

# COSECHA DE CAFÉ MEDIANTE IMPACTO A LAS RAMAS

Eduard Alberto García-Galeano\* ; Carlos Eugenio Oliveros-Tascón\*\* ;  
Fernando Álvarez-Mejía\*\* ; Esther C. Montoya-Restrepo\*\*\*\*

---

## RESUMEN

**GARCÍA G., E.A.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ M., F.; ESTHER C. MONTOYA R. Cosecha de café por la aplicación de impacto a las ramas. *Cenicafé* 52(4):231-248. 2001.**

En Cenicafé se construyó y evaluó un equipo portátil, accionado neumáticamente para impactar, desprender y recoger frutos de café. En laboratorio se utilizaron sensores de desplazamiento, aceleración y un editor de video; se determinaron los valores de los parámetros: punto de aplicación del impacto, frecuencia del impactador, tiempo de aplicación y condiciones de borde del extremo libre de la rama que permiten obtener la mayor eficacia (desprendimiento de frutos maduros) y mejor calidad de cosecha (porcentaje de frutos maduros en la masa cosechada). La mejor transmisión de la vibración y desprendimiento de frutos (90% de los frutos maduros iniciales y 23% de los frutos verdes iniciales) se obtuvo al restringir el movimiento del extremo libre de la rama e impactarla con una frecuencia de 1300rpm, en un punto cercano a 1/3 de su longitud, durante máximo 2,5 segundos. Bajo condiciones de impacto, el desprendimiento de cerezas maduras ocurre después de pocos ciclos exhibiendo el sistema fruto-pedúnculo modos de vibración pendular y basculante. En el campo, la herramienta portátil se operó bajo las condiciones recomendadas en laboratorio. En promedio, el rendimiento con la presión de trabajo y frecuencia recomendados (5 bares y 1.282rpm, respectivamente), es de 224kg de café cereza/día, 62% de desprendimiento de frutos y 12,6% de frutos verdes en la masa final cosechada.

**Palabras claves:** Café, cosecha mecánica, impactador de ramas, impacto mecánico.

---

## ABSTRACT

In CENICAFE, portable equipment was constructed, evaluated and driven pneumatically to hit and to gather detached fruits. For the equipment design and operation studies were made under laboratory and field conditions. In laboratory, using displacement and acceleration sensors, and a video editor, the parameters values of the impact application point, hitter frequency, application time of the impact and boundary conditions of the branch free edge were determined to obtain the greatest effectiveness (mature fruits detachment) and the best harvest quality (percentage of mature fruits in the harvested mass). The best vibration transmission and fruits detachment (90% of mature fruits and 23% of the initial green fruits) was obtained when the movement of the branch free end was restricted, and by hitting it at a frequency near 1300 rpm, in a point close to 1/3 of the branch length and for a maximum time of 2.5 s. Under impact conditions the mature cherries detachment happens after few cycles, exhibiting the peduncle-fruit pendulous system and tilted oscillation modes. A pneumatic driven portable tool was developed for field evaluations, operating at the best conditions obtained in the laboratory stage (5 bars and 1.282 rpm, respectively). The results indicated that, in average, the operative performance was 224kg of coffee cherry/day of yield, with an efficacy (mature fruits detachment) of 62% and a percentage of green fruits in the harvested final mass of 12.6%.

**Keywords:** Coffee, mechanical harvest, branch hitter, mechanical impact.

---

- \* Ingeniero Agrícola. Profesional básico. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia
- \*\* Investigador Científico III. Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.
- \*\*\* Profesor Titular. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- \*\*\*\* Investigador Científico I. Biometría. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

Impacto, es el término general que se emplea para describir las fuerzas o alteraciones aplicadas de forma repentina generadas al chocar dos cuerpos con velocidades relativas, cantidad de movimiento y energía cinética inicial. Durante la colisión la energía debida al movimiento de las partículas se transforma, disipa o emplea (dependiendo del tipo de impacto) básicamente en tres formas: mediante deformación de los cuerpos en el área de contacto, mediante vibración o en forma de calor (2, 7, 9, 15). Según Avallone (1) una fuerza o esfuerzo se considera aplicado repentinamente cuando la duración de aplicación de la carga es menor que la mitad del período fundamental de vibración del miembro sobre el cual actúa la fuerza.

El impacto aplicado a los frutos se utiliza en Europa para desprender aceitunas y en Brasil para la cosecha del café (10). En Colombia, se evalúan batidores mecánicos desde 1995, obteniéndose progresos importantes en selectividad en el desprendimiento de frutos de café maduros (14% de frutos inmaduros en la masa cosechada), con relación al Brasil (13). Con los batidores mecánicos es necesario recorrer todas las ramas del árbol y golpear solamente los racimos que tengan, a juicio del operario, un porcentaje importante de frutos maduros (más del 50%). Aunque con esta tecnología se logra disminuir el tiempo por árbol hasta en un 50% (13), la relación beneficio costo no es favorable en la actualidad.

Con la aplicación de impacto en las ramas se logra disminuir notoriamente el tiempo/árbol con relación a los batidores mecánicos. Adicionalmente, la tecnología requerida para impactar a las ramas es más económica y más fácil de utilizar en campo, en plantaciones de cualquier edad o densidad, en terrenos con pendientes moderadas (hasta 100%) y en suelos húmedos. En esta investigación se evaluó un dispositivo portátil diseñado para desprender frutos de café aplicando impacto a las ramas, y

se presentan los resultados obtenidos en laboratorio y en campo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización.** Las pruebas de laboratorio y la primera evaluación de campo se realizaron en las instalaciones de la Subestación experimental El Rosario, ubicada en el municipio de Venecia, Antioquia, y la segunda fase de campo se adelantó en la Subestación Santa Bárbara, en Sasaima (Cundinamarca).

**Materiales y equipos.** Para medir los efectos de la aplicación de impacto mecánico sobre la rama se utilizaron los siguientes equipos:

- Variador de velocidad para motor trifásico ATV-18U18M2.
- Motor eléctrico Siemens (1 HP, 1700 RPM).
- Mecanismo Biela – Manivela “Inversión sin corrimiento”.
- Acelerómetros Analog Devices (100g uniaxiales ADXL 190).
- Tarjeta de adquisición de datos OMEGA PCI-6023E9 con salida a PC.
- Balanza electrónica METTLER TOLEDO, modelo PR802 con capacidad de 810 g, sensibilidad de 0,01 g.
- Transformador lineal diferencial variable (LVDT) con rango  $\pm 2,5$  cm.
- Escopómetro FLUKE 105B.
- Computador portátil DELL LATITUDE (Pentium II).
- Cámara de vídeo (Panasonic VJ ).
- Editor de video Panasonic.
- Circuito de alimentación para acelerómetro.
- Programas Mechanical Desktop®, Working Model®, Matlab®.

**Metodología.** Se desarrolló en cinco etapas así:

### Etapa 1. Análisis cinemático y dinámico del mecanismo impactador.

Se analizó cinemática y dinámicamente un mecanismo biela – manivela, con el fin de conocer el patrón de movimiento en cualquier instante de tiempo, siguiendo la metodología sugerida por diferentes autores (3, 7, 11, 16). Adicionalmente, utilizando los programas para diseño asistido por computador Mechanical Desktop de Autodesk® y Working Model de Knowledge of Revolution®, se dibujó y animó el mecanismo en ambiente virtual (Ingeniería Virtual) con el objeto de obtener los valores de las variables que describen su movimiento en cualquier instante de tiempo. Estos valores se compararon con los obtenidos mediante el análisis cinemático, utilizando el concepto estadístico de error relativo (ER), definido como:

$$ER = \frac{\text{valor experimental} - \text{valor teórico}}{\text{valor teórico}} * 100$$

<< 1 >>

Considerando como valor experimental el obtenido utilizando el programa Working Model y como valor teórico el obtenido del análisis cinemático.

