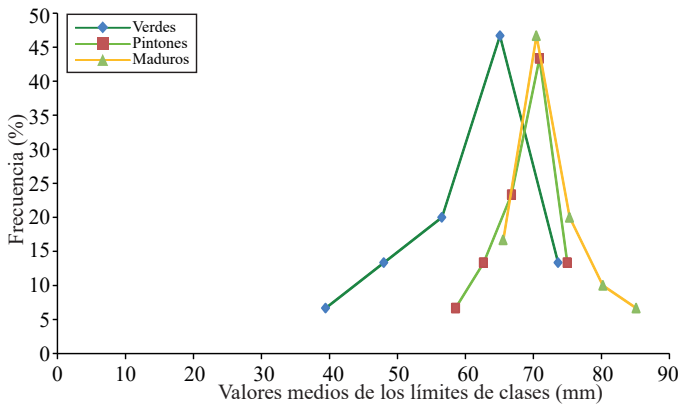


Figura 7. Curvas variacionales de los diámetros ecuatorial máximos de los frutos.

Figure 7. Variational curves of maximum equatorial diameter of the fruits.

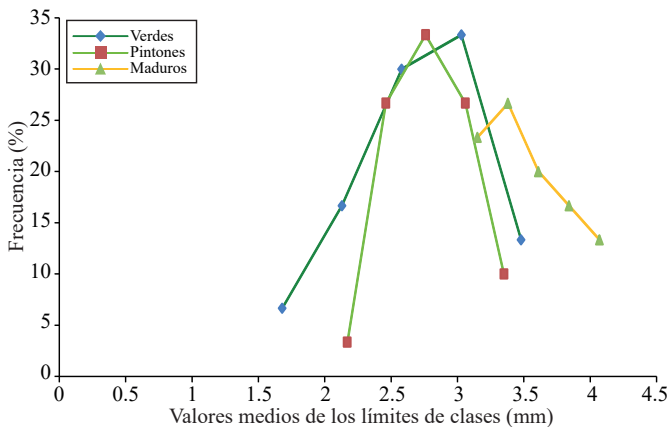


Figura 8. Curvas variacionales de los diámetros medio del pedicelo.

Figure 8. Variational curves of average diameter of stem.

Conclusiones

Los valores medios del diámetro del pedicelo fueron de 2.71, 2.82 y 3.56 mm para frutos verdes, pintones y maduros respectivamente; mientras que la longitud alcanzó valores medios de 8.29, 9.3 y 10.07 mm de acuerdo al orden de maduración antes señalado.

En sentido general se apreció diferencias significativas en las propiedades objeto de estudio con relación a frutos verdes y maduros. La variación con la maduración de los frutos de sus valores medios de la mayor parte de las propiedades estudiadas, influye en la disminución de las frecuencias naturales de los sistemas con frutos maduros, lo cual incide positivamente en la existencia de condiciones favorables para la cosecha selectiva por vibración.

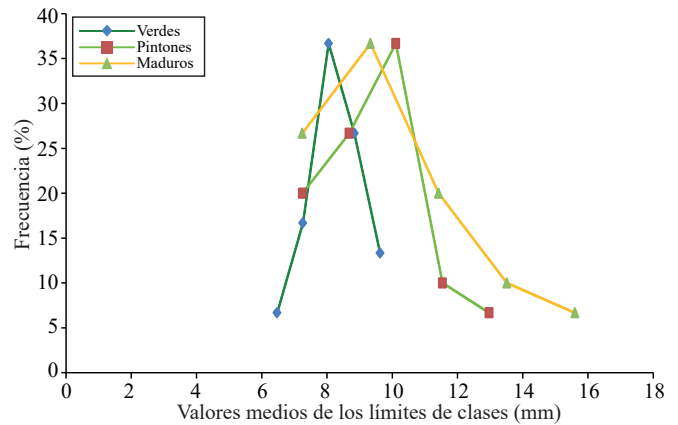


Figura 9. Curvas variacionales de la longitud del pedicelo.

Figure 9. Variational curves of the length of stem.

