

RESPUESTA DE LOS FRUTOS DE CAFÉ A LA ESPETACIÓN

Victor Manuel Martínez-Castro* ; Juan Rodrigo Sanz-Uribe**; Carlos Eugenio Oliveros-Tascón**;
Edilson León Moreno-Cárdenas**

RESUMEN

MARTÍNEZ C., V.M.; SANZ U., J. R.; OLIVEROS T., C. E.; MORENO C., E. L. Respuesta de los frutos de café a la espetación. Cenicafé 59(1):64-74.2008

Se determinaron las fuerzas necesarias para espetar¹ frutos maduros e inmaduros de café, lo mismo que la fuerza de retención de estos frutos, con una tachuela de 12,7 mm, un alfiler de acero y tres punzones con punta en forma de cabeza cónica con diámetros máximos de 1,0 mm, 1,5 mm y 2,0 mm. Para las pruebas se utilizó la máquina de ensayos mecánicos INSTRON-5569, con una celda de carga con capacidad para 1 kN. Los frutos maduros e inmaduros tenían 217 y 203 días después de la floración, respectivamente. De los punzones evaluados, el de cabeza cónica de 2,0 mm de diámetro presentó la mayor fuerza de retención sobre frutos maduros (5,4 N en promedio) que es ligeramente superior a la mitad de la fuerza necesaria para desprender frutos maduros a tensión (10,0 N), lo que significa que dos punzones como los mencionados tienen el potencial de remover a tensión un fruto maduro. Adicionalmente, se observó que la fuerza para espetar frutos inmaduros es casi cuatro veces la fuerza de espetación de los frutos maduros, lo que hace este principio promisorio para la cosecha selectiva de café.

Palabras clave: Maduración, punzones, fuerza de retención, fuerza de espetación.

ABSTRACT

The forces necessary to stab ripe and unripe coffee cherries as well as the retention forces of these cherries were determined by using a 12.7 mm tack, a steel pin and three conic headed punches with diameters not higher than 1.0 mm, 1.5 mm and 2.0 mm. A mechanical testing machine INSTRON – 5569, with a 1 kN load cell was used for the tests. The ripe and unripe cherries were 217 and 203 days old after blossom, respectively. The largest conic headed punch (2.0 mm) exhibited the greatest retention force on ripe fruits, a mean of 5.4 N, which is slightly higher than half the force needed to detach mature coffee fruits by tension (10.0 N). That means that two pins, as the ones mentioned before, have the potential to remove a cherry by tension. Additionally, it was observed that the force needed to stab unripe cherries is about four times the force needed to stab ripe cherries which makes this coffee-picking method look promising for selective coffee harvest.

Keywords: Ripening, pins, retention force, stabbing force.

* Ingeniero Agrícola. Universidad Surcolombiana. Neiva, Huila, Colombia.

** Investigador Científico II, Investigador Principal e Investigador Asociado, respectivamente. Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

¹ Espetar: Acción de introducir a través de un cuerpo un instrumento puntiagudo (3).

La cosecha selectiva es la labor más costosa en la producción de café e indispensable para mantener la calidad del café colombiano (4). En la actualidad no se cuenta con un principio físico que pueda implementarse de manera práctica para desprender selectivamente frutos maduros de forma masiva, y que facilite la mecanización o semimecanización de esta labor.

En la Disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé se han conducido investigaciones tendientes a evaluar principios físicos que muestren diferencias significativas entre los frutos maduros e inmaduros, con el fin de utilizarlos para mecanizar la cosecha de café y disminuir los costos de producción. Una investigación realizada por Álvarez *et al.* (2), determinó que la tensión y la torsión del pedúnculo son los esfuerzos que más diferencias presentan entre frutos maduros e inmaduros, lo cual puede ser base para lograr selectividad en la cosecha mecánica de café. Sin embargo, es difícil disponer de un dispositivo mecánico que someta rápidamente uno a uno los frutos de café a estos esfuerzos.