Con el fin de obtener un valor aproximado de la fuerza de impacto de la barra colocada en el extremo del mecanismo biela - manivela, para diferentes velocidades angulares, se construyó una celda de carga compuesta por una viga en voladizo, de acero de 0,20m de longitud (L),  $14 * 10^{-3}$ m de ancho y un espesor de  $3,175 * 10^{-3}$ m, con una rigidez (EI) de  $7,66 \text{Nm}^2$ . Se midió el desplazamiento máximo del eje neutro de la viga (Y) con la ayuda de un LVDT (Figura1). Los valores de fuerza de deflexión máxima del eje neutro de la viga (y) con la ayuda de un impacto se obtuvieron a partir de la expresión para vigas en voladizo dada por BEER (2):

$$F = \frac{3E * I * Y}{L^3}$$

<< 2 >>

### Etapa 2. Adquisición y análisis de la respuesta de la rama de café a la aplicación del impacto.

Se realizó una caracterización del sistema, el cual fue excitado con una entrada que depende de la frecuencia, la fuerza de impacto, masa, velocidad con que se golpea y el tiempo de aplicación. Y una salida o respuesta del sistema, medida en términos de las características de la vibración generada en la rama y la cantidad de frutos desprendidos. Para controlar el impacto se utilizó un sistema sincronizador de frecuencia (variador de velocidad), con el cual se fijó y reguló la velocidad del excitador (motor eléctrico de 1 HP, 1.700 rpm, el cual se utilizó como fuente de potencia y accionamiento del mecanismo biela - manivela), para aplicar distintas frecuencias y fuerzas de excitación (Figura 2).

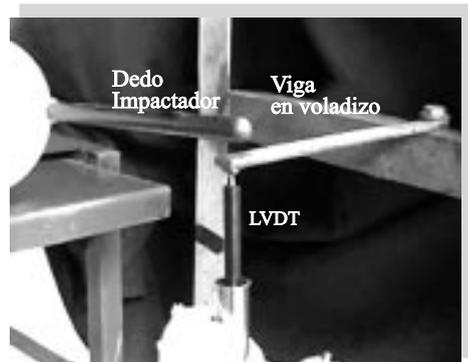


Figura 1. Montaje experimental para medir la fuerza de impacto.



Figura 2. Sistema sincronizador de frecuencias y fuente de potencia.

Para conocer las características de la onda generada por el impacto y la respuesta de la rama se colocó cerca al punto de impacto un sensor de desplazamiento (LVDT) con rango de 25,4mm y un acelerómetro con rango de  $\pm 100g$  en el extremo de la rama. Las señales provenientes de ambos sensores fueron enviadas a un sistema de adquisición de datos basado en computador (Figura 3).

La información obtenida permitió conocer la transmisión de la onda a través de la rama. Para la función de desplazamiento se obtuvo la velocidad y la aceleración en el punto de entrada, mediante un algoritmo de derivación desarrollado en MATLAB®. Para la función aceleración, mediante un algoritmo de integración numérica desarrollado también en MATLAB®, se obtuvieron las velocidades y desplazamientos en el extremo de la rama. Se realizó el análisis de las señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Los datos de las vibraciones corresponden a datos experimentales en el dominio del tiempo; este tipo de representación es muy útil para el análisis de impacto ya que permite conocer las aceleraciones, velocidades y desplazamientos picos o máximos, así como el número de impactos (durante un segundo) que recibieron las ramas

cuando fueron sometidas a la excitación. El análisis de las señales en el dominio de la frecuencia (llamado análisis espectral) permite visualizar en cuál (o cuáles) frecuencia (s) se encuentra ubicada la componente principal de una señal dada. La función matemática utilizada para este análisis fue la transformada rápida de Fourier o FFT (17).

Para obviar las restricciones que se presentan por las diferencias entre las ramas de un cafeto con relación a su comportamiento al aplicar impacto se trató de normalizar las muestras, es decir, se tomaron ramas de las distintas zonas del árbol, que presentaran diferentes características o condiciones de carga (grado de maduración inicial y cantidad de frutos a lo largo de la rama), para así obtener una aproximación a las condiciones prácticas de excitación para cualquier rama del árbol. En la Figura 4 se describe el procedimiento utilizado en las pruebas preliminares previas a la evaluación definitiva para determinar las condiciones de operación más adecuadas del mecanismo impactador en cuanto a frecuencia de excitación, fuerza de impacto, punto de aplicación y material del dedo impactador, en función de la respuesta de la rama (análisis espectral y desprendimiento de frutos).



Figura 3. Montaje de laboratorio. (a) Equipos utilizados para la adquisición de datos. (b) Ubicación de sensores en la rama

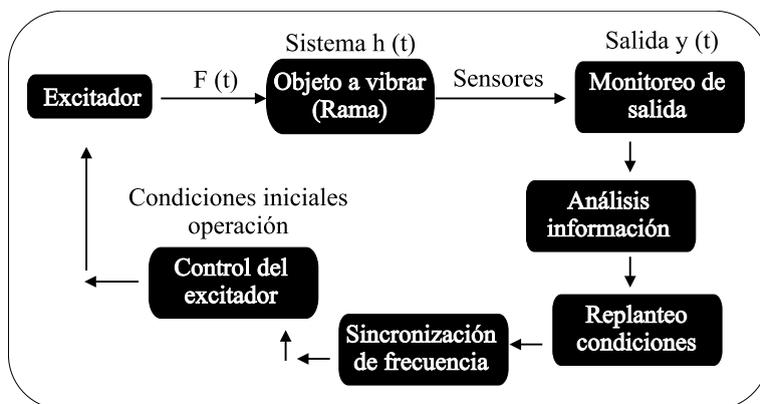


Figura 4. Esquema de experimentación.

**Etapa 3. Estudio del movimiento de los frutos y tiempos de desprendimiento.** Se utilizó un editor que permite observar imágenes de video a una velocidad de 1 cuadro/s para conocer el comportamiento de los frutos en ramas sometidas a impacto. Adicionalmente, en granos maduros escogidos al azar se midió el tiempo en el cual ocurre el desprendimiento, con el objeto de definir tiempos óptimos de aplicación del impacto para la cosecha selectiva del café.

**Etapa 4. Evaluación del prototipo impactador en laboratorio.** Una vez definidas las condiciones de operación, las mejores 12 combinaciones (punto de aplicación, frecuencia y fuerza de impacto) observadas en las pruebas preliminares de la Etapa 2, se tomaron como tratamientos para la evaluación. Éstos fueron asignados aleatoriamente a las unidades experimentales, y la unidad experimental estuvo constituida por la rama. Todos los tratamientos se evaluaron en ramas de café de la variedad Colombia. Por tratamiento se tomaron 10 unidades experimentales. En cada unidad experimental (rama), de cada tratamiento, se registró el número

de frutos maduros, pintones y verdes desprendidos.

Con la información anterior se calculó la proporción de frutos verdes en la masa cosechada (PVMc en %) y la proporción de desprendimiento de frutos maduros y pintones (PMD en %). A las variables de respuesta se les hizo un análisis estadístico descriptivo y en las 4 mejores combinaciones se evaluó el efecto de los tratamientos, bajo el análisis de varianza de una vía, y en los casos en que éste mostró efecto de los tratamientos, se aplicó la prueba de comparación de Duncan, al 5%.

**Etapa 5. Mecanismo propuesto y desempeño en campo.** En el diseño de la herramienta para aplicar impacto a las ramas se consideró que ésta fuera portátil, de bajo peso y que pudiera ser utilizada en cafetales tecnificados en Colombia sin restricciones de densidad de plantación, edad del cultivo, prácticas de renovación utilizadas, pendiente y condiciones de humedad del terreno. Para el primer prototipo se utilizó accionamiento neumático.

