

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LOS SISTEMAS DE ACOPLE EN LOS VIBRADORES INERCIALES DE TALLO PARA CAFÉ

Federico García Uribe¹; Fernando Álvarez Mejía²; Carlos Eugenio Oliveros Tascón³; Iván Darío Aristizábal Torres⁴;

RESUMEN

*La vibración del tallo es una alternativa promisoría para la recolección mecanizada selectiva del café. En estudios realizados en CENICAFÉ, se ha observado que es posible desprender más del 60% de los frutos maduros del árbol con menos de 10% de inmaduros en la masa cosechada en menos de 15 segundos, 6,3% del tiempo empleado por un recolector en cosecha manual tradicional. Sin embargo, en estos estudios también se observó que el daño mecánico en la corteza del cafeto, en la zona de acople, en la mayoría de los árboles vibrados podría facilitar enfermedades como la producida por el hongo *Cetatoscystis fimbriata*, que ocasiona la muerte de un alto porcentaje de ellos. En este estudio se generó información necesaria para el diseño y operación de sistemas de acople de vibradores del tallo, que transmitan eficientemente la energía generada por la vibración, sin ocasionar daños en la corteza. El trabajo se dividió en dos etapas: en la primera, de laboratorio, se determinó el esfuerzo radial admisible ($\sigma_{R Adm}$) de la corteza para tres edades del árbol (48, 60 y 72 meses), utilizando una máquina para deformación controlada de materiales y mediante estudios histológicos (a nivel de tejidos). La segunda etapa, evaluación del sistema de acople, consistió de: medición de la transmisión de la vibración*

¹ Ingeniero Agrícola, Profesional Básico, Centro Nacional de Investigaciones de Café. CENICAFÉ. Chinchiná, Caldas, Colombia.

² Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. A.A.1779. Medellín, Antioquia, Colombia.

³ Ingeniero Agrícola. Investigador Principal I. Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFÉ. Chinchiná, Caldas, Colombia.

⁴ Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. A.A. 1779, Medellín, Antioquia, Colombia.

del sistema de acople utilizando acelerómetros y un sistema para la adquisición de datos para el procesamiento de señales; evaluación del daño mecánico visible y al nivel de tejidos en condiciones normales de operación del vibrador, utilizando películas desarrolladas, para medir presión de contacto que permitieron conocer la distribución y magnitud de la presión en la zona de sujeción del vibrador. Los resultados obtenidos, para una presión de sujeción de 10341 kPa (1500 psi), indican que el esfuerzo radial admisible ($\sigma_{R adm}$) para las tres edades estudiadas (48, 60 y 72 meses) fue 2068,2 kPa (300 psi), el daño mecánico visible y al nivel de tejidos fue del 0% y la transmisión de la vibración con el sistema de acople propuesto fue superior al 80%.

Palabras Claves: Café, cosecha mecánica, vibradores inerciales de tallo, sistemas de acople, daño mecánico, transmisión de la vibración, esfuerzo admisible, corteza.

ABSTRACT

Determination of the design parameters for the shaker-clamp system in the inertial trunk shakers for coffee

The trunk shaking is a promising alternative for the selective mechanical harvesting of coffee. In studies carried out in Cenicafé, it was observed that it is possible to detach more than 60% of ripe coffee berries with less than 10% immature coffee berries in the harvested mass in less than 15 seconds, 6,3% of the time required by a picker in the traditional manual harvesting. In those studies it was also observed that mechanical damage in the coffee bark, in the shaker-clamp zone, in the majority of the shaking trees could facilitate the entrance of diseases such as *Ceratocystis fimbriata* fungus which causes the tree's death a high percentage of the time. This research has generated the necessary information for the design and operation of trunk shaker-clamp systems to efficiently transmit the vibration yet avoid mechanical damage in the bark of the coffee tree. The research was divided into two parts. In the first, in the laboratory, the admissible radial stress ($\sigma_{R Adm.}$) of the coffee bark for three ages of trees (48, 60 and 72 months), using a universal machine (INSTRON 5569) for controlled deformation and by means of histology studies (at the tissue level) was determined. The second part, the shaker-clamp system evaluation, consisted of: the measurement of the vibration transmission in the shaker-clamp system using accelerometers, data acquisition system to process the vibration signals, evaluation of the visible mechanical damage and at tissue level in normal conditions of operation of the shaker, using films developed to measure the contact pressure in order to know the pressure distribution and their magnitude in the shaker-clamp zone. The obtained results, for the shaker-clamp system evaluated at 10341 kPa (1500 psi) show that the radial admissible stress ($\sigma_{R adm}$) for the ages of trees considered (48, 60 and 72 months) was 2068,2 kPa (300 psi), the visible mechanical damage and at tissues level was 0% and the transmission of the vibration with the shaker-clamp system developed was higher than 80%

Keywords: Coffee, mechanical harvest, inertial trunk shakers, shaker-clamp system, mechanical damage, transmission of vibrations, admissible stress, bark

INTRODUCCIÓN

El café colombiano ha sido considerado como el mejor café suave del mundo; es apetecido en los mercados internacionales por su alta calidad de taza (aroma y sabor).

Para obtener esta alta calidad es necesario el uso de gran cantidad de mano de obra, razón por la cual la recolección del café se ha convertido en la mayor generadora de empleo de mano de obra no calificada. En diversos estudios realizados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, se ha determinado que los costos de la cosecha representan cerca del 30% al 40% de los costos totales de la producción de café, y en comparación con otros países productores como Australia, Brasil, algunos países asiáticos como Vietnam, y países centroamericanos, como Costa Rica, el país posee unos costos de producción elevados; en estos países o la mano de obra es de relativo bajo costo o han recurrido a alternativas como la mecanización de la cosecha.

La tecnificación del café en Colombia ha sido una labor lenta y complicada, ya que las condiciones culturales (tradición), topográficas (terrenos agrestes, altas pendientes), la no-uniformidad de las floraciones y la variedad de climas se han convertido en las mayores restricciones para llevar una tecnología mecanizada para la cosecha del café.

Desde 1996, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, a través de su Centro de Investigaciones de Café,

(Cenicafé), emprendió el proyecto “Disminución en costos de la cosecha de café mediante la mecanización y la cosecha manual asistida”, con el fin de disminuir los costos de producción de café, de modo que hagan la caficultura más competitiva en el mercado internacional y más rentable para el productor cafetero. Para tal fin, se han abordado diferentes frentes tecnológicos, desde la optimización de la cosecha manual hasta el desarrollo de cosechadores mecánicos (vibradores de tallo, de follaje, batidores neumáticos, o impactadores de ramas).