A partir de las investigaciones mencionadas y de estudios sobre la forma y las dimensiones del racimo realizados por Londoño *et al.* (5), se han desarrollado modelos de herramientas manuales y motorizadas para asistir la cosecha del café. Dentro de las herramientas manuales se encuentra el dispositivo denominado RASELCA (RASpador SElectivo de CAFé), desarrollado por Oliveros *et al.* (7), que consta de un segmento de tubo con ocho dedos delgados radiales de poliamida (6), en el interior, dispuestos de tal manera que desprenden los frutos más sobresalientes, en su mayoría maduros, cuando se mueve sobre el eje de la rama. Con este dispositivo se ha logrado un promedio de rendimiento de $16,9 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ en árboles con maduración mayor al 80%, una cantidad de frutos maduros

desprendidos cercana al 100% y un promedio del porcentaje de frutos inmaduros en la masa cosechada de 5,3%.

Entre las herramientas motorizadas se destaca el IMFRA (IMPactador de Frutos y RAMas), desarrollado por Oliveros *et al.* (7), que consta de una fuente de potencia con baterías recargables, un motor DC y dos elementos que giran en el mismo sentido, e impactan los frutos a voluntad del operario, ya sea individual o masivamente, de acuerdo con el patrón de maduración de los árboles. Con este dispositivo se han logrado desprendimientos selectivos promisorios y reducción del costo unitario de recolección en árboles con maduración superior al 50% y cargas por encima de 500 g de frutos en óptimo estado de madurez.

En la presente investigación se buscó aprovechar las diferencias en la respuesta en la remoción de frutos de café maduros e inmaduros cuando se introduce en éstos un elemento puntiagudo. La aplicación de este principio no es nueva en café. Restrepo *et al.* (8) utilizaron el principio de espelación para separar objetos duros de la masa de café cereza, por medio de un sistema de punzones. La masa de frutos de café se dejaba caer en cortina sobre un cilindro rotatorio con punzones, desde una altura fija, y se buscaba que los frutos fueran espelados y retenidos mientras que los objetos duros no. Además de encontrar que el principio funcionaba en la separación de objetos duros, los autores encontraron diferencias significativas en la fuerza necesaria para espelar y retener frutos de café según su estado de desarrollo, confiriéndole potencialidad al sistema para clasificar también frutos inmaduros. De acuerdo con dicho estudio, la fuerza mínima para espelar frutos inmaduros de café con los punzones utilizados varió entre 0,29 y 0,49 N, para frutos pintones entre 0,24 y 0,38 N y para maduros entre 0,18 y 0,30 N.

El principio de espesación también se emplea en la recolección de aceitunas caídas. Varias empresas fabrican equipos de accionamiento manual, los cuales en su mayoría se componen de un cilindro con punzones que al girar cerca al suelo penetran los frutos, que finalmente se separan y descargan en una cubeta. En una investigación realizada por Acosta (1) con un equipo similar, se evaluó la recolección de frutos de café del suelo, para ayudar al manejo integrado de la broca, con una eficacia máxima de recolección de 70,8%.

El objetivo de este trabajo consistió en determinar la viabilidad técnica de utilizar punzones para la cosecha selectiva de café variedad Colombia de cereza roja, aprovechando la diferencia en la fuerza para penetrar y retener frutos en estado óptimo de maduración e inmaduros. En esta investigación se presenta información técnica básica de este principio, que permita futuros desarrollos de dispositivos para la recolección manual asistida de café.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el laboratorio de Ingeniería Agrícola, del Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, localizado en Chinchiná (Caldas) a una altitud de 1.310 m, con un promedio de temperatura anual de 20,6°C y un promedio de humedad relativa de 75%.

Se partió de estudios obtenidos con punzones de tipo comercial como tachuelas de 12,7 mm y alfileres de acero, y se utilizó una máquina de ensayos mecánicos INSTRON-5569, de tal manera que los resultados sirvieran de base para diseñar punzones que presentaran una mayor diferencia en la fuerza de espesación entre diferentes estados de maduración del fruto, lo mismo que una fuerza de retención suficiente para hacer viable el desprendimiento de frutos maduros sometidos a tensión.