Para medir su desempeño en campo se ejecutaron dos fases así:

**Fase 1.** Pruebas preliminares. Se tomó como unidad experimental el árbol de café y los tratamientos se obtuvieron de las 4 mejores frecuencias de excitación, es decir, frecuencias que generaron un porcentaje de desprendimiento de frutos maduros mayor al 70% sin ocasionar daños sobre la estructura de la rama, encontradas en la etapa anterior.

El procedimiento de evaluación preliminar comprendió la ejecución de las siguientes actividades:

- ▶ Marcación de los árboles para evaluar.
- ▶ Colocación de mallas polisombra en la gotera del árbol.
- ▶ Golpeo de las ramas con el mecanismo impactador.
- ▶ Recolección del café desprendido y retiro de las mallas.
- ▶ Recolección manual de los frutos maduros no desprendidos en el árbol.

Los frutos cosechados por unidad experimental (árbol), se clasificaron con base en su estado de maduración (maduros, pintones y verdes).

Los tratamientos para su estudio se distribuyeron bajo un modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio con cuatro tratamientos (cuatro presiones de operación), con diez unidades experimentales (árboles) o replicaciones por tratamiento. En cada unidad experimental, de cada tratamiento, se estudiaron los siguientes indicadores de cosecha: **eficacia** (desprendimiento de frutos maduros), **calidad** (proporción de frutos maduros en la masa cosechada), **eficiencia** (kg/h recolectados o tiempo por árbol), para lo cual se pesaron los frutos desprendidos mecánicamente para cada estado de madurez.

Las variables de respuesta fueron:

- ▶ Proporción de frutos maduros desprendidos mecánicamente (%md).
- ▶ Proporción de frutos verdes en la masa cosechada mecánicamente (%Vmc).
- ▶ Cantidad de café cosechado mecánicamente (g).
- ▶ Tiempo por árbol de aplicación del impacto.
- ▶ Daño mecánico.
- ▶ Rendimiento operativo del equipo (kg/h).

Para obtener las variables de interés se procedió de la siguiente forma:

Para determinar el porcentaje de maduración inicial (GM) presente en los árboles, se tomaron al azar por tratamiento dos de los diez árboles elegidos en los cuales se contó el número inicial de frutos para cada estado de madurez ( $GM = \frac{mi}{mi+pi+vi} * 100$ ). Para la proporción o porcentaje de frutos maduros desprendidos (%md), se recolectaron manualmente y pesaron los frutos maduros no desprendidos en cada árbol, obteniendo el %md mediante la expresión: maduros cosechados mecánicamente/ maduros iniciales \*100.

El peso de los frutos maduros iniciales (antes de aplicar el tratamiento), para el árbol, se obtuvo a partir de lo recolectado más los frutos que quedan en el árbol después de aplicar el tratamiento.

Como mejor tratamiento se seleccionó aquel que mostró menor proporción de frutos verdes en la masa cosechada, mayor proporción de frutos maduros desprendidos y el menor daño mecánico.

**Fase 2.** Evaluación mejor tratamiento. Una vez determinadas las mejores condiciones de operación del equipo en campo y realizados los cambios en la estructura o condiciones de diseño del equipo inicial, se procedió a realizar una

evaluación más rigurosa del equipo, aplicando el tratamiento recomendado en la Fase 1 y considerando una muestra de mayor tamaño (número de árboles). Para la evaluación del equipo se tomó como unidad experimental 7 árboles de café y se realizaron diez repeticiones (10 unidades experimentales), para un total de 70 árboles.

Para determinar el grado de maduración inicial en los árboles se tomó de cada unidad experimental (7 árboles) un árbol al azar (árbol muestra), en el cual una vez cosechado con el equipo se recolectó manualmente la masa restante (frutos verdes y maduros) y posteriormente se pesaron ambas cantidades. El grado inicial de maduración se determinó mediante la suma de lo recolectado mecánicamente y lo manual. En esta etapa se estudiaron los mismos indicadores de recolección usados en la fase anterior (**eficacia, eficiencia y calidad**), los tiempos se midieron por ciclo de operación o unidad experimental y adicionalmente se midió la eficiencia del sistema diseñado para la captura de frutos desprendidos. Las demás variables de interés se determinaron de forma similar a la etapa inicial.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

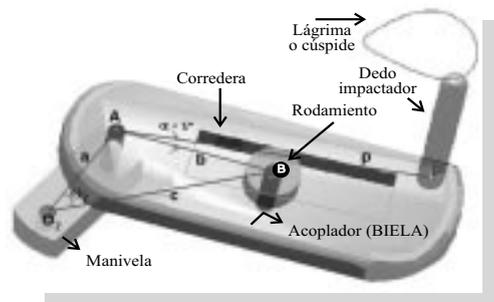
**Etapa 1. Análisis cinemático y dinámico y animación por computador.** A partir del análisis cinemático y dinámico del mecanismo biela - manivela y variaciones en las condiciones de diseño y operación (dimensiones de los eslabones y ubicación del dedo impactador), se eligió el mecanismo con las siguientes características (Figura 5):

- Dimensión del Eslabón 1 (distancia entre la junta O<sub>2</sub> y la junta pasador "B"):  $c = 86\text{mm}$ .
- Dimensión de la Manivela (Eslabón 2):  $a = 22\text{mm}$ .

- Dimensión de la Biela o Acoplador (Eslabón 3):  $b =$  Variable dependiendo de la posición de la manivela.

- Posición del punto P (Ubicación del dedo impactador): El dedo está ubicado a una distancia  $p = 140\text{mm}$  tomada desde la junta pasador A y formando un ángulo  $\alpha = 5^\circ$  con respecto al eje principal del acoplador.

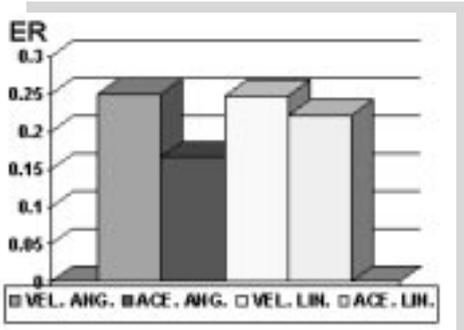
- Dedo impactador construido en Poliamida, reforzado con fibra de vidrio, 0,04kg de peso, 12,7mm de diámetro y 180mm de longitud.



**Figura 5.** Mecanismo Biela – Manivela diseñado para impactar ramas de café.

La animación en ambiente virtual mediante los programas para diseño asistido por computador Mechanical Desktop® y Working Model®, proporciona la trayectoria del dedo impactador, la velocidad angular  $\omega_3$  del eslabón 3, aceleración angular del eslabón 3 (Biela o acoplador),  $\alpha_3$  y las componentes de la velocidad y aceleración lineal absoluta del punto P en las direcciones X y Y; dadas las dimensiones del mecanismo inicial.

Los resultados obtenidos de la comparación entre la animación virtual y el análisis cinemático y dinámico del mecanismo indican que el máximo **ER = 0,25%** (Figura 6) se presentó para la variable velocidad angular del eslabón 3 ( $\omega_3$ ), lo que indica que el diseño y/o



**Figura 6.** Error relativo, calculado para las variables evaluadas.

VEL.ANG.: velocidad angular del eslabón 3 ( $\omega_3$  ).  
 ACE.ANG.: Aceleración angular del eslabón 3 ( $\alpha_3$  ).  
 VEL.LIN.: Velocidad lineal del dedo impactador.  
 ACE.LIN.: Aceleración lineal del dedo impactador.