En particular, las máquinas que aplican vibraciones al tallo se han convertido en Estados Unidos y en Europa, en una alternativa tecnológica, económica y de gran rendimiento para cosechar mecánicamente diversos frutos tales como cítricos, olivos, almendras y nueces.

Los principales problemas fisiológicos y fitosanitarios observados en la mecanización de la cosecha con aplicación de vibraciones al tallo, representan importantes pérdidas económicas al cultivo, la disminución de la productividad y la muerte prematura de los árboles (Brown; Rauch y Timm, 1988).

En particular, las máquinas que aplican vibraciones al tallo se han convertido en Estados Unidos y en Europa, en una alternativa tecnológica, económica y de gran rendimiento para cosechar mecánicamente diversos frutos tales como cítricos, olivos, almendras y nueces en la mecanización de la cosecha con aplicación de

vibraciones al tallo, representan importantes pérdidas económicas al cultivo, la disminución de la productividad y la muerte prematura de los árboles (Brown; Rauch y Timm, 1988)

REVISIÓN DE LITERATURA

El sistema de acople es uno de los componentes de un vibrador inercial; básicamente las funciones de un sistema de acople son: transmitir la vibración generada en la máquina, y al mismo tiempo evitar el daño a la corteza del árbol o al mismo tallo. El daño mecánico es una alteración física en la estructura del árbol como consecuencia de la mecanización.

Autores como Ortiz (1989), afirman: con la recolección mecánica hay un aumento entre el 5% y el 20% más de daño mecánico que con la recolección manual. Otros autores como: Adrian y Fridley (1964), Cargill; Brown y Bukovac (1982) y Ortiz (1989), asocian la incidencia del daño mecánico a tres factores: factores agro-climáticos, factores humanos y factores de diseño.

El factor más importante que incide en la ocurrencia del daño mecánico es el factor de diseño, pero los otros dos factores deben ser tenidos en cuenta al momento de diseñar un sistema de sujeción o acople.

Factores agro-climáticos: se deben tener en cuenta la especie y la variedad a vibrar, la edad y humedad del árbol y del suelo en el momento de cosechar.

Factores humanos: Errores humanos debidos a la falta de concentración del operario del vibrador en el momento

del centrado en el árbol o a la falta de capacitación en el manejo del equipo.

Factores de diseño: se han identificado dos situaciones que inciden en el daño mecánico debido a un diseño inapropiado del sistema de acople del vibrador. Una de estas situaciones se presenta durante el acople del vibrador al árbol, y la otra durante la vibración. Si durante el acople del vibrador se sujeta al árbol con una presión excesiva (por encima de su límite admisible), ocasionará daño en la corteza del árbol pudiéndole causar hasta la muerte del árbol. Durante la vibración se generan ciertos desplazamientos debidos al tipo de vibración; en la vibración con patrones multidireccionales la cabeza vibratoria tiende a rotar sobre la corteza del tronco generando gran cantidad de esfuerzos tangenciales (esfuerzos perpendiculares al radio del tronco), los cuales son altamente nocivos para la corteza del árbol.

En Colombia desde 1996 se comenzó a explorar el principio de las vibraciones, para mecanizar la cosecha de café, desarrollando equipos vibratorios inerciales del tallo (circulares y multidireccionales).

Los resultados obtenidos con los prototipos (Aristizábal, 1998, Ramírez, 1999, Granja, 2000), indican que este principio es muy promisorio ya que es posible desprender, en algunos de los tratamientos evaluados, más del 50% de los frutos maduros, vibrando el tallo durante 10 segundos (3,3% del tiempo utilizado por un recolector en un árbol de 4ª ó 5ª cosecha), obteniendo menos del 20% de frutos verdes en la masa

cosechada. Sin embargo, el daño mecánico ocasionado a la corteza de los árboles es muy elevado, más del 80% de los árboles vibrados (Granja, 2000); dejando los árboles vibrados altamente susceptibles al ataque de la llaga macana (*Ceratocystis fimbriata*, hongo muy común en la zona cafetera colombiana). Esta fue la razón por la cual se realizó el diseño de un sistema de acople apropiado, que transmitiera la vibración dentro de un rango admisible que evitara el daño mecánico al café.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Laboratorio para Investigaciones de Cosecha en Café (LICC), y el Laboratorio de Fisiología Vegetal de Cenicafé. La parte de campo se desarrolló en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas), con una altitud de 1310 m.s.n.m., temperatura promedio de 20,6 °C. y una humedad relativa del 75%. Los árboles de café seleccionados para este estudio fueron plantillas, variedad Colombia roja, de tercera, cuarta y quinta cosecha (48, 60 y 72 meses), sembrados a 2 x 1 (2 m entre calles y 1 m entre plantas).

El experimento se dividió en dos etapas: primera, determinación los esfuerzos radiales admisibles en la corteza del café y segunda, evaluación de la transmisibilidad del sistema de acople diseñado y evaluación del daño mecánico ocasionado al tallo.

Determinación de los esfuerzos radiales admisibles en la corteza del café.

Los esfuerzos radiales (σ_r), son los resultantes de las cargas aplicadas en sentido radial al tronco del café. La relación que define al esfuerzo está dada por la ecuación:

$$\sigma_r = \frac{F}{A_s} \quad (1)$$

Donde:

σ_r : Esfuerzo radial resultante [Pa].

F: Fuerza de compresión aplicada [N].

A_s : Área sobre la cual actúa la fuerza [m²].

Para determinar los esfuerzos radiales admisibles, de la corteza del café se utilizó una máquina universal de ensayos INSTRON 5569® programada en el modo “ensayos a compresión”. Para ello, se tomaron trozas de 50 cm de longitud de árboles de 48, 60 y 72 meses (tercera, cuarta y quinta cosecha), cortadas a 10 cm del suelo, las cuales fueron pintadas en sus extremos, envueltas en plástico para evitar la deshidratación y almacenadas en la nevera. Dichas trozas fueron cargadas en sentido radial sobre una sección de corteza de 1 cm² adherida al tallo (ver Figura 1).

En cada ensayo, se obtuvo la curva de esfuerzo radial [σ_R] vs. relación de deformación [ε] de la corteza del café. Para determinar el esfuerzo radial admisible se usó un método que facilitara la determinación del esfuerzo radial, que no ocasionara daño en los tejidos internos del tallo del café.