Para la evaluación de cada tipo de punzón se tomaron muestras de 100 frutos, agrupados en dos estados de desarrollo, de acuerdo con la escala de maduración para frutos de variedad Colombia (Figura 1), en la cual se

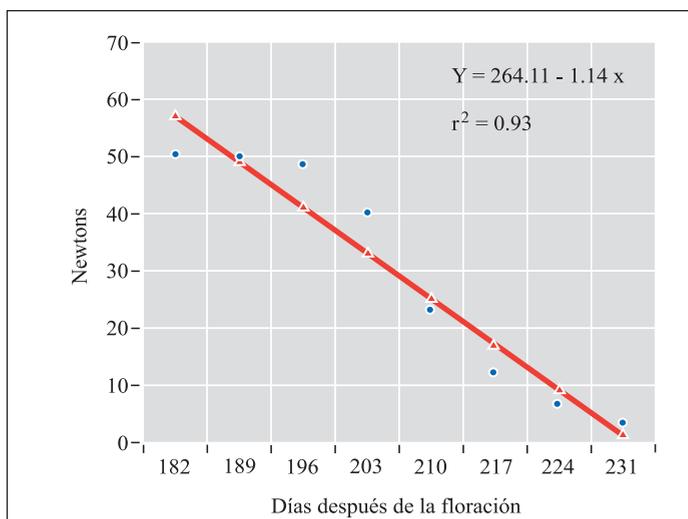


Figura 1.
Correlación entre la firmeza ecuatorial de frutos de café y el estado de desarrollo (6).

identificaron como frutos inmaduros aquellos de color verde-amarillo y firmeza ecuatorial entre 39,19 N y 41,53 N, los cuales según Marín *et al.* (6) corresponden a frutos con 203 días después de la floración (ddf). También se identificaron frutos maduros cuya firmeza ecuatorial estuvo entre 11,92 N y 12,83 N, y que corresponden a frutos con 217 ddf. La firmeza se midió con un penetrómetro *Fruit Tester*, FT -327, con un punzón de 3 mm de diámetro.

Se partió del estudio de las propiedades reológicas del mucílago, como un fluido altamente viscoso que no contribuye a la fuerza de retención (8), y al observar que la cáscara es un sólido deformable con comportamiento elástico y plástico, se diseñaron y construyeron tres punzones con la punta en forma de cabeza cónica, en acero inoxidable, con las dimensiones indicadas en la Figura 2.

En la Figura 3 se observan los tres punzones construidos con una tolerancia de $\pm 0,05$ mm.

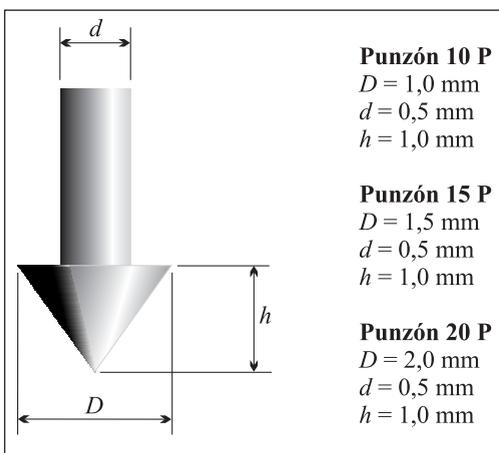


Figura 2. Dimensiones de los punzones con punta en forma de cabeza cónica usados (tolerancia $\pm 0,05$ mm).

La experimentación consistió en determinar para cada punzón la fuerza necesaria para espetar un fruto de café, en ambos estados de desarrollo, en la zona cercana al ombligo, denominada F_E y la fuerza máxima necesaria para remover el punzón del fruto espetado, la cual se llamó fuerza de retención del punzón en el fruto, F_R . Los punzones se instalaron en la mordaza de la máquina INSTRON, fija al bastidor que va unido a una celda de carga, la cual está conectada al sistema de adquisición de datos de la máquina.

La fuerza de espetación se registró desplazando hacia abajo el bastidor de la máquina INSTRON a una velocidad de $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ y la fuerza de retención se determinó desplazando el bastidor a la misma velocidad hacia arriba. Durante las pruebas se registró el comportamiento de las fuerzas de espetación y retención respecto al tiempo, así como sus valores máximos. El montaje experimental se muestra en la Figura 4.

