

TECNOLOGÍA DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL PARA EL LAVADO DEL CAFÉ EN PROCESO CON FERMENTACIÓN NATURAL

Carlos Eugenio Oliveros Tascón*; Carlos Alberto Tibaduiza Vianchá*; Esther Cecilia Montoya Restrepo**;
Juan Rodrigo Sanz Uribe*; César Augusto Ramírez Gómez*

OLIVEROS T., C. E.; TIBADUIZA V., C. A.; MONTOYA R., E. C.; SANZ U., J. R.; RAMÍREZ G., C. A. Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café en proceso con fermentación natural. Cenicafé 65 (1):44-56. 2014

Se evaluó un lavador para café en proceso con fermentación natural, utilizado en la tecnología ECOMILL®. Los tratamientos consistieron en tres flujos de café lavado (2.500, 3.000 y 3.500 kg.h⁻¹) y tres volúmenes específicos de agua (0,3, 0,4 y 0,5 L.kg⁻¹ de cps) evaluados bajo un diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial 3x3. La unidad experimental consistió en 100 kg de café Variedad Castillo® con 16 h de proceso de fermentación natural y para cada tratamiento se tuvieron cinco unidades experimentales. Se observó que la remoción de mucilago es afectada por el volumen específico de agua y la interacción flujo de café lavado x volumen específico de agua. La potencia para operar el equipo es afectada por el flujo de café lavado y el volumen específico de agua empleados. El daño mecánico causado a los granos no es afectado ni por los factores por separado ni por su interacción. El mejor aprovechamiento del equipo y del agua utilizada se obtiene con flujo de café lavado de 3.500 kg.h⁻¹ y volumen específico de agua de 0,4 L.kg⁻¹ de cps. Las aguas residuales del lavado del café pueden mezclarse con la pulpa o pueden secarse en equipos solares de bajo costo, permitiendo el control del 100% de la contaminación generada en el proceso.

Palabras clave: Maquinaria agrícola, beneficio ecológico, remoción de mucilago.

LOW ENVIRONMENTAL IMPACT TECHNOLOGY FOR THE COFFEE WASHING PROCESS USING NATURAL FERMENTATION

A equipment for washing coffee under natural fermentation process used in ECOMILL® technology was evaluated. Treatments consisted of three washed coffee flow rates (2,500, 3,000 and 3,500 kg.h⁻¹) and three specific volumes of water (0.3, 0.4 and 0.5 cps L.kg⁻¹) evaluated under a completely randomized design in factorial arrangement 3x3. The experimental unit (e.u.) consisted of 100kg of pulped coffee of the variety Castillo® after 16 h under natural fermentation process and for each treatment five e.u. were taken. It was observed that mucilage removal is affected by the specific volume of water and the interaction coffee flow rate x specific volume of water. The power to operate the equipment is affected by the washed coffee flow and the specific volume of water used. Mechanical damage caused to the beans is not affected by either an individually factor or by their interaction. The better utilization of equipment and water used is obtained with washed coffee flow of 3,500 kg.h⁻¹ and specific volume of water of 0.4 cps L.kg⁻¹. Wastewater from coffee washing can be mixed with the pulp or dried on a low-cost solar equipment allowing total control of the pollution generated by the wet process.

Keywords: Equipment, agricultural machinery, ecological process, detachment of mucilage.

* Investigador Principal, Investigador Asociado, Investigador Científico III e Investigador Científico I, respectivamente. Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

** Investigador Científico III. Biometría. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El fruto del cafeto está constituido por dos estructuras que son retiradas en el proceso de beneficio húmedo. El epicarpio o pulpa, de color rojo o amarillo cuando está maduro, según la variedad, y el mesocarpio o mucílago. La primera, en café variedad Colombia, en el intermedio de la cosecha, representa el 43,58% de la masa del fruto fresco (10). El mesocarpio, en cambio, representa entre el 14% y 20% de la masa, con un espesor de 0,5 a 2,0 mm (16). De acuerdo con Braham *et al.* (1978), citados por González (7), en la especie *C. arabica* el mucílago está constituido principalmente por agua (84,2%, base húmeda), sustancias pécticas totales (5,2% b.h.), carbohidratos totales (7,9% b.h.), azúcares reductores (4,7% b.h.) y azúcares no reductores (3,2%). El mucílago del café despulpado se compone de dos o tres capas de células con paredes delgadas, pegadas en su base al endocarpio o pergamino (1). El pH del mucílago varía con el grado de madurez alcanzado por el fruto, con valores de 5,6 a 5,7 (21).

El mucílago se retira de los granos una vez se haya degradado por medio de la fermentación natural o con aplicación de enzimas pectinolíticas (12, 13, 14, 15, 17, 22), y por medios mecánicos (8, 9, 15). Cuando se utiliza la fermentación natural se deja el café despulpado en tanques durante 12 hasta 18 h para permitir la degradación del mucílago por efecto de la actividad de microorganismos y enzimas propias del grano (12, 16). Cuando se utilizan enzimas pectinolíticas el café puede lavarse luego de 1 a 3 h de la aplicación del producto (13). Por medios mecánicos el mucílago se desprende agitando la masa de café despulpado, con un rotor que genera esfuerzos cortantes, que actúan en la superficie de los granos y colisiones entre éstos (11, 16).