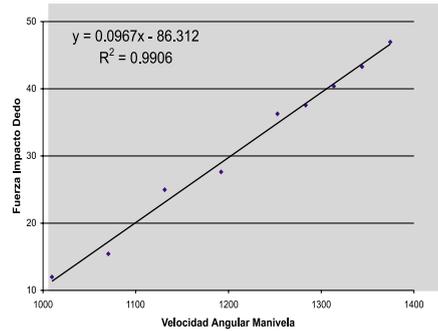
análisis teórico del mecanismo es aceptado y puede ser empleado para determinar las cantidades de interés en los modelos matemáticos para el análisis de la respuesta de la rama ante la aplicación del impacto. La fuerza del impacto en Newtons se puede describir en función de la velocidad angular de la manivela (en rpm), según la siguiente expresión:

$$FI = 0,0967 * \omega_2 - 86,312 < 3 >>$$

Con un coeficiente de determinación del 99% (Figura 7)

**Etapa 2. Respuesta de la rama del café a la aplicación de impacto mecánico.** En las Figuras 8 a la 10 se presenta el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la rama en el punto de impacto. Las vibraciones que se originan por la aplicación del impacto son transversales con respecto al eje de la rama.

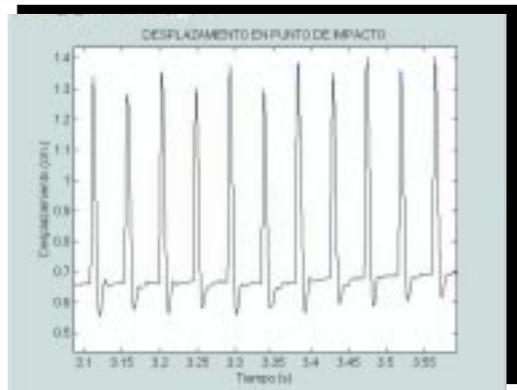
En la Figura 8 se observa que la excitación se aplica a la frecuencia de la manivela. La excitación no es continua en el tiempo, esto es, se excita en tiempos muy pequeños e inmediatamente se retira



**Figura 7.** Fuerza de impacto aplicada por el mecanismo para diferentes valores de frecuencia de rotación.

la excitación. Entre impactos consecutivos la rama responde libremente. Un aspecto importante para destacar es la recuperación de la rama, casi en su totalidad, en un intervalo de tiempo muy corto (menor a 0,02s), mostrando la importancia de su componente elástica. Esta respuesta era de esperarse por que se impactó en un lugar cercano al punto de inserción de la rama con el tronco, en el que la rama presenta una alta rigidez estructural; por tanto, vuelve rápidamente a su posición de equilibrio

Las Figuras 9 y 10 muestran la velocidad y aceleración en el punto de impacto respectivamente. Se observa que la velocidad de la rama es casi cero antes de recibir un nuevo impacto, confirmando la recuperación de la rama antes de



**Figura 8.** Desplazamiento de la rama en el punto de impacto.

recibir otra perturbación. La aceleración en el punto de impacto es alta ( $> 180g$ ), característica del impacto, en el cual se aplican grandes fuerzas en tiempos muy cortos. La diferencia que se presenta entre los valores pico o máximos (variaciones de 180 a 300g), podría atribuirse a que el mecanismo no impacta la rama siempre en la misma posición de su trayectoria con respecto a la posición del eje neutro o al equilibrio inicial de la rama, lo que indica que el dedo impacta a distintas velocidades y aceleraciones (diferente cantidad de movimiento y fuerzas de impacto).

Las respuestas experimentales en el extremo de la rama, consignadas en las Figuras 11 a 13 son oscilatorias y corresponden a las vibracio-

nes transversales transitorias de la rama de café en cada una de sus partes. Las curvas incluyen la suma vectorial de aceleraciones correspondientes a distintas frecuencias naturales de vibración. La Figura 11 muestra la aceleración obtenida en el extremo de la rama. La señal en el dominio del tiempo muestra que las aceleraciones generadas en el extremo de la rama no superan las 50g. En comparación con el punto de impacto se nota un decrecimiento en la magnitud de la aceleración, aproximadamente del orden de siete veces la inicial, debido al amortiguamiento interno y externo. En las Figuras 12 y 13 se muestran las curvas de velocidad y el desplazamiento en el extremo de la rama respectivamente. Con relación a la velocidad, se observa que la rama tiende a oscilar pero es interrumpida por la aplicación del impacto, notándose una pérdida en la energía cinética con respecto al punto de excitación. El desplazamiento medido en el extremo de la rama es notoriamente menor que en el punto de aplicación del impacto, lo cual indica una alta disipación de energía.

Con los datos obtenidos en el dominio del tiempo, para las aceleraciones en el punto de impacto y en el extremo de la rama, se realizó un análisis de magnitud en el dominio de la frecuencia, por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT) utilizando el programa Matlab®.

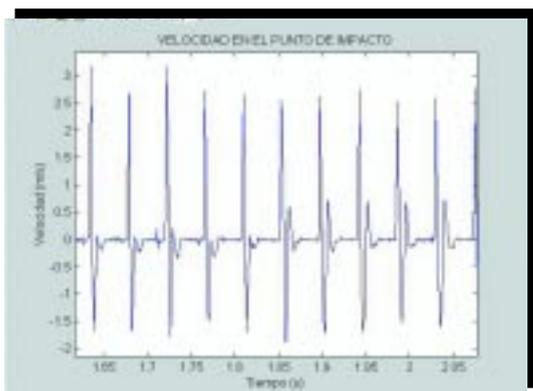


Figura 9. Velocidad en el punto de impacto.

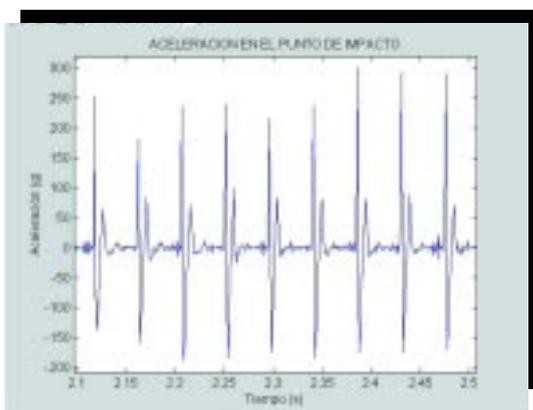


Figura 10. Aceleración en el punto de impacto.

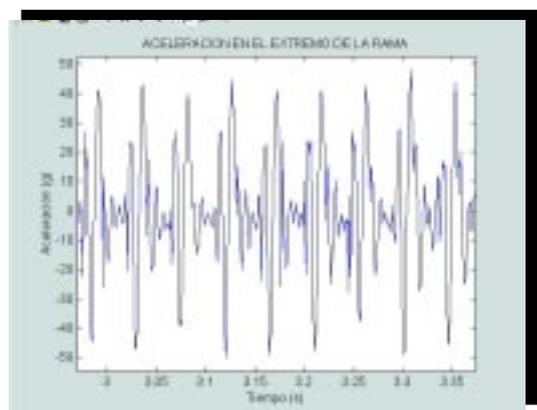
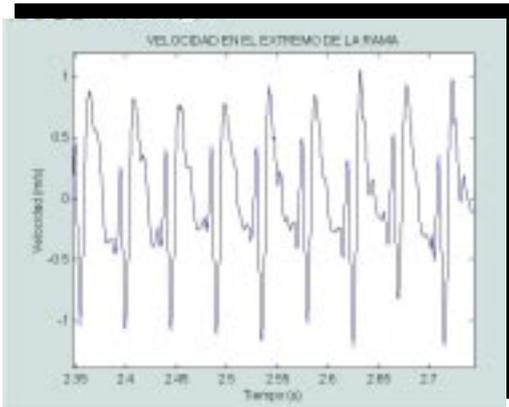
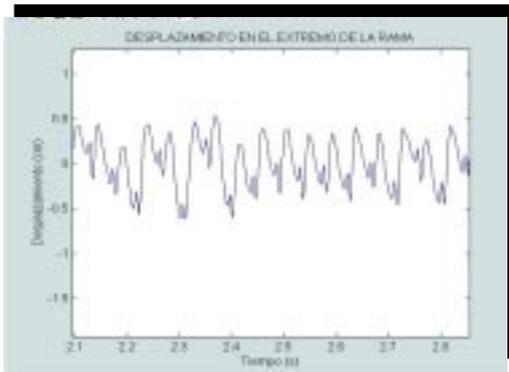


Figura 11. Aceleración en el extremo de la rama.