Con la información anterior se establecieron los valores medios, máximos, mínimos y los coeficientes de variación para F_R y F_E . Para

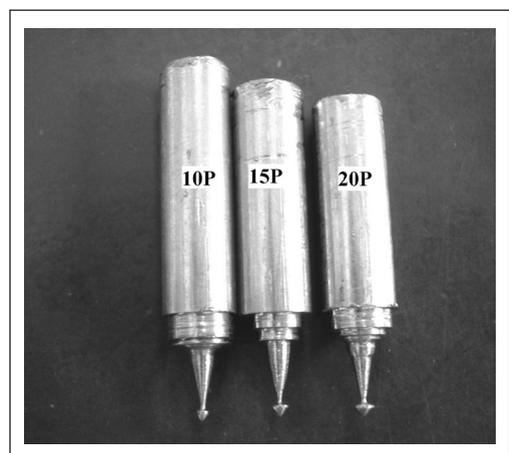


Figura 3. Punzones utilizados para penetrar frutos de café.

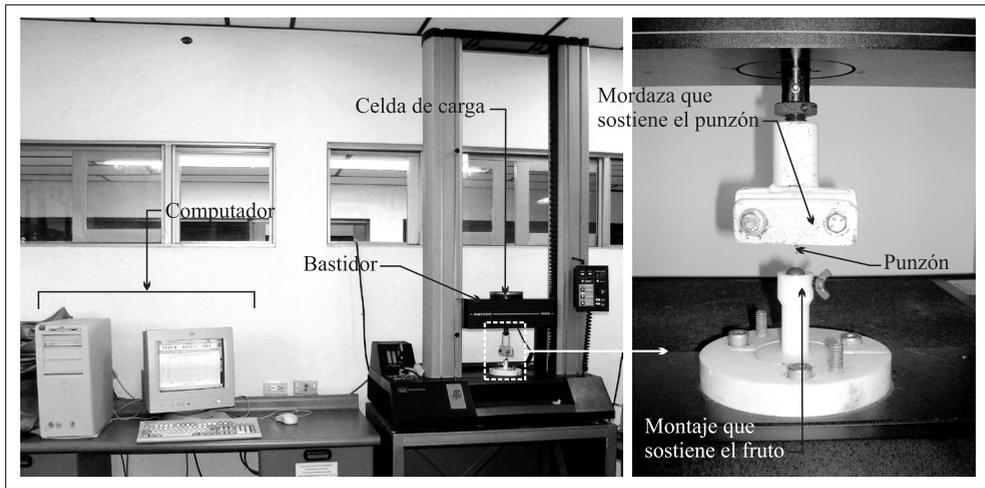


Figura 4. Montaje experimental en la Máquina de ensayos universal INSTRON Serie 5569.

comparar los promedios obtenidos para las dos variables de respuesta F_R y F_E con los tres punzones, en los dos estados de desarrollo del fruto, se aplicaron las pruebas t al 5% y Duncan al 95% de confiabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos preliminares

Las Tablas 1 y 2 presentan los resultados preliminares y la variación de la fuerza de espelación y retención, respectivamente.

De los resultados en la Tabla 1 se puede determinar que, aunque de magnitud muy baja para ambos tipos de fruto, la fuerza de espelación es tres veces mayor para los frutos inmaduros que para los maduros. Esto quiere decir que si se imprimiera una fuerza constante en los punzones, alrededor de 1,5 N, los frutos maduros serían espelados y los inmaduros no, lo cual es un objetivo buscado en esta investigación. Sin embargo, de acuerdo con los datos registrados en la Tabla 2 y al tomar como base que un fruto de café maduro necesita una fuerza de 9,5

N para ser desprendido a tensión (Figura 5), se concluye que la fuerza de retención de los frutos maduros es tan baja, que para desprender un fruto maduro a tensión se necesitarían más de 20 alfileres o más de ocho tachuelas de 12,7 mm, lo que hace inviable la utilización de estos punzones por limitaciones de espacio en la superficie del fruto.