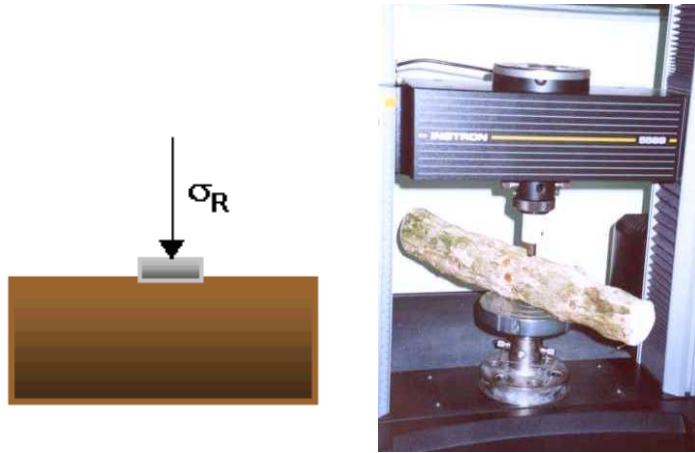


Figura 1. Determinación de los esfuerzos radiales admisibles en la corteza del árbol del café

El método surgió a través de las observaciones realizadas con las primeras secciones cargadas, en el cual se aprovechó la oxidación de las secciones ensayadas debido al rompimiento citoplasmático de las células y por consiguiente la liberación de fenoles (dando tonalidades oscuras en las secciones cargadas), y así determinar, a nivel macro, la ocurrencia del daño mecánico y dejar el análisis histológico (ó nivel micro), sólo para verificar dicha ocurrencia, y determinar el valor de esfuerzo en el cual no se ocasiona daño, a las estructuras del tallo (floema principalmente).

Este método estableció una escala de colores de oxidación, de las secciones

de corteza cargadas, a diferentes valores de esfuerzo radial. Para ello se cargaron, en cada una de las edades estudiadas, trozas de café a 2068,2 kPa (300 psi), 3447 kPa (500 psi), 4825,8 kPa (700 psi), 6204,6 kPa (900 psi), 7583,4 kPa (1100 psi) y 10341 kPa (1500 psi), respectivamente. Luego, dichas secciones cargadas fueron extraídas para permitir su oxidación. De cada una de las trozas se extrajo una sección de corteza no cargada, para establecerla como testigo de oxidación.

Las secciones extraídas se dejaron oxidar y transcurrido cierto tiempo se buscó la huella dejada por el elemento compresor (un dado de acero de 1 cm² de sección, el cual va montado en el

bastidor de la máquina INSTRON), sobre las secciones de corteza cargadas. Se determinó el valor mínimo de esfuerzo radial, en el cual apareció claramente dicha huella, sobre las secciones cargadas y luego por medio del análisis histológico se comprobó que presentaban daño mecánico. Las secciones cargadas con valores iguales ó superiores a este esfuerzo radial, se consideraron afectadas por daño mecánico a nivel macro y por ende el daño también ocurrió a nivel micro.

Posteriormente, se analizaron histológicamente (ó a nivel micro), las secciones de corteza cargadas con un esfuerzo radial inferior al determinado a nivel macro y así se estableció, a nivel micro, el valor de esfuerzo radial que no ocasionara daño mecánico en las estructuras del tallo del cafeto, el cual fue definido como esfuerzo radial admisible neto, para la corteza del cafeto.

Evaluación de la transmisibilidad del sistema de acople diseñado y evaluación del daño mecánico ocasionado al tallo.

En esta etapa se hizo una evaluación de la transmisibilidad de la vibración generada por el vibrador y suministrada a la planta a través del sistema de acople diseñado; además se verificó si hubo ó no daños en la corteza y tejidos internos como consecuencia de la vibración. También, se corroboró si el esfuerzo radial aplicado ($\sigma_{R\text{aplic}}$), con el vibrador "VITAC-1", es menor al esfuerzo radial admisible ($\sigma_{R\text{adm}}$), definido en la etapa anterior.

El equipo utilizado para evaluar el sistema de acople fue el *Vibrador Inercial de Tallos de Café "VITAC-1"* desarrollado en CENICAFE (ver Figura 2). El vibrador operó bajo las siguientes condiciones: presión de sujeción de 1450 psi, frecuencia de vibración de 1500 cpm, excentricidad de las masas de 56,4 mm, con un patrón de vibración de 10 lazos (relación de velocidades 7:3), el punto de aplicación de la vibración en el tallo se localizó a 40 cm sobre el suelo, durante 10 segundos.



Figura 2. Vibrador multidireccional de tallos de café “VITAC-1” desarrollado en CENICAFE (2001).

Para la concepción del diseño del sistema de acople, para el vibrador inercial multidireccional *VITAC-1* se tuvieron en cuenta diversos factores tales como; revisión de literatura (García, 2002), las experiencias recogidas en los trabajos con vibradores inerciales de tronco desarrollados en CENICAFE (Aristizábal, 1998, Ramírez, 1999, Granja, 2000), las recomendaciones de los expertos en el tema de sujetadores al tallo (Brown, 2000)⁵, la visita, por parte de los asesores, a países que utilizan vibradores de tallo para cosechar frutales, el estudio de diversos materiales como el caucho y el análisis estático y dinámico a los prototipos vibratorios anteriores, desarrollados en CENICAFE.

⁵ BROWN, G. K.. Shaker-clamp systems. (Online). Mensaje para: Federico GARCÍA-URIBE. Julio 19 de 2000. (Comunicación Personal)

La forma del sistema de acople seleccionada, entre dos alternativas: cilíndrica o prismática, fue la cilíndrica ya que resulta más económica que la prismática (en términos de la construcción de los tacos de caucho), además la instalación en el vibrador era más sencilla de realizar.

El sistema de acople está compuesto por dos elementos, uno móvil y accionado por medio de un cilindro hidráulico, y otro soldado a la estructura del vibrador. Cada elemento del sistema de acople, está compuesto por un cilindro de caucho de 100 mm de diámetro y 200 mm de largo montado sobre un eje de acero calibrado 1020 de 25,4 mm de diámetro. La función de los tacos cilíndricos de caucho es transmitir las cargas generadas en sentido radial al tronco. En cada rodillo de caucho, se colocó un par de bandas o faldones elaborados en caucho espumado con

nervadura de lona de 350 mm de largo, 220 mm de ancho y 10 mm de espesor. La función de estos faldones es evitar daños en la corteza del cafeto, en la zona de acople por transmisión de esfuerzos tangenciales generados durante la vibración.