**Figura 12.** Velocidad en el extremo de la rama.



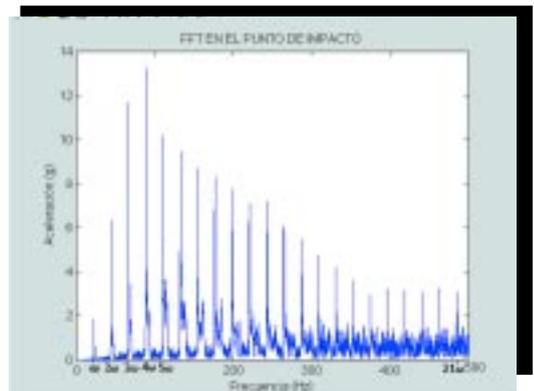
**Figura 13.** Desplazamiento en el extremo de la rama.

Las Figuras 14 y 15 muestran la FFT para la aceleración en el punto de impacto y en el extremo de la rama, respectivamente.

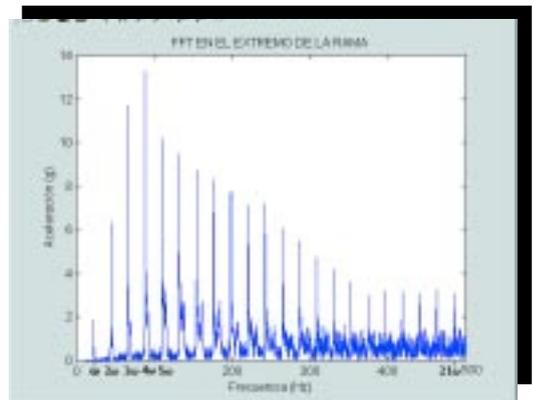
Se observa que para ambos puntos el espectro coincide, mostrando una componente fundamental de frecuencia presente en los datos de aceleración obtenidos similar a la frecuencia de excitación del equipo, con iguales aportes a las magnitudes de aceleración para el punto de impacto y el extremo de la rama respectivamente (para la FFT de la velocidad y desplazamiento ocurre lo mismo).

El análisis anterior indica que las frecuencias de vibración generadas por el prototipo impactador se conservan a lo largo de la rama.

Cuando se varían las condiciones de excitación (punto de aplicación, frecuencia y fuerza de impacto), para los puntos de análisis (punto de impacto y extremo de la rama) los resultados obtenidos presentan un comportamiento similar (se conserva el régimen de vibración transitorio), la respuesta de la rama sólo varía en la magnitud de los parámetros desplazamiento, velocidad y aceleración; esto se debe a que la respuesta dinámica de la estructura depende de la magnitud de sus propiedades (masa, longitud, constante de elasticidad, coeficiente de amortiguamiento y distribución espacial de los frutos) y de la magnitud de la fuerza con que se excita la rama. Para aumentar la eficiencia de transmisión de la vibración a lo largo de la rama, a partir de observaciones anteriores, se optó por impactar



**Figura 14.** FFT para la aceleración en el punto de impacto.



**Figura 15.** FFT para la aceleración en el extremo de rama.

en un punto de la rama con menor rigidez estructural, así como restringir el movimiento en su extremo libre para disminuir el amortiguamiento generado por su oscilación y obtener una estructura de mayor rectitud eliminando el problema de la forma péndula o colgante (Figura 16).

En términos generales se observó un aumento en la eficiencia de transmisión de la vibración y un desprendimiento más efectivo de los frutos a lo largo de la rama cuando se impacta en un punto medio de ésta y se restringe el movimiento en su extremo libre. Esta respuesta era de esperarse debido a que se cambiaron las condiciones de contorno, se tiene una viga con menor longitud y al mismo tiempo más recta.

**Etapa 3. Estudio del movimiento de los frutos y tiempos de desprendimiento.** Se observó aún, alto porcentaje de frutos maduros con desgarramientos de pulpa en zonas próximas a su unión con el pedúnculo, el cual, según Álvarez (1), se presenta en frutos maduros desprendidos por la acción de momentos flectores actuando en la interfase pedúnculo-fruto. El mayor porcentaje de frutos inmaduros, principalmente los de menor tamaño, se desprende en la unión del pedúnculo con el tallito o eje principal. No se identificó un mecanismo de desprendimiento para los frutos inmaduros; sin embargo, debido a que su desprendimiento aumenta con el incremento del tiempo y de la frecuencia de la excitación, al



Figura 16. Restricción del movimiento libre de la rama.

igual que lo reportado por Wang y Shellenberger (21), el desprendimiento se podría atribuir a los ciclos repetitivos de tracción y compresión (que generan fatiga) en la interfase pedúnculo-tallito principal.

En la Figura 17 se muestra esquemáticamente la forma como oscilan los frutos (pendular y basculante) al impactar las ramas. Las observaciones de video permitieron identificar que el mayor porcentaje de desprendimiento de frutos en ramas con el extremo libre ocurre en los primeros dos segundos de aplicación del impacto (Figura 18). Cuando se restringe el desplazamiento del extremo de la rama, el desprendimiento de frutos es más uniforme en el tiempo. En los primeros 2 segundos hay desprendimiento principalmente de frutos maduros; a partir de este tiempo se acentúa el desprendimiento de frutos inmaduros siendo relativamente alto (más de 20% en la masa cosechada) a los 6s.

**Etapa 4. Evaluación del prototipo impactador en laboratorio.** En la Tabla 1 se presenta el análisis descriptivo realizado para cada una de las variables estudiadas en 12 tratamientos con la aplicación de impacto durante el mismo tiempo (6s). Se observa que los valores del tiempo óptimo de aplicación del impacto, son inferiores

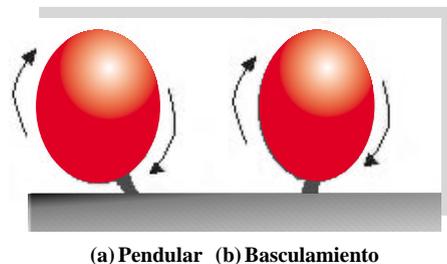


Figura 17. Modos de oscilación del sistema fruto-pedúnculo del café observados al aplicar impacto a las ramas.

al promedio observado en la cosecha manual (6,3 segundos por rama, obtenido de Vélez *et al.* (20) considerando el valor promedio para recolectar los frutos maduros en un árbol de 4 años con 40 ramas productivas). Para un mismo punto de aplicación de la perturbación, el tiempo necesario para ocasionar el mismo desprendimiento decrece a medida que se aumenta la frecuencia de aplicación del impacto.

Con el empleo de los tiempos óptimos de operación recomendados se espera que disminuyan los porcentajes de desprendimiento tanto de frutos maduros como de inmaduros, principalmente de estos últimos. Cuando se impactaron ramas, con restricción del desplazamiento en la dirección vertical de su extremo libre, en un punto cercano a su inserción al tronco, hubo daño mecánico. A pesar de lo anterior, para futuras investigaciones no debería descartarse esta condición de impacto ya que se obtuvo el mejor desprendimiento selectivo de frutos maduros.