Con estos antecedentes se procedió a estudiar formas de punzones que imprimieran una fuerza de retención más grande, fue así como se llegó a los punzones con punta en forma de cabeza cónica, los cuales se basan en el principio por el cual la fuerza de retención aumenta después que el punzón introduce toda su cabeza dentro del sistema cáscara-mucílago, por la recuperación que se experimenta durante la reducción brusca del diámetro (Figura 6). Una vez la cáscara cubre la base plana de la cabeza cónica, se puede cambiar el sentido de desplazamiento para someter el fruto a tensión pura. La fuerza de retención (F_R) depende entonces de las propiedades mecánicas y reológicas

Tabla 1. Promedio de la fuerza de espatación (F_E), desviación estándar de la muestra (S) y coeficiente de variación (C.V.) para punzones tipo alfiler y tachuela sobre frutos de café, en dos estados de maduración.

Punzón	Estado	$\overline{F_E}$ (N)	S (N)	C.V. (%)
Alfiler	Maduros	0,63	0,12	18,7
	Inmaduro	2,11	0,40	19,1
Tachuela	Maduros	0,64	0,15	23,8
	Inmaduro	2,67	0,57	21,4

Tabla 2. Promedio de la fuerza de retención (F_R), desviación estándar de la muestra (S) y coeficiente de variación (C.V.) para punzones tipo alfiler y tachuela sobre frutos de café, en dos estados de maduración.

Punzón	Estado	$\overline{F_R}$ (N)	S (N)	C.V. (%)
Alfiler	Maduro	0,46	0,13	29,38
	Inmaduro	2,50	0,86	34,44
Tachuela	Maduro	1,13	0,86	76,45
	Inmaduro	3,17	1,28	40,57

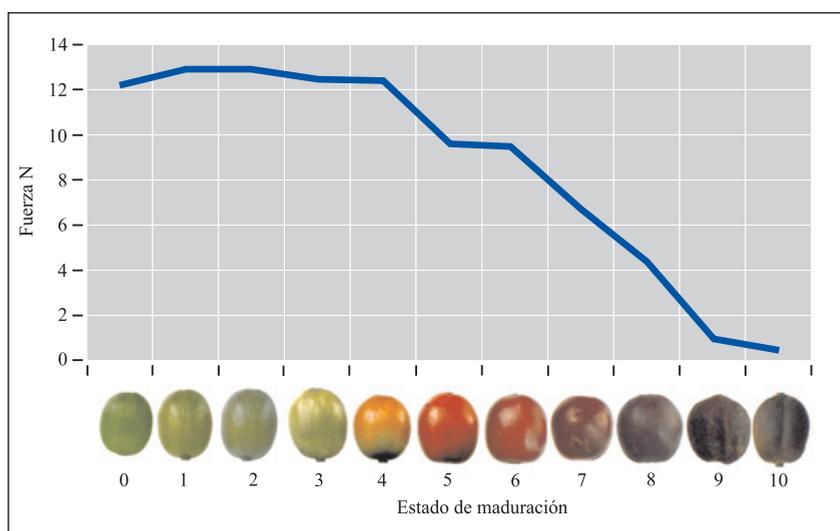


Figura 5. Fuerza de desprendimiento de frutos de café variedad Colombia a tensión (6).

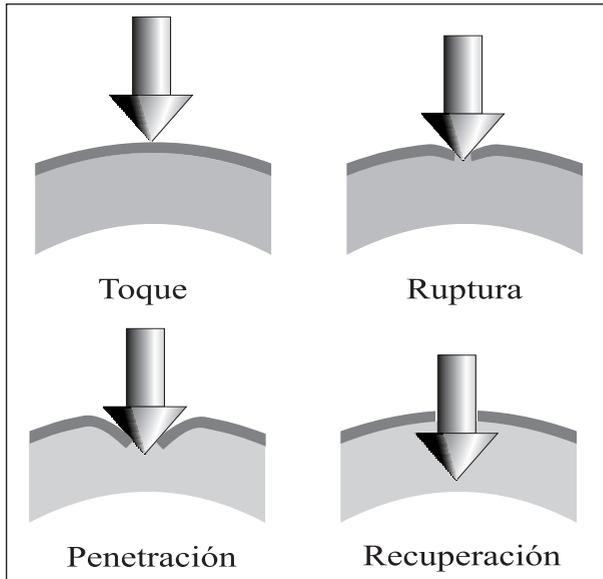


Figura 6.
Penetración del interfase
cáscara-mucilago de frutos
de café con un punzón de
cabeza cónica.

de la interfase mucilago-pulpa y del área de contacto del punzón.