Las dimensiones dadas al sistema de acople resultaron de tener en cuenta dos factores: primero, las dimensiones de la cabeza vibradora y segundo, los diámetros de los tallos de café a evaluar; para lo cual se realizó una primera aproximación usando la ecuación hallada por Aristizábal (1998), para la variedad Colombia roja, ($Y = 55,1136 - 0,2354 X$, donde Y es el diámetro del tallo [mm], y X es la altura sobre el suelo [cm]), obteniendo, a 40 cm del suelo, un valor de 4,6 cm (distancia mínima entre bordes internos de los tacos cilíndricos de caucho). Por facilidades de construcción, la distancia entre los tacos cilíndricos de caucho se ajustó a 5,0 cm permitiendo la posibilidad de ampliarse si fuera necesario. Con esta distancia se buscó asegurar suficiente área de contacto entre los faldones de caucho y el tallo del café para disminuir las zonas con una alta concentración de esfuerzos.

El compuesto de caucho debía ser resistente al contacto con hidrocarburos, a la intemperie y a cargas dinámicas. Dicho compuesto resultó de una combinación de caucho

sintético y nitrilo; el nitrilo es el material que le da al compuesto la propiedad de ser resistente al contacto con hidrocarburos (Castaño, 2000). En la Figura 3 se muestra el sistema de acople propuesto.



Figura 3. Vista general del sistema de acople propuesto para el “VITAC-1”.

Para evaluar la transmisión de la vibración se seleccionaron 5 árboles de cada una de las edades establecidas (48, 60 y 72 meses), y se registraron las señales de vibración de entrada mediante un acelerómetro biaxial de ± 100 g (previamente calibrado), colocado sobre el sistema de acople; así mismo, para el registro de las señales de salida, se ubicó un acelerómetro triaxial de ± 100 g, sobre el tallo del árbol a 40 cm de altura sobre el suelo, el cual registró las señales de la salida tal y como se muestra en la Figura 4.

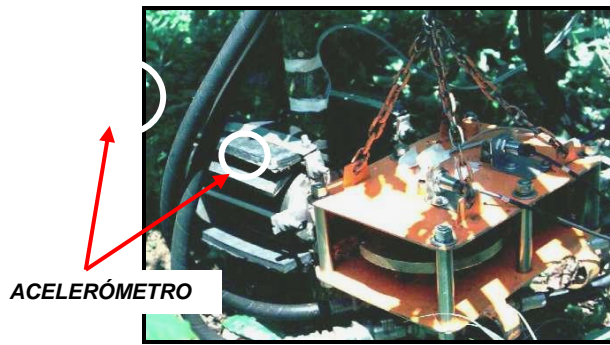


Figura 4. Acelerómetros colocados sobre la cabeza vibratoria y el tallo del cafeto para medir la transmisión de la vibración.

La eficiencia de transmisión es un número dado en porcentaje definido como:

$$E.T.(%) = \frac{\text{Salidas}}{\text{Entradas}} \quad (2)$$

Se definieron como señales de entrada, las registradas en el sistema de acople del equipo vibratorio; y como señales de salida las registradas en el tallo del árbol. Las señales registradas por los acelerómetros, fueron enviadas hasta un computador por medio de un sistema de adquisición de datos *Daqbook-100*, utilizando una frecuencia de muestreo de 5000 datos por segundo, durante un tiempo máximo de adquisición de 10 segundos. Así mismo, para analizar estas señales fue desarrollado un software en *MatLab*® por Duque y

Henaó (2001)⁶, en Cenicafé. Por lo tanto, lo que se midió, fue la disipación de la energía observando la relación de señales de vibración desde un medio generador (vibrador), y un medio receptor (tallo del árbol).

Con los valores de transmisibilidad (2), (expresada en %), obtenidos en los 5 árboles por edad, se estimó el promedio y el intervalo de confianza, al 95%; se estableció que el límite inferior del intervalo estimado debía ser mayor o igual al 80%, para aceptar que el sistema de acople estaba transmitiendo adecuadamente la vibración.

También se procedió a verificar el esfuerzo radial aplicado estáticamente ($\sigma_{R\text{aplic}}$), para comparar si dicho valor supera al esfuerzo radial admisible ($\sigma_{R\text{adm}}$), determinado en la primera

⁶ DUQUE, A.J. y HENAO S., J.A. Programa para el análisis de señales de aceleración mediante el lenguaje *MatLab*®. Chinchiná, CENICAFÉ. 2001. (Comunicación Personal).

etapa; además, se verificó si se presentaba lesión visible en los árboles.

Para determinar el esfuerzo radial aplicado ($\sigma_{R\text{aplic}}$), según la ecuación 1, por el sistema de sujeción, se requiere de la fuerza de acople y del área de contacto entre los faldones de caucho y el tallo del cafeto. La magnitud de la fuerza de acople en el árbol debida al cilindro hidráulico, se calculó mediante un análisis de cuerpo libre del elemento móvil (ver resultados segunda etapa). De este análisis se halló una expresión que relacionaba la fuerza de acople (en el árbol), en función de la presión del cilindro hidráulico.

Para determinar el área de contacto entre los faldones de caucho y el tallo, se utilizó una técnica llamada *procesamiento de imágenes*. En cada uno de los árboles en que se realizaron las pruebas de transmisibilidad, cada tallo se impregnó con una película de aceite (tipo SAE 40W, usado). Luego se insertó una hoja de papel entre el acople y el tallo, para que el área en contacto se marcara sobre la hoja y se acopló durante 10 segundos, se retiró la hoja y se llevó al equipo procesador de imágenes constituido por un escáner y un algoritmo desarrollado en *Matlab*®, por Gómez (2001)⁷ en Cenicafé, para obtener el área de contacto [m^2], entre el acoplador y el tallo del cafeto.

Con la información obtenida del esfuerzo radial aplicado ($\sigma_{R\text{ aplic}}$), (en condiciones estáticas), por edad del cultivo evaluado, se estimó el promedio

y el intervalo de confianza al 95%. Si el valor del límite superior del intervalo es menor (descriptivamente), que el valor del esfuerzo radial admisible determinado en la primera etapa, entonces el sistema de acople cumple con el propósito para el cual fue diseñado.