En Colombia y en otros países productores de café suaves lavados se utilizan las siguientes tecnologías para lavar café en proceso con fermentación natural:

Agitación manual en el tanque. El menor volumen específico de agua (4,17 L.kg⁻¹ de cps) se logra utilizando un tanque con bordes redondeados y una paleta, denominado tanque tina (24). Se emplean cuatro enjuagues, cubriendo totalmente la masa con agua limpia en cada uno y retirando los granos que flotan, de inferior calidad. Si se disponen adecuadamente estas mieles y se despulpa el café sin utilizar agua se logra controlar el 85% de la contaminación potencial. En Cenicafé se ha observado rendimiento de 270 kg.h⁻¹ de café lavado y aguas residuales de lavado con carga de contaminación de 25.946 ppm.

Sanz *et al.* (18) desarrollaron una paleta para agitar la masa de café durante el lavado del café en el tanque, con la cual se logra reducir la energía utilizada en 41,6% y 29,0% en el primer y segundo enjuagues, respectivamente, con relación a la paleta diseñada por Zambrano (24).

Canal de correteo. Dispositivo hidráulico, generalmente de sección transversal rectangular, empleado para lavar, limpiar y clasificar el café (16). El café se deposita inicialmente en un tramo del canal, se cubre con una lámina de agua de 2 a 3 cm y se agita con una paleta; al agitar la masa de café y al agua se generan fuertes corrientes que arrastran los granos de mayor densidad en el fondo del canal y los de menor densidad y gran parte de la pulpa en la superficie. El agua utilizada generalmente no se recircula y el volumen específico es alto (>20 L.kg⁻¹ de cps). En el canal de correteo se logran lavar y clasificar 1.500 kg.h⁻¹ de café, en promedio, utilizando de 20 a 25 m³ de agua

(28 a 35 L.kg⁻¹ cps) con aguas residuales con carga de 3.940 ppm de DQO.

Con motobomba sumergible. Se lava el café pasándolo de un tanque a otro, generalmente cuatro veces, utilizando una motobomba sumergible, con relación café/agua de 2/3 en masa. El agua se recircula solamente en el tercer enjuague. Se estima un volumen específico de 9 L.kg⁻¹ de cps y carga contaminante de 12.692 ppm de DQO por kilogramo de café seco. Como ventajas de esta tecnología de lavado se tiene alta capacidad, que se requiere en beneficiaderos grandes y en centrales de beneficio, remoción de mucílago no desprendido durante el proceso de fermentación y posibilidad de transportar el café a los secadores utilizando la bomba sumergible. Como desventajas, el costo de la bomba, el relativo alto consumo específico de agua y el costo de la planta para el tratamiento de las aguas utilizadas (16).

Canal semisumergido. Se utiliza una bomba sumergible para transportar el café hasta un canal con aberturas en el fondo. El principio de funcionamiento es similar al del canal de correteo. Los granos de mayor densidad, generalmente de mejor calidad, que se sedimentan en los primeros tramos del canal, son arrastrados por el flujo de agua y separados a través de las aberturas en el fondo del canal. Los granos de menor densidad y gran parte de la pulpa son arrastrados por las corrientes de agua en la superficie del canal. Con las motobombas sumergibles utilizadas se logran procesar hasta 7.000 kg.h⁻¹ de cps con volumen específico de agua de 6,4 L.kg⁻¹ de cps, sin recircular, y aguas residuales, con carga de 17.505 ppm de DQO (16).

Eyector Venturi. Dispositivo hidráulico en el cual el lavado se realiza por la agitación producida al alimentar café con mucílago

degradado a una tubería por medio de un eyector Venturi y durante su transporte posterior. Los eyectores hidráulicos operan con presiones entre 2,5 y 4,0 atmósferas, que se obtienen mediante bombas o por cabeza hidráulica por diferencia de nivel. Se recomienda operarlos con una relación de mezcla café con mucílago degradado/agua de 2/5 en volumen. El requerimiento de potencia en las bombas es alto, por lo cual se utilizan poco.

Lavadores mecánicos de eje horizontal. Consisten fundamentalmente en un cilindro dentro del cual gira un eje central provisto de paletas que aseguran la agitación y el avance de la masa de café y de la mezcla agua-mucílago hasta la descarga, al tiempo que se efectúa el lavado. Normalmente el eje central gira a unas 40 rpm y la potencia necesaria para moverlo es del orden de 1,5 kW, cuando el cilindro es de 1,80 m de largo y 0,40 m de diámetro. Su capacidad se estima en 1.500 kg.h⁻¹ de café con mucílago degradado y un volumen específico de 0,76 L.kg⁻¹ de café pergamino seco.