Evaluación de los punzones de cabeza cónica

En la Figura 7 se observa el comportamiento típico de la fuerza de espesación de frutos de café en función de la deformación, donde se registraron cuatro zonas marcadas. La primera zona (A) es de pendiente constante, debida a la adaptación del tejido de la pulpa a la compresión, la cual se deforma a medida que varía la sección cónica del punzón que la penetra. Le sigue un *Plateau* (B), donde se registra la fuerza máxima de espesación, donde la carga normal aplicada por el punzón excede el límite de resistencia de los tejidos cargados (ruptura o fluencia), y entra a la zona de confluencia entre la pulpa y el mucilago. La fuerza máxima de espesación corresponde con el momento cuando la cabeza termina de entrar a la interfase pulpa-mucilago. Después, se tiene una caída repentina de la fuerza (C), dada por la poca resistencia que ofrece el mucilago al movimiento del punzón, y

después continúa una curva ascendente (D) brusca, que se observa cuando el punzón entra en contacto con las semillas del frutos de café. Los valores de mayor importancia fueron los valores máximos de la región B, que se registraron y analizaron aparte.

En el comportamiento típico de la fuerza de retención se pueden observar también cuatro zonas marcadas (Figura 8). La primera zona A de gran pendiente, corresponde a la resistencia ofrecida por las fibras de la pulpa en contacto con la parte plana de la cabeza cónica del punzón. Después, se observa un decrecimiento de la pendiente que corresponde al inicio de la segunda falla de la pulpa B, posiblemente por el rompimiento de fibras a medida que es retirado el punzón; en la zona C la cabeza sale totalmente y en la zona D, se observa un decrecimiento de la pendiente, que indica el desplazamiento del punzón sin fuerzas que lo impidan. Al igual que en el caso anterior, la fuerza de retención máxima se registró y analizó aparte.

En las Tablas 3 y 4 se muestran los promedios de las fuerzas de espesación y retención, los valores máximos y mínimos y la variación (desviación estándar y coeficiente de variación). Los coeficientes de variación para las fuerzas de espesación pueden considerarse bajos para una variable de este tipo, donde por tratar con sistemas biológicos se esperan coeficientes de variación mayores del 35%. La fuerza de retención de frutos maduros presentó mayor variación, explicada por procesos fisiológicos que ocurren durante el desarrollo del fruto, que hacen los tejidos de la pulpa más blandos y menos resistentes a la tensión a medida que se desarrolla. Sin embargo, los coeficientes de variación observados para los frutos maduros pueden considerarse aceptables.

La comparación de medias a través de una prueba t al 5%, mostró que existen diferencias significativas entre los estados de maduración evaluados con los tres punzones con punta en forma de cabeza cónica, lo que hace este principio promisorio para la cosecha de frutos de café.

Los intervalos de confianza para la $\overline{F_E}$ con los tres punzones diseñados, en frutos maduros e inmaduros se observan en la Figura 9. A medida que se incrementa el tamaño del punzón tanto para frutos maduros como para frutos inmaduros aumenta la fuerza de espesación, la cual es mayor en todos los casos para los frutos inmaduros que para los frutos maduros.

Figura 7.
Comportamiento típico de la fuerza de espesación (F_E) en frutos de café.

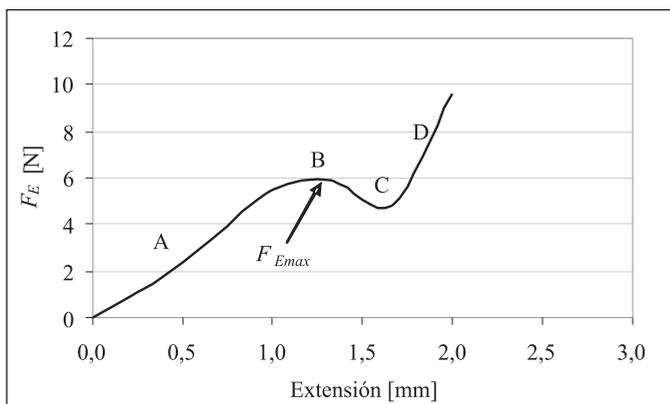


Figura 8.
Comportamiento típico de la fuerza de retención (F_R) en frutos de café.