Para determinar si el sistema de acople ocasiona daño en los tejidos internos del tallo, durante la vibración, se utilizó el sistema *Topaq Analysis System*® de *Sensor Products Inc.*, el cual permitió determinar la magnitud y distribución de presiones en el área de acople durante la vibración. El sistema *Topaq*® está compuesto por un escáner, un software y unas películas reveladoras de presión (*Superlow* para este caso).

Para determinar si se presentaba daño interno en el tallo del cafeto durante la vibración, se tomaron 4 árboles para cada una de las edades (48, 60 y 72 meses), a los cuales se le insertó una banda por árbol. Dichas bandas fueron colocadas entre el tallo y los faldones de caucho del sistema de acople. Se vibró el árbol por 10 segundos, luego se retiraron las bandas, las cuales posteriormente fueron analizadas mediante el *Topaq Analysis System*® con el fin de conocer la distribución y magnitud de las presiones del sistema acoplador – tronco y determinar si se presentaron esfuerzos superiores a los permisibles, determinados en la primera etapa el experimento.

En cada imagen se delineó un cuadro de aproximadamente 3 cm^2 , el cual encerraba un área representativa

⁷ GÓMEZ G., E.O. Medición de áreas de contacto mediante el uso de la técnica del procesamiento de imágenes. Chinchiná, CENICAFÉ. 2001. (Comunicación Personal).

de contacto entre el sistema de acople y el tallo del cafeto. Para el área representativa de contacto, se escogió una superficie que no presentara irregularidades como depresiones o protuberancias debidas a las incisiones de las ramas en el tallo, ya que en dichas incisiones no existe corteza. Además, de cada película se definió una línea que atravesara la película en sentido longitudinal (o paralelo al tallo), con el fin de obtener un perfil de presiones por imagen.

Las bandas se revelaron en los laboratorios de *Sensor Product Ind*, en USA, obteniéndose el mapa de la distribución de las presiones del área de contacto en 2D y 3D, el perfil de presiones de la línea dibujada, un histograma de frecuencias relativas y la estadística básica de la región encerrada (área representativa de contacto). A partir del análisis de las bandas de presión se calculó el promedio, la mediana y la moda para cada una de las áreas representativas de contacto, así como el percentil 99 y el porcentaje de área con presiones que superaron el Esfuerzo radial admisible (σ_{Radm}), definido en la primera etapa. En la Figura 5 se muestra una película

sin procesar, procesada en 2D y 3D con el *Topaq Analysis System*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación de los esfuerzos radiales admisibles en la corteza del cafeto.

El árbol de café es un material biológico cuyas propiedades mecánicas no son homogéneas, son anisotrópicas, y pueden variar de un árbol a otro (así sea de la misma edad), debido a diversos factores entre ellos, su desarrollo (afectado por variables endógenas y exógenas al árbol).

En la Figura 6 se presentan las curvas esfuerzo radial (σ_R) vs. relación de deformación (ϵ) para la corteza del cafeto para cada una de las edades estudiadas (48, 60 y 72 meses), en las cuales se pueden identificar tres zonas:

Zona A: en esta zona se presenta una gran deformación ante cargas relativamente bajas, posiblemente debida a la compresión de la primera capa de la corteza, la cual se caracteriza por tener gran cantidad de tejido lignificado (tejido inerte de tipo corchoso con gran cantidad de macroporos llenos de aire).

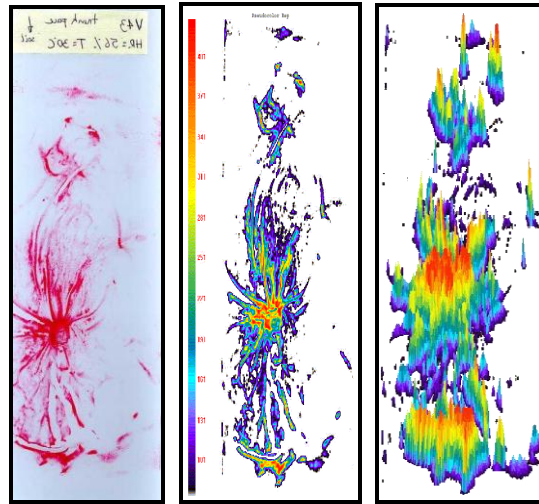


Figura 5. Película sin procesar y procesada mediante el *Topaq Analysis System*®

Zona B: una vez cargada la corteza (o el tejido lignificado), se comienza a cargar el tejido activo de la sección la cual contiene uno de los tejidos principales del tallo (floema). Esta zona se caracteriza por ser más densa que la zona anterior, además la curva esfuerzo radial (σ_R) vs. relación de deformación (ϵ), en esta zona, tiene una pendiente relativamente uniforme (de tipo lineal), hasta el punto de falla (límite con la Zona C).

Zona C: en esta zona se presenta el punto de falla de la corteza caracterizado por un cambio brusco en la pendiente de la curva esfuerzo radial (σ_R) vs. relación de deformación (ϵ). Este cambio es denotado en la Figura 6 como un decrecimiento del valor del esfuerzo radial (σ_R), a medida que la

relación de deformación aumenta (ϵ); cabe anotar que este punto de falla puede tener una ligera variación de una curva a otra. Una vez ocurrido el punto de falla, se presenta un incremento del esfuerzo radial (σ_R), a medida que la relación de deformación (ϵ) aumenta, el cual se debe a que se comienza a cargar el tronco del cafeto propiamente dicho.

El método de la escala de colores de oxidación fue un primer indicativo para determinar el esfuerzo radial admisible (σ_{Radm}) en la corteza del cafeto, en forma similar a como fue utilizada en otros frutales según lo reportado por Fridley *et al.* (1970).

La escala de colores de oxidación, para secciones cargadas con diferentes valores de esfuerzos radiales, mostró el mismo comportamiento para las tres

edades estudiadas. A 2068,2 kPa (300 psi), y a 3447 kPa (500 psi), no se nota la huella dejada por el dado de acero en las secciones cargadas. A 4825,8 kPa (700 psi), la huella dejada por el dado compresor es muy tenue.