La selección de los 4 tratamientos (combinaciones de punto de aplicación – frecuencia – fuerza de excitación) que presentaron mejor respuesta al impacto se realizó considerando los parámetros porcentaje de desprendimiento de frutos maduros y daño mecánico. Basados en estos criterios se eligieron los tratamientos 7 a 10 (los cuales presentaron mayores porcentajes de

desprendimiento y no ocasionaron daño mecánico sobre la estructura), para compararlos entre sí.

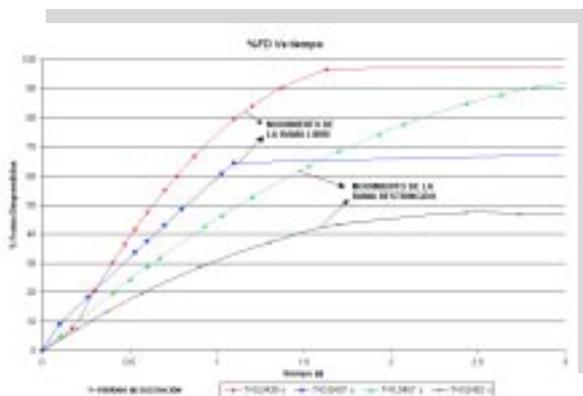
Para las variables MI y PMD el análisis de varianza mostró efecto entre los tratamientos. Para la variable PVmc el análisis de varianza no mostró efecto entre los tratamientos.

En la Tabla 2 se observa la prueba de Duncan a un nivel del 5%, realizada para las variables MI, PMD, PVmc.

El tratamiento con el menor PMD correspondió a la frecuencia de 1.313rpm y punto de aplicación de 15cm tomados a partir del punto de inserción de la rama con el tronco (tratamiento 7). Los tratamientos 8, 9 y 10 fueron estadísticamente iguales. Es interesante destacar que el mayor valor de PMD se obtuvo en el tratamiento 10 (frecuencia de excitación = 1.328,77rpm y punto de aplicación = 15cm) a pesar de ser el tratamiento que menor cantidad de MI poseía.

Para la variable PVmc no existe diferencia estadística entre los tratamientos. Este resultado se debe básicamente a que el tiempo de operación fue relativamente alto (6s).

Estos resultados indican que al impactar la rama (para los cuatro tratamientos comparados), se obtiene un buen valor en la variable PMD, sin



**Figura 18.** Desprendimiento de frutos de café con respecto al tiempo aplicando impacto a ramas con diferentes períodos de la excitación.

**Tabla 1.** Análisis descriptivo para las variables estudiadas en la medición del efecto del impacto mecánico aplicado a la rama de café durante 6 segundos.

No.	TRATAMIENTO COMBINACIÓN			TOTAL FRUTOS		TIEMPO(s)		TIEMPO(%)		PMI(%)		PVI(%)		PMD(%)		PVmc(%)		DAÑO
	FRE. EXC. (r.p.m.)	F. I. (N)	P. A. (cm)	Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)	
1	1335	42	10	72	31	1,58	43	59	22	41	31	40	90	24	79	34	89	SI
2	1347	43	10	74	25	1,04	15	60	27	40	41	49	58	20	103	21	68	SI
3	1359	45	10	54	16	1,25	24	65	20	35	37	63	35	28	79	17	65	SI
4*	1320	41	25*	80	26	1,51	43	55	31	45	38	43	39	26	72	30	46	NO
5	1368	45	13	49	24	3,34	58	71	12	29	31	69	29	39	45	18	52	SI
6	1374	46	13	44	20	1,13	27	63	11	37	19	85	23	59	41	29	46	SI
7**	1314	40	15	63	31	5,30	22	71	15	29	37	71	37	44	55	19	34	NO
8**	1314	40	20	81	33	2,94	63	70	16	30	37	88	13	59	43	22	55	NO
9**	1289	38	20	58	36	2,88	29	63	20	37	35	88	9	49	62	22	34	NO
10**	1329	42	15	42	25	1,77	67	63	18	37	31	91	14	64	37	28	34	NO
11**	1344	43	15	53	22	2,88	55	61	22	39	34	87	14	58	58	27	47	NO
12**	1374	46	10	59	14	4,37	29	62	19	38	30	89	8	43	61	22	44	SI

\*Se impactó la rama por debajo.

\*\*Se restringió el movimiento de la rama en su extremo libre a una distancia del punto de aplicación de 20 cm y obstruyéndola en su posición de equilibrio.

FRE. EXC.: Frecuencia de Excitación (r.p.m.)

F.I.: Fuerza de impacto (N)

P.A.: Punto de aplicación, distancia a partir del punto de inserción de la rama con el tronco (cm)

T.O.: Tiempo óptimo recomendado de aplicación del impacto (s)

PMI: Proporción de frutos maduros iniciales (%).

PVI: Proporción de frutos verdes iniciales (%).

PMD: Proporción de frutos maduros desprendidos (%).

PVD: Proporción de frutos verdes desprendidos (%).

PVmc: Proporción de frutos verdes en la masa cosechada (%).

Daño: Alteración física que se presente por la aplicación de fuerzas externas

C: Coeficiente de Variación.

embargo también se obtienen valores altos de PVD (Tabla 1), debido a que se utilizaron tiempos de aplicación largos comparados con los óptimos encontrados. Es de esperar que al aplicar los tiempos óptimos se disminuya notoriamente el desprendimiento de frutos inmaduros.

**Etapas 5. Dispositivo diseñado y evaluación en campo. Herramienta propuesta.** En la Figura 19 se presenta el equipo desarrollado en esta investigación para desprender frutos de café. El equipo pesa 1.624g, de los cuales 578g (36%) corresponden al motor neumático, 769g (47%) a la estructura construida en aluminio y 277g (17%) al mecanismo y los accesorios (Biela o acoplador, dedo impactador, eje y acople transmisión movimiento, rodamiento).

**Desempeño en campo. Fase 1.** Las pruebas preliminares con el cosechador portátil fueron realizadas en la Subestación experimental el Rosario ubicada en el municipio de Venecia Antioquia, los tratamientos se obtuvieron de operar el equipo a presiones de 5, 6, 7 y 8 bares en el moto-compresor, presiones correspondientes a velocidades en la manivela de 1.282, 1.317, 1.353 y 1.392 rpm, respectivamente. La evaluación fue realizada en un lote de café variedad Colombia Roja de dos años de edad con una distancia de siembra de 1m x 1m y una pendiente del 40%.

En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos para cada una de las variables estudiadas, en cada uno de los árboles sometidos a impacto,

para los dos tratamientos que presentaron menor %Vmc, correspondientes a presiones de operación del equipo de 5 y 6 bar.

Para los demás tratamientos evaluados (presiones de operación de 7 y 8 bar), el %Vmc obtenido fue de 24,7% y 26,85% respectivamente, los rendimientos operativos (netos del equipo, es decir no incluyen el tiempo empleado para extender y recoger las mallas) son de 36,35kg/h y 38,6 kg/h. Sin embargo, por su alto valor en %Vmc, el daño generado en las ramas por las fuerzas aplicadas (descortezamiento) y la rapidez del desprendimiento que no permite el manejo o control de los tiempos de aplicación (con el prototipo actual), se descartan para posteriores evaluaciones.