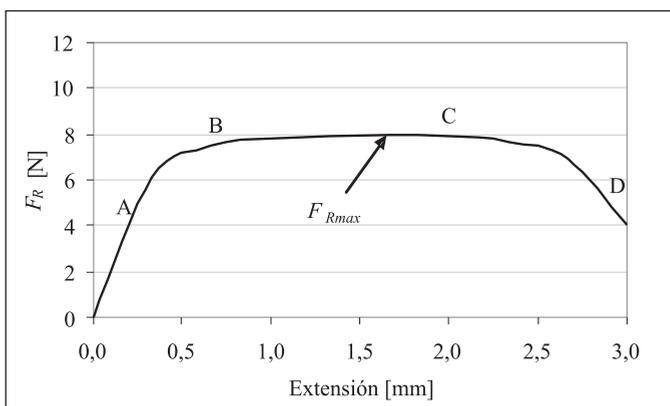


Tabla 3. Medidas de tendencia central y dispersión de la FE para los punzones evaluados sobre frutos de café en dos estados de desarrollo

Punzón	Estado	$\overline{F_E}$ (N)	Máx. (N)	Mín. (N)	S (N)	C.V. (%)
10 P	Maduro	1,9	3,1	0,6	0,5	26,5
	Inmaduro	6,1	7,3	4,5	0,6	10,4
15 P	Maduro	3,2	5,6	1,7	0,9	28,4
	Inmaduro	11,1	14,2	6,8	1,7	15,1
20 P	Maduro	4,1	7,6	2,8	0,8	20,2
	Inmaduro	18,5	22,2	13,1	2,3	12,4

Tabla 4. Medidas de tendencia central y dispersión de la FR para los punzones evaluados sobre frutos de café en dos estados de desarrollo

Punzón	Estado	$\overline{F_R}$ (N)	Máx. (N)	Mín. (N)	S (N)	C.V. (%)
10 P	Maduro	3,3	8,5	0,5	2,1	65,6
	Inmaduro	5,7	11,9	2,6	2,1	36,6
15 P	Maduro	3,9	9,5	0,6	2,1	54,2
	Inmaduro	10,5	16,0	6,0	3,0	28,5
20 P	Maduro	5,4	11,8	1,0	2,4	43,5
	Inmaduro	15,5	27,7	5,3	5,5	35,5

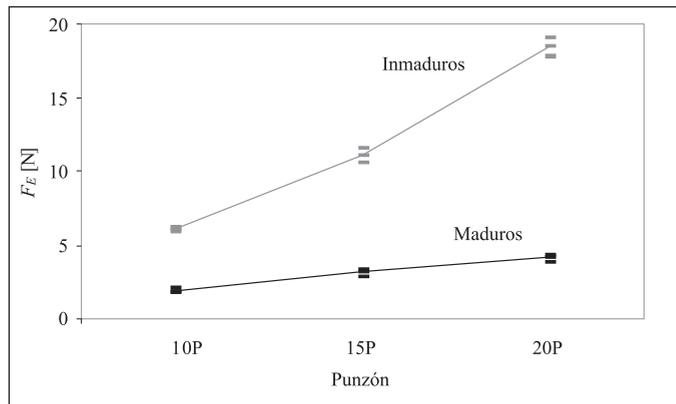


Figura 9. Fuerza de espetación de frutos de café con un intervalos de confianza al 5%