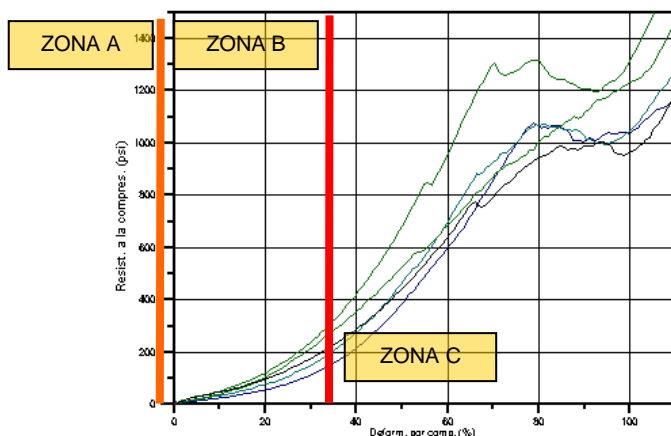


Figura 6. Curva esfuerzo radial (σ_{Radm}) vs. relación de deformación (ϵ) característica de los ensayos a compresión de la corteza del café.

En cambio, para las secciones cargadas a 6204,6 kPa (900 psi), 7583,4 kPa (1100 psi) y 10341 kPa (1500 psi), se nota claramente la huella dejada por el dado. En la Figura 7 se muestra la escala de colores de oxidación para las secciones cargadas.

Las secciones de corteza cargadas a 6204,06 kPa (900 psi), donde aparecía claramente la huella dejada por el dado

cargador, fueron sometidas al análisis histológico como se había planteado y el resultado evidenció que efectivamente a ese valor de esfuerzo se presenta daño mecánico, en los tejidos internos de la corteza. En la Figura 8, se muestra el daño mecánico en los tubos cribosos en comparación a un tejido sano, en la cual se observa el aplastamiento de los tubos debido a la carga.



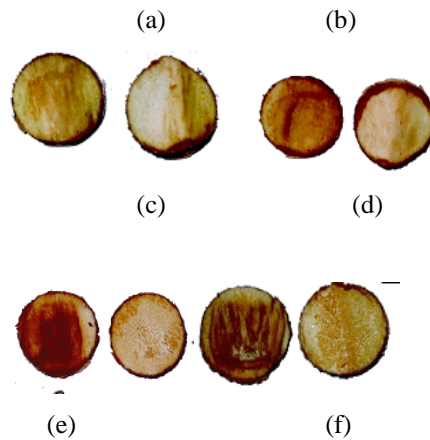


Figura 7. Escala de colores de oxidación para secciones de corteza cargadas a diferentes valores de esfuerzo. (a) 2068,2 kPa (300 psi); (b) 3447 kPa (500 psi); (c) 4825,8 kPa (700 psi); (d) 6204,06 kPa (900 psi); (e) 7583,4 kPa (1100 psi); (f) 10341 kPa (1500 psi)

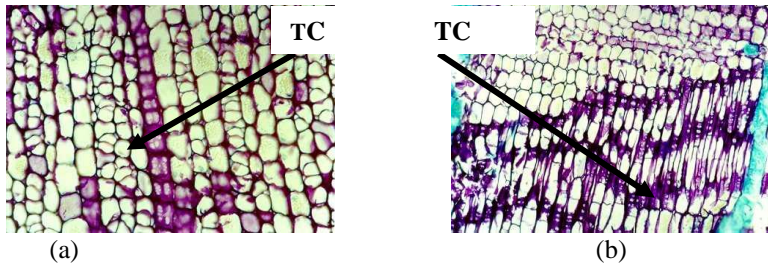


Figura 8 orte transversal de sección de corteza (a) Tejido sano, (b) Tejido cargado a 6204,06 kPa (900 psi). Se observan tubos cribosos (TC). Aumento 40x.

En la Figura 9 se muestra el daño mecánico a nivel del floema, para la misma sección, en donde se nota un aplastamiento de dichas células en comparación con un tejido sano, nótese

la simetría que presentan estas células en comparación con el tejido cargado cuyas células semejan una forma rectangular.

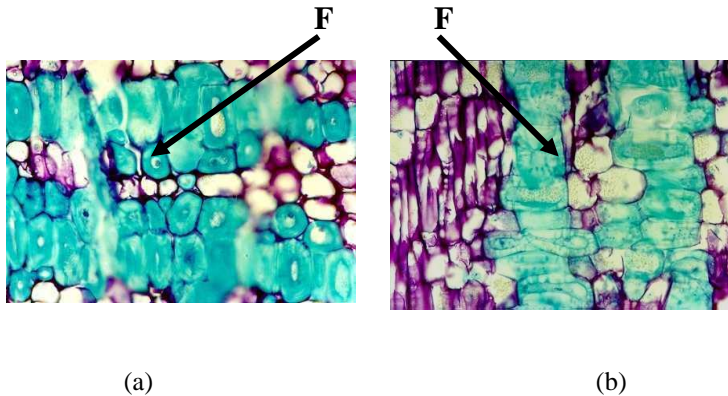


Figura 9 Corte transversal de una sección de corteza (a) Tejido sano, (b) Tejido cargado a 6204,06 kPa (900 psi). Se observa floema (F). Aumento 40x.

En las secciones de corteza cargadas y analizadas a 5515,2 kPa (800 psi), 4136,4 kPa (600 psi) y 3447 kPa (500 psi), también se evidenció el daño mecánico a este mismo nivel (tubos cribosos y floema). En la sección de corteza cargada a 2068,2 kPa (300 psi), no se observó daño mecánico, a nivel micro. En el floema las células presentan la misma configuración que la observada en un tejido sano. En los tubos cribosos se presenta el mismo ordenamiento lineal, observado en un tejido sano. Este valor de esfuerzo fue verificado en el laboratorio, no encontrando oxidaciones anormales en

ninguna de las secciones de corteza cargadas, por lo tanto, para cada una de las edades estudiadas (48, 60 y 72 meses), el *esfuerzo radial admisible neto*, para la corteza de café fue especificado en 2060,2 kPa (300 psi).

Evaluación de la transmisibilidad del sistema de acople diseñado y evaluación del daño mecánico ocasionado al tallo. En la transmisión de la vibración se encontró, que la absorción (pérdidas de energía por amortiguamiento o disipación de calor), en los cauchos del sistema de acople fueron, como máximo, del 20% para cada una de las edades estudiadas.