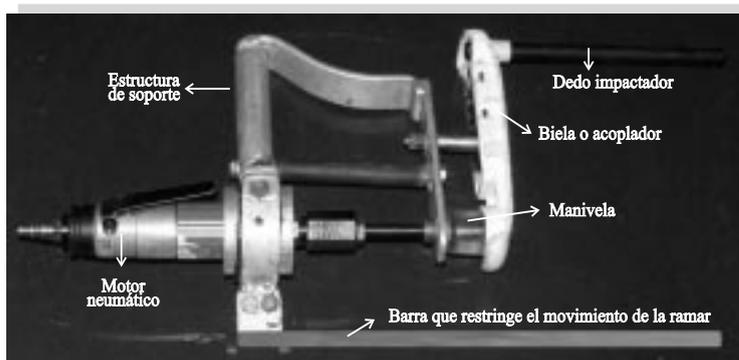
Comparando los tratamientos 1 y 2, se observa que el tratamiento 1 (presión de operación de 5 bar) a pesar de ser el que menor proporción de frutos maduros iniciales presentaba (42,25%), fue el que menor cantidad de frutos verdes en la masa final cosechada presentó (%Vmc = 12,474% en promedio), siendo de interés los valores obtenidos para 4 de los 10 árboles evaluados (%Vmc inferior al 10%), 5 de los árboles presentan %Vmc inferiores al 19% y solamente un árbol presenta un %Vmc del 21%. Estos resultados están influenciados probablemente por la distribución de los frutos maduros y verdes en las ramas del árbol, por la destreza del operario al momento de impactar las ramas que presentaban mayor concentración de frutos maduros y por el tiempo de aplicación del impacto en cada rama.

**Tabla 2.** Prueba de Duncan a un nivel del 5% para las variables MI, PMD, PVmc.

TRATAMIENTO	MI		PMD		PVmc	
	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	c	CV
7	45,5 ab*	41,19	70,91 b	37,17	19,31 a	34,29
8	56,7 a	35,86	88,14 a	12,95	22,16 a	54,87
9	35,8 bc	33,18	87,53 a	9,42	21,58 a	34,13
10	26,6 c	36,46	90,52 a	13,883	28,06 a	33,619

\*En una columna promedios con igual letra no presentan diferencia estadística. Duncan al 5%.

**Figura 19.**  
Prototipo cosechador portátil propuesto



En la Figura 20 se presenta la masa cosechada para este tratamiento. Para la variable rendimiento, el menor valor se obtuvo en el tratamiento 1 (25,4kg/h), debido a que solamente se impactaron las ramas que a juicio del operario presentaban mayor proporción de frutos maduros, de 15 a 20 ramas/árbol en promedio. Sin embargo, considerando valores de rendimiento promedio en cosecha manual en Colombia (20), 120kg de cereza/jornada (15kg/h), se obtiene un incremento importante en la productividad de la mano de obra (69,3%).

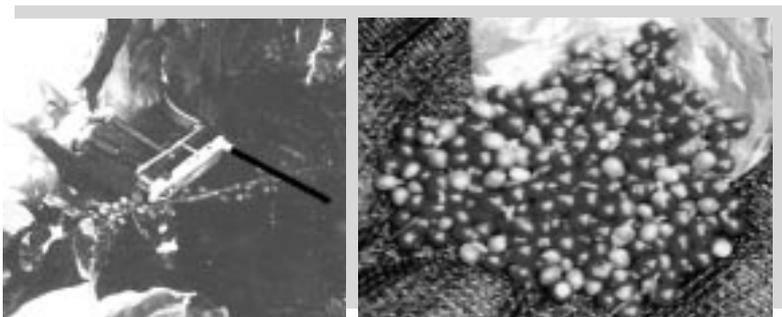
El rendimiento se podría mejorar mediante entrenamiento a los operarios y el desarrollo de procedimientos más eficientes para desplazarse en los árboles y en la plantación. Para la variable %MD el menor valor también se presentó con el primer tratamiento (64%), sin embargo este valor se puede considerar aceptable dado el grado de maduración inicial que presentaron los árboles (42,25%).

Teniendo en cuenta los criterios mencionados anteriormente, se escogió como mejor presión

**Tabla 3.** Análisis descriptivo de las variables estudiadas.

ÁRBOL	PRESIÓN OPERACIÓN = 5 BAR 1.282 RPM (GM=42,25%)				PRESIÓN OPERACIÓN = 6 BAR 1.317 RPM (GM=46,58%)			
	%MD	%Vmc	Tiempo (S)	Rendimiento (kg/h)	%MD	%Vmc	Tiempo (S)	Rendimiento (kg/h)
1	43,580	8,406	43,62	25,890	64,951	13,735	22,91	24,576
2	53,607	9,834	29,17	28,052	76,569	13,583	29,11	22,050
3	59,620	12,160	31,37	27,221	64,370	34,968	39,92	24,304
4	47,078	16,360	46,69	22,329	80,655	15,978	37,22	34,095
5	71,446	21,407	42,37	21,089	82,726	17,594	38,95	37,091
6	74,867	14,037	32,86	32,823	68,167	31,348	36,92	42,484
7	63,349	18,016	39,74	21,696	74,795	22,927	34,44	29,822
8	76,821	14,021	46,08	30,781	77,190	21,850	45,21	31,374
9	63,417	3,452	45,66	18,323	78,129	25,017	20,51	27,522
10	85,982	7,051	40,91	29,057	76,729	16,268	40,13	28,769
PROM.	63,977	12,474	39,847	25,402	74,428	21,327	34,532	30,759
C.V. (%)	<b>21,180</b>	<b>43,487</b>	<b>16,219</b>	<b>18,500</b>	<b>8,605</b>	<b>34,553</b>	<b>23,004</b>	<b>20,479</b>

\*Donde: GM = Grado de madurez inicial en el árbol.



**Figura 20.**  
Posición del  
equipo en la  
rama y masa  
cosechada en  
pruebas  
preliminares

de operación 5 bar y se procedió a realizar una observación tomando un mayor número de muestras (árboles). Con el fin de evitar el empleo de mallas para atrapar los frutos desprendidos se diseñó el dispositivo mostrado en la Figura 21, el cual es económico y permite el manejo ágil de la herramienta.

**Fase 2.** Las observaciones se realizaron en la Subestación experimental Santa Bárbara ubicada en el municipio de Sasaima, Cundinamarca, en un lote de variedad Colombia, zocas de segunda cosecha, con dos tallos por sitio. Para facilitar el desprendimiento de los frutos maduros se aplicó ETHREL a 800 ppm. El equipo fue operado a una presión de 5 bar (1.282rpm), según lo recomendado en la Fase 1. Para cada uno de los indicadores estudiados se determinó el intervalo de confianza con una confiabilidad del 95%. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación del equipo.

**Grado de Maduración Inicial: %MI.** En general, la proporción y cantidad de frutos maduros varía notoriamente entre árboles de café en una plantación. El porcentaje promedio de frutos maduros iniciales fue alto con relación a los valores que normalmente se presentan en plantaciones colombianas en las épocas de mayor flujo de cosecha, denominadas “pico”.

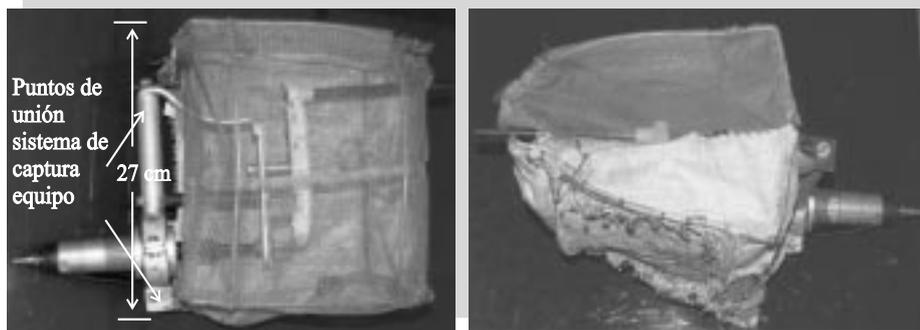
**Calidad de la Cosecha: % Vmc.** El valor promedio obtenido (12,56%) fue ligeramente inferior al observado en las pruebas preliminares. Esta

respuesta podría deberse a las dificultades para operar la herramienta por la alta densidad de la plantación (14.000 tallos/Ha). Sin embargo, en el 70% de los árboles cosechados el % Vmc es inferior al 13,71%, lo que indica el potencial de la herramienta para obtener un desprendimiento selectivo y la importancia de aplicar el impacto en las ramas, ó partes de esta, que presentaban mayor concentración de frutos maduros.