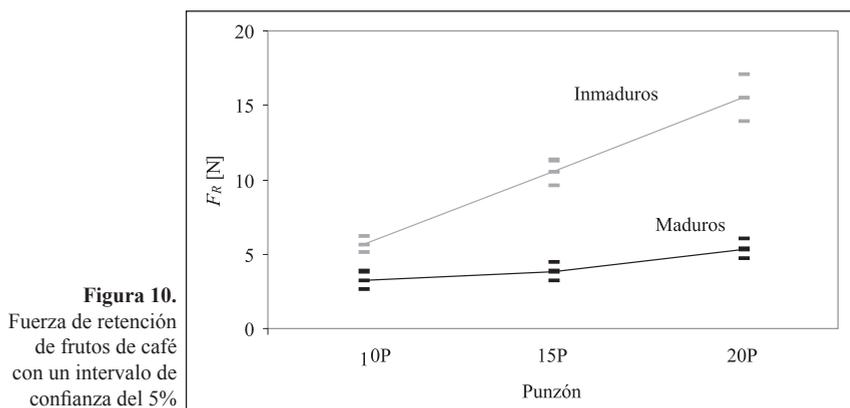
La Figura 10 muestra en los intervalos de confianza un comportamiento de la fuerza de retención similar a la fuerza de espesación. A medida que se incrementa el diámetro del punzón la fuerza de retención que se genera es mayor, igualmente para todos los punzones la fuerza de retención para los frutos inmaduros fue mayor que para los frutos maduros. Los resultados para los dos estados muestran una tasa de incremento mayor para la fuerza de retención en frutos inmaduros respecto a los maduros.

Bajo el criterio de que tanto las fuerzas de espesación como de retención, para todos los punzones, son mayores para frutos inmaduros, es posible diferenciar entre frutos inmaduros y maduros.

De los resultados mostrados en las Figuras 9 y 10 se puede obtener que el principio de espesación y retención con punzones de cabeza cónica es viable técnicamente. Primero, la diferencia entre las fuerzas de espesación entre los dos diferentes estados de desarrollo

del fruto (Figura 9) puede servir para aplicar una fuerza constante a los punzones (por ejemplo, 8,0 N para el punzón 20 P), de tal manera que solamente se espeten los frutos maduros. Adicionalmente, la alta fuerza de retención causada por los punzones de cabeza cónica cuando son removidos de los frutos espesados ayuda a someter y causar el desprendimiento de los frutos maduros a tensión. Un resultado de esta investigación es que se necesitarían dos punzones de cabeza cónica 20 P, tres punzones de cabeza 10 P o tres de cabeza 15 P para desprender un fruto maduro, basados en que la fuerza requerida para desprender un fruto en este estado, a tensión, es de 9,12 N (2).

Los resultados obtenidos indican que las fuerzas para espetar frutos maduros e inmaduros son diferentes. Con el punzón 20 P se logra mayor diferencia entre frutos maduros e inmaduros tanto en fuerza de espesación como en retención, importante dato para el desarrollo de una herramienta para la cosecha selectiva del café.



AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al profesor Néstor Enrique Cerquera Peña, del Programa de Ingeniería Agrícola de la Universidad Surcolombiana (Neiva) y al personal del Taller de la Disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé por su valiosa colaboración.

LITERATURA CITADA

1. ACOSTA A., R. Evaluación de dos dispositivos en la recolección de frutos caídos al suelo. Chinchiná, Cenicafé, 2003. 61 p. (ING-0148).
2. ÁLVAREZ T., E.; ÁLVAREZ M., F.; OLIVEROS T., C. E.; MONTOYA R., E. C. Propiedades físico-mecánicas del fruto de café y del sistema fruto-pedúnculo del café variedad Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 52(2): 701-732.1999.
3. DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA. Espasa Calpe 2001. On line Internet. Disponible en: http://diccionarios.elmundo.es/diccionarios/cgi/lee_diccionario.html (Consultado en agosto de 2005).
4. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA – FNC. BOGOTÁ. COLOMBIA. Costos de producción de café: Zona central cafetera. Santa Fé de Bogotá, FNC - Gerencia Técnica. División de Producción y Desarrollo Social, 2000. 13 p.
5. LONDOÑO H., D.; OLIVEROS T., C.E.; MORENO S., M.A. Desarrollo de una herramienta manual para asistir la recolección de café en Colombia. Cenicafé 53(2): 93-105. 2002.
6. MARÍN L., S.M.; ARCILA P., J.; MONTOYA R., E.C; OLIVEROS T., C.E. Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). Cenicafé 54(3): 208-225. 2003.
7. OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A; ACOSTA A., R.; ÁLVAREZ M., F. Equipo portátil para asistir la cosecha manual de café. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 58(2):3003-3013. 2005.
8. RESTREPO H., I.; SANZ U., J.R.; ÁLVAREZ, M. F. Desarrollo de un separador de objetos duros en el café cosechado. Cenicafé 50 (3): 183-194.1999.