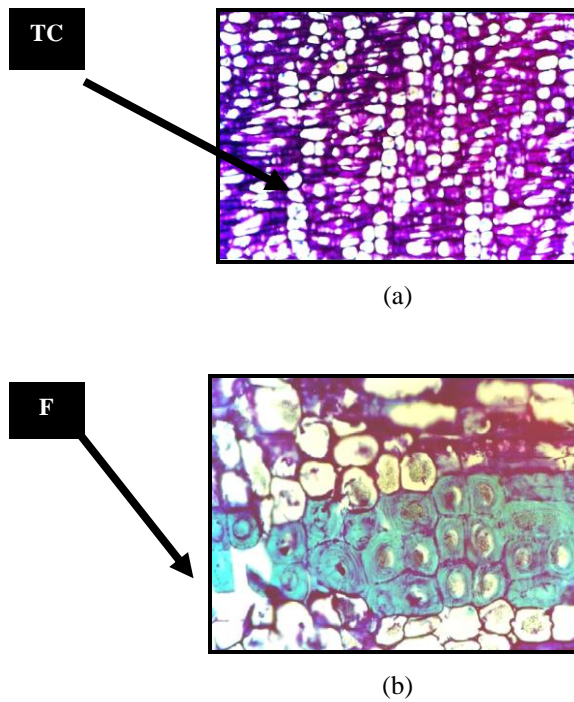


Figura 10. Corte transversal de una sección de corteza cargada a 2060,2 kPa (300 psi). (a) Se observa tubos cribosos. (b) Se observa floema. Aumento 40x.

El límite inferior del intervalo de confianza a un nivel del 95%, para la variable transmisión de la vibración para árboles de tercera cosecha (48 meses) fue del 85%, para árboles de cuarta cosecha (60 meses) fue del 80% y para árboles de quinta cosecha (72 meses) fue de 79%. Aunque el límite inferior, para la variable transmisión de la vibración para árboles de quinta

cosecha, fue inferior al valor establecido (80%) teniendo en cuenta el promedio (88%) y los valores citados para árboles de tercera y cuarta cosecha se aceptó el diseño.

En la Tabla 1 se resumen los valores medios e intervalos de confianza al 95%, para la variable eficiencia de transmisión de la vibración, obtenidos para cada una de las edades estudiadas.

Tabla 1. Media e intervalos de confianza al 95% para la variable eficiencia de transmisión de la vibración en árboles de café variedad Colombia de tres edades.

Cosecha		<i>Límite inferior</i> %	<i>Media</i> %	<i>Límite superior</i> %
Edad	Meses			
3	48	85	91	98
4	60	80	83	86
5	72	79	88	97

Evaluación del daño mecánico ocasionado al tallo.

Condiciones estáticas (sujeción del sistema de acople al árbol). Mediante un diagrama de cuerpo libre del elemento móvil del sistema de sujeción, se obtuvo una ecuación la cual relaciona el esfuerzo radial aplicado ($\sigma_{R\text{aplic}}$) (en condiciones estáticas), en función de la presión del cilindro hidráulico (P_C), y del área de contacto (A_R), determinada mediante el procesamiento de imágenes. Dicha ecuación es:

$$\sigma_{R\text{aplic}} = \frac{29,439 \cdot P_C}{A_R}, \quad (3)$$

Donde: $\sigma_{R\text{aplic}}$ (kPa), P_C (psi), A_R (cm²)

Con la expresión (2), se determinó el esfuerzo radial aplicado, para cada una de las edades estudiadas. Para tercera cosecha (48 meses), el límite superior del intervalo de confianza a un nivel del 95% para la variable esfuerzo radial aplicado fue de 881,26 kPa (127,83 psi), para cuarta cosecha (60 meses) fue

de 756,40 kPa (109,71 psi), y para árboles de quinta cosecha (72 meses) fue de 684,68 kPa (99,30 psi). El mayor Esfuerzo radial aplicado ($\sigma_{R\text{aplic}}$), se presentó en árboles de tercera cosecha y el menor valor de ($\sigma_{R\text{aplic}}$), se presentó en árboles de quinta cosecha, debido a que los árboles de tercera cosecha poseen menor diámetro que los árboles de cuarta y quinta cosecha.

Con este mayor valor de Esfuerzo radial aplicado ($\sigma_{R\text{aplic}}$), no se ocasionó daño mecánico interno en las estructuras del tallo (en el floema, y los tubos cribosos), ya que con el sistema de acople propuesto se está aplicando, en el peor de los casos 2,3 veces menos carga que la admisible por la corteza del cafeto (2068,2 kPa; 300 psi), lo cual le da un margen de seguridad amplio al diseño.

En la Tabla 2 se resumen los valores medios e intervalos de confianza al 95% para la variables esfuerzo radial aplicado obtenidos para cada una de las edades estudiadas.

Tabla 2. Media e intervalos de confianza al 95% para la variable esfuerzo radial aplicado ($\sigma_{R\text{aplic}}$) en condiciones estáticas para árboles de tercera, cuarta y quinta cosecha.

<i>Cosecha</i>		<i>Límite superior</i>		<i>Media</i>		<i>Límite inferior</i>	
<i>Edad</i>	<i>Meses</i>	<i>psi</i>	<i>kPa</i>	<i>psi</i>	<i>kPa</i>	<i>psi</i>	<i>kPa</i>
3	48	127,83	881,36	108,5	748,08	89,17	614,79
4	60	109,71	756,40	99,02	682,73	88,33	609,07
5	72	99,30	684,68	86,89	599,06	74,47	513,45

Evaluación del daño mecánico en condiciones dinámicas (vibración). Con el sistema Topaq Analysis System® se logró obtener un mapa de presiones, para cada una de las películas estudiadas además de la información antes descrita.

En la Figura 11, se presenta el comportamiento típico, para las tres edades estudiadas, del área representativa de contacto en condiciones normales de operación del vibrador.

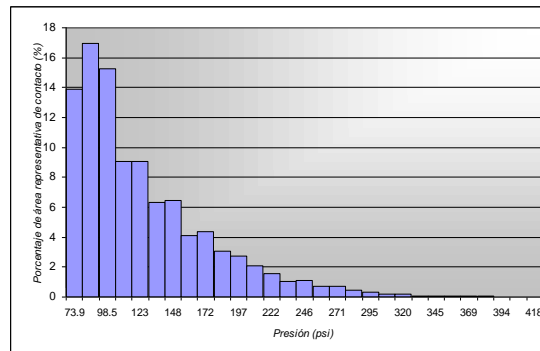


Figura 11. Relación del porcentaje de área de representativa de contacto – presión desarrollada en la zona de contacto, en condiciones normales de operación del equipo.

Una distribución típica como la representada en la Figura 11, indica que los mayores porcentajes de área representativa de contacto están entre 509,46 kPa (73,9 psi), y 847,96 kPa sometida a un esfuerzo inferior que el esfuerzo radial admisible (σ_{Radm}), de la corteza del café, lo cual implica que durante la vibración, no se supera el

esfuerzo radial admisible (σ_{Radm}), determinado en la primera etapa y no se causa daño mecánico a las estructuras internas del tronco del café.