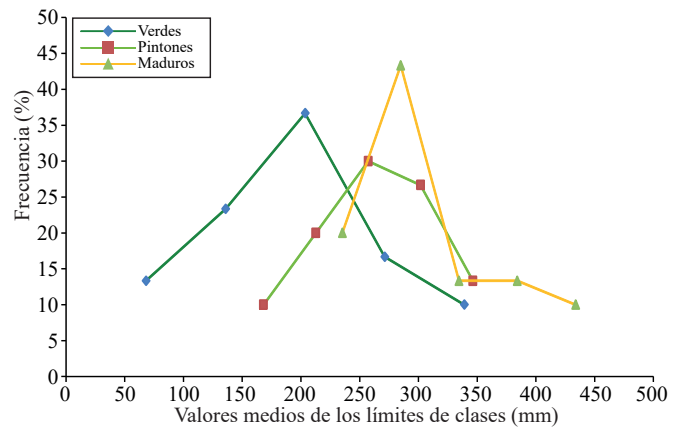


Figura 10. Curvas variacionales de la masa de los frutos.

Figure 10. Variational curves of fruit mass.

Conclusions

The mean diameter values of stem were 2.71, 2.82 and 3.56 mm for green, half ripe and ripe fruits, respectively; while length reached average values of 8.29, 9.3 and 10.07 mm according to ripening order mentioned above.

Overall significant differences were observed in the properties under study in relation to green and ripe fruit. The variation in ripening fruits influences in the decrease of natural frequencies of systems with ripe fruit, which affects positively in the existence of favorable conditions for selective harvesting by vibration.

The mean values of the moment of inertia of the fruits regarding the minor axis were 142.4, 231.1 and 270.3 kg mm² for green fruit, half ripe and ripe respectively; while

Los valores medios del momento de inercia de los frutos con respecto al eje menor fueron de 142.4, 231.1 y 270.3 kg mm² para frutos verdes, pintones y maduros respectivamente; mientras que el momento de inercia con relación al eje mayor tomo valor es de 137.1, 221.9 y 260.8 kg mm² en referencia al orden de maduración antes señalado.

the moment of inertia regarding to the major axis took value of 137.1, 221.9 and 260.8 kg mm² for green fruit, half ripe and ripe respectively.

End of the English version



Literatura citada

- Bobeva, M. 1972. Isledovanie otiskivaneto na malinovite plodove pri vibrirane. Sielskoskostonpanstva Tejnika, I, Sofia.
- Cooke, J. R. and Rand, R. H. 1969. Vibratory fruit harvesting: a linear theory of fruit-stem dynamic. J. Agric. Eng. 14(3):195-200.
- Cooke, J. R. and Parchomchuk, P. 1972. Vibratory harvesting: an experimental analysis of fruit-stem dynamics. Transactions of the ASABE. 15(4):598-603.
- Fridley, R. B. and Adrian, P. A. 1960. Some aspects of vibratory fruit harvesting. J. Agric. Eng. 41:28-31.
- InfoAgro. 2012. El cultivo del mango I y II parte. URL: <http://www.infoagro.com/>.
- Llanes, O. 2000. Determinación de los parámetros de diseño de vibradores inerciales de ramas para la cosecha mecanizada de cítricos. Tesis doctoral en ciencia técnicas. Universidad Agraria de la Habana, Cuba. 101 p.
- Rumsey, J. W. 1967. Response of citrus-stem system to fruit removing actions. MSc Tesis. University Arizona. Tucson. E. U.
- Ramírez, V. J.; Pérez, F. J. A.; Sáinz, R. R. A.; Quiñonez, F. J. A. y Ramos, B. Y. M. 2006. Cultivo, enfermedades y plagas del mango: sistemas convencional y orgánico. Gobierno de Sinaloa. México. 256 p.
- Santos, H. A. M. 2012. Diseño y construcción de un dispositivo cosechador de mango. Tesis de maestría. Posgrado en Ingeniería y uso Integral del Agua. Chapingo, México. 98 p.
- Varlamov, G. P. 1972. Determinación de los regímenes de trabajo de una máquina vibradora para la recogida de frutos. Trabajos del VISJOM. Vol.71, Moscú.