**Eficiencia de la Cosecha: Rendimiento Operativo (kg/h).** En comparación con los resultados obtenidos en las pruebas preliminares se observa un incremento en el rendimiento operativo promedio de 2,5kg/h. Con relación a la cosecha manual tradicional se logró un aumento del 86,5%.

**Eficacia de la Cosecha: %MD.** Se obtuvo un 61,96% de frutos maduros desprendidos, valor menor en un 2% al obtenido en las pruebas preliminares.

Esta diferencia se debe básicamente a los siguientes factores: la alta densidad de la plantación (2 tallos por sitio) dificultó la operación del equipo por la falta de visibilidad y la presencia de ramas entreveradas, y por limitaciones (falta de visibilidad, principalmente) atribuibles al dispositivo de captura de granos. Teniendo en cuenta que los frutos maduros presentaban de 30 a 32 semanas de desarrollo y que se pueden cosechar 2 ó 3 semanas después, sin que se desprendan ni se afecte su calidad en taza, el valor de eficiencia obtenido se considera satisfactorio.



**Figura 21.** Dispositivo para la captura de los granos desprendidos con el impactador de ramas diseñado en Cenicafé

**Eficiencia del Sistema de Captura.** La eficiencia del sistema de captura en todos los árboles fue superior a 56% (en promedio 65%). El sistema de captura cumplió eficientemente su labor, es decir, los frutos que eran desprendidos por el equipo fueron atrapados en su totalidad; sin embargo, las pérdidas de frutos al suelo ocurrieron por falta de capacidad de almacenamiento de la tolva del dispositivo.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir que la aplicación de impacto en las ramas con equipos portátiles es una alternativa a tener en cuenta para la cosecha selectiva de frutos maduros, sin restricciones por la edad y el manejo de los árboles, la pendiente del terreno y la humedad del suelo. Con esta tecnología se puede incrementar notoriamente el rendimiento

de la mano de obra, en más del 80%. Con el fin de mejorar la selectividad para desprender frutos maduros y la eficacia se recomienda utilizarla cuando el porcentaje de frutos maduros sea superior al 50%. Para lograr alta calidad de cosecha el tiempo de aplicación del impacto en las ramas no debe exceder a 2s.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Iván Aristizábal T., a los Ingenieros electrónicos Jhon Arvey Henao, Andrés Felipe Salazar y al Ingeniero mecánico Carloman Arcila, por sus aportes técnicos.

Los resultados que aquí se presentan se obtuvieron en el marco del Proyecto

**Tabla 4.** Análisis descriptivo de los indicadores Calidad de recolección, Eficiencia, Eficacia y Eficiencia del dispositivo diseñado para capturar los frutos desprendidos con el impactador de ramas, en la fase 2 realizada en subestación experimental Santa Bárbara.

	%MI	Calidad Cos. % Vmc	Eficiencia. Rend. (kg/h)	Eficacia %MD	Eficiencia Sist. Cap.
MEDIA	58,06	12,56	27,97	61,96	65,05
C.V. (%)	32,02	29,78	20,40	6,08	8,21
MÍNIMO	31,77	5,89	18,25	55,86	56,23
MÁXIMO	90,55	17,58	33,92	68,76	74,72
Error Standard	5,88	1,18	1,80	1,19	1,69
Confidence Level(95.0%)	13,30	2,68	4,08	2,70	3,82
Límite Inferior (95%)	44,76	9,89	23,89	59,26	61,23
Límite Superior (95%)	71,36	15,24	32,05	64,65	68,87

“Disminución de costos en la cosecha del café mediante la mecanización y la cosecha manual asistida” cofinanciado por Colciencias

Futures. A source book of some critical issues confronting the coffee industry. Chinchiná, CABI Commodities-FEDERACAFÉ-USDA-ICO, 2001. p. 44-55.

## LITERATURA CITADA

1. AVALLONE. E. A.; BAUMEISTER III, T. Manual del ingeniero mecánico de Marks, México, McGraw-Hill. 1995. p. 5-44; 5-50.
2. BEER. F.; JOHNSTON JR. R. Mecánica de materiales. México, McGraw - Hill. 1989. p. 492 - 497.
3. CALERO, R.; CARTA, J.A. Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros. Madrid, McGraw-Hill. 1999. 615 p.
4. CIRO V., H. J.; ALVAREZ M., F.; OLIVEROS T., C.E. Estudio de la dinámica de las vibraciones longitudinales y transversales aplicadas a las ramas de café. Cinchíná, Cenicafé, 1997. 30p (Informe final de investigación).
5. GIL R., J.; GRACIA L., C. Estudio de la eficiencia de transmisión de vibraciones en la estructura de los olivos. *In: Anales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias*. 1979. p.95-117. (Separata No5)
6. HARRIS C. M. Shock and vibration handbook. New York, McGr-Hill, 1996. p. 1-1 - 44-66.
7. MABIE. H. H. Mecanismos y dinámica de maquinaria. 2. ed. México, editorial Limusa, 1996. p. 274-524.
8. MOHSENIN. N. N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 890 p.
9. MULLER. H.G. Introducción a la reología de alimentos. Zaragoza, Acribia, 1978. 174 p.
10. NORRIS, C.P. Mechanization of the coffee harvesting of coffee industry. *In: Baker, P.S. (ed). Coffee Futures*. A source book of some critical issues confronting the coffee industry. Chinchiná, CABI Commodities-FEDERACAFÉ-USDA-ICO, 2001. p. 44-55.
11. NORTON, R. L. Diseño de maquinaria. México, McGraw-Hill, 1998. 794 p.
12. OLIVEROS T., C. E. Informe anual de actividades 1996. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ - CENICAFÉ*. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola 1996-1997. Chinchíná, Cenicafé, 1997. 16p.
13. OLIVEROS T., C.E. Informe anual de actividades 1997. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ*. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola 1997-1998. Chinchíná, Cenicafé, 1998. 24p.
14. SHIGLEY. J.; MISCHKE. C. Diseño en ingeniería mecánica. 5. ed. México, McGraw-Hill, 1990. 883 p.
15. SHIGLEY, J.; VICKER. J. Teoría de máquinas y mecanismos. México, McGr-Hill, 1992. 611p.
16. SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P., Engineering principles of agricultural machines. St. Joseph, ASAE, 1993. 601p.
17. STREMLER. F. G. Sistemas de comunicación. Wisconsin, Editorial Alfaomega, 1989. p. 79 - 144.
18. THOMSON. W. T. Theory of vibration with applications. Estados Unidos. Prentice Hall. 1993. 546 p.
19. VELEZ Z., J.C.; MONTOYAR., E.C.; OLIVEROS T., C.E. Estudio de tiempos y movimientos para el mejoramiento de la cosecha manual de café. Boletín Técnico. Cenicafé No 21:1-91. 1999.
20. WANG, J.K.; SHELLENBERGER, F.A. Effects of cumulative damage due to stress cycles on selective harvesting of coffee. Transactions of the ASAE. 10 (2): 252-255. 1967