En la tabla se muestran las medidas de tendencia central, el percentil 99 y el porcentaje del área crítica (porcentaje de área mayor a 2068,2 kPa; 300 psi), obtenidas para las presiones de

contacto en cada una de las edades evaluadas (46, 60 y 72 meses). Para todas las edades estudiadas, la moda (el dato que más se repite), y la mediana (el 50% de la población), siempre fueron inferiores a la media y en ninguna de las tres medidas de tendencia central se superó el límite del esfuerzo radial admisible (σ_{Radm}), de la corteza del cafeto determinado en la primera etapa. Analizando el percentil 99 (el 99% de la población que se encuentra inferior al valor dado), se presentaron varios árboles en los cuales se superó el esfuerzo radial admisible (σ_{Radm}), esto posiblemente se debió a

que las áreas representativas de contacto seleccionadas alcanzaron a estar en zonas de alta presión ocasionada a las protuberancias dejadas por las ramas, esto fue ratificado con el perfil de presiones de las imágenes. Dichas protuberancias son zonas sin corteza bastante densas y lignificadas (es el punto de anclaje de la rama al tronco), por esta razón no fueron tenidas en cuenta para análisis en este estudio. Los mayores valores de área crítica (área con un esfuerzo superior al admisible), se dieron en el árbol 3 de cuarta cosecha (4 -3), y en el árbol 3 de quinta cosecha (5-3).

Tabla 3. Medidas de tendencia central, percentil 99 y área crítica para cada una de las áreas representativas de contacto por edad.

<i>Cosecha- árbol</i>	<i>Mediana (kPa)</i>	<i>Media (kPa)</i>	<i>Moda (kPa)</i>	<i>Percentil 99 (kPa)</i>	<i>% Área crítica</i>
3 - 1	651,07	803,63	594,33	1861,45	0,39
3 - 2	749,72	908,42	679,13	2035,80	0,93
3 - 3	697,01	886,36	594,33	2290,25	1,65
3 - 4	725,52	809,15	594,33	1527,09	0,00
4 - 1	659,34	789,71	594,33	1527,09	0,00
4 - 2	1018,31	1113,38	679,18	2459,85	3,65
4 - 3	848,72	1070,77	594,33	2799,03	10,80
4 - 4	1317,44	1310,96	1272,70	2629,44	7,25
5 - 1	1018,31	1125,86	679,13	2459,85	6,00
5 - 2	957,58	1112,62	679,13	2714,24	8,32
5 - 3	1187,90	1287,38	679,13	2883,83	18,20
5 - 4	658,86	773,37	509,54	1611,89	0,00

CONCLUSIONES

- El método de la escala de colores de oxidación presentó el mismo comportamiento para las tres edades estudiadas. Este método fue un primer indicador útil para determinar el esfuerzo radial admisible (σ_{Radm}),

además permitió establecer, a nivel macro, el daño mecánico en los tejidos de la corteza. Posteriormente, el estudio histológico, ó nivel micro, permitió definir la ocurrencia ó no de daño mecánico en los tejidos del tallo del cafeto.

- Para las edades estudiadas, a una presión 2068,2 kPa (300 psi), no se presentó daño mecánico en las estructuras internas de la corteza del árbol del café, por lo tanto dicho se puede considerar como el “esfuerzo radial admisible” (σ_{Radm}) para la corteza del cafeto variedad Colombia. Cabe anotar que este esfuerzo radial admisible (σ_{Radm}) determinado en este experimento no aplica para condiciones donde el principio de cosecha sea el impacto.

- Con el sistema de diseñado, el cual utiliza el principio de bandas de caucho deslizantes y un taco de caucho, se redujo el daño de un 81% al 0%.

- En condiciones normales de operación en campo, con el sistema de acople propuesto se logró obtener una transmisión de la vibración, como mínimo del 80%, para cada una de las edades estudiadas.

- Con el sistema de acople diseñado, no se superó el esfuerzo radial admisible (σ_{Radm}) determinado en la primera etapa de este estudio. El esfuerzo radial máximo generado durante la sujeción al árbol fue de 881,26 kPa (127,83 psi), el factor de diseño con este valor de esfuerzo sería de 2,3. El esfuerzo máximo generado durante la vibración fue de 1272,7 kPa (184,6 psi), cuyo factor de diseño, con este valor de esfuerzo, sería de 1,6.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, a COLCIENCIAS y a CENICAFE, por

todos los aportes que permitieron realizar este trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

ADRIAN, P.A. and FRIDLEY, R.B. Shaker-clamp design as related allowable stresses of the tree bark. *En: Transactions of the ASAE. Vol. 7, No.3 (1964); p.232-237.*

ARISTIZÁBAL, T., I.D. Estudio del efecto de la vibración del árbol de café en la selectividad de la cosecha. Chinchiná: CENICAFÉ, 1998. 42p.

BROWN, G. K.; RAUCH, M.H. and TIMM, E.J. Improved clamp pad for trunk shakers. *En: Transactions of the ASAE. Vol. 31, No.3 (1988); p.677-682.*

CARGILL, B. F.; BROWN, G.K. and BUKOVAC, M.J. Factors affecting bark damage to cherry trees by harvesting machines. Michigan, Cooperative Extension Service, 1982. p.1-6. (Agricultural Engineering Information Series; no. 471, File N° 18446).

FRIDLEY, R.B.; BROWN, G.K. and ADRIAN, P.A.: Strength characteristics of fruit tree bark. *En: Hilgardia. Vol. 40, No.8 (1970); p.205-222.*

GARCÍA U., F. Determinación de parámetros de diseño para los sistemas de acople en los vibradores inerciales de tallo para café. Medellín, 2002. 121 p. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

GRANJA, J.J. Diseño, construcción y evaluación de un dispositivo para la cosecha mecánica del café, por vibración multidireccional al tallo. Chinchiná, CENICAFÉ, 2000.

ORTIZ C., J. Técnica de la mecanización Agraria. 3 ed. Madrid, Mundi-Prensa, 1989. 641 p.

RAMÍREZ V., C.M. Desarrollo y evaluación de un cosechador de café por

aplicación de vibraciones circulares al tallo. Medellín, 1999. 131 p. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

Aprobado para su publicación:

Octubre 2 de 2002