Lavadores mecánicos de eje vertical. Constan de un tanque circular con un eje con paletas dispuesto verticalmente en su centro. El café con mucílago fermentado se agita en este dispositivo hasta dejarlo limpio, permitiendo que el agua utilizada salga continuamente del equipo por rebose y por medio de compuertas localizadas en el fondo. La acción mecánica de la separación del mucílago es energética cuando se trabaja con poca agua y disminuye cuando aumenta la relación de agua/café. El lavador puede operarse inicialmente con poca agua y ésta aumenta al final del proceso. El eje central gira aproximadamente a 18 rpm y la potencia del motor es de 0,75 ó 1,5 kW, según se opere con o sin agua abundante, en un tanque de capacidad de 0,8 m³.

Para remover el mucílago por medios mecánicos se han desarrollado diferentes tecnologías, entre las cuales se tiene:

El equipo Raoeng, es el primer equipo desarrollado para remover mecánicamente el mucílago del café, con flujo horizontal de granos, fabricado en Alemania (4, 23). El desmucilaginado se ocasiona por fricción entre los granos, y entre éstos y partes internas de la máquina (11). Inicialmente con el equipo Raoeng se despulpaba y desmucilagínaba café robusta, con elevados consumos de agua y energía.

El equipo Aquapulpa, diseñado a partir del Raoeng, de flujo horizontal de granos, solamente para remover mucílago, fabricado en Inglaterra por Bentall (4). El principio empleado para remover el mucílago es similar al utilizado por el Raoeng.

El equipo Hess, fabricado en Puerto Rico (21), consta de un canal metálico que vibra longitudinalmente y genera fricción entre los granos. En el recorrido de los granos se suministra agua para retirar el mucílago desprendido. Requiere relativa baja potencia y agua por unidad de producto procesado.

El equipo Fukunaga, fabricado por Fukunaga en Hawaii (6), de dos cámaras con agitador tipo paletas, en cada una, con flujo vertical ascendente de granos. Con excepción del equipo Hess, presenta menor consumo específico de agua y menor potencia específica que los modelos anteriores.

Equipo ELMU, desarrollado en El Salvador por Llach (3), consta de una carcasa cilíndrica dispuesta verticalmente, dividida en cuatro cámaras, conectadas por aberturas en el fondo de cada una. En el centro de la carcasa se dispone de un rotor con agitador de varillas con relación diámetro rotor/diámetro carcasa

cercana a 1,0. La superficie interna de la carcasa tiene varillas soldadas para aumentar la fricción y colisiones entre granos y evitar zonas de menor remoción de mucílago. Por efecto del impacto y la fricción entre granos, agitadores y la superficie interna de la carcasa, el café se desmucilagina a medida que fluye de la primera cámara a la cuarta. Se requiere lavado posterior del café. La potencia específica y el agua utilizada son relativamente altos.

Equipo DESLIM (DESmucilagínador, Lavador y LIMpiador), desarrollado en Cenicafé (16). Es de flujo vertical ascendente de granos, se suministra un bajo caudal de agua para disminuir la viscosidad de la suspensión (granos y mucílago de café, agua adicionada y restos de pulpa, principalmente), permitiendo mayor movilidad de los granos, para lograr mayores colisiones entre éstos, mayor tasa de remoción de mucílago y disminuir la potencia requerida para accionar el rotor, que gira a 870 rpm. También se adiciona agua para el lavado de los granos próximos a ser evacuados del equipo. Con la tecnología DESLIM se logra desmucilaginar, lavar y limpiar café con menos de 1 L.kg⁻¹ de cps. Se diseñaron cinco modelos con capacidades para 100, 300, 600, 1.000 y 2.500 kg.h⁻¹ de cereza, con los cuales pueden atenderse necesidades de procesamiento desde 600 kg hasta 15.000 kg.día⁻¹ de café en cereza.

De las tecnologías citadas el menor consumo específico de agua se presenta en el desmucilagínador Hess y la menor potencia específica instalada con el equipo Fukunaga. Con excepción del equipo DESLIM los autores no reportan valores sobre el porcentaje de remoción mucílago, de gran importancia para Colombia por los efectos adversos en la calidad que puede ocasionar el mucílago sin retirar. Para el caso del DESLIM, el promedio de la remoción de

mucílago es superior al 98%, mientras que cuando se utiliza agitador de varillas tipo Fukunaga y la carcasa perforada del DESLIM la remoción de mucílago varía de 79,2% a 82,4%, por lo cual se requiere una práctica correctiva adicional consistente en dejar el café procesado en tanque de fermentación durante al menos 8 h, para lograr remoción superior al 98% (9).

Oliveros *et al.* (11) evaluaron un equipo de flujo vertical de granos en el lavado del café en proceso con fermentación natural, observando remoción de mucílago del 95,1% con consumo específico de agua de 0,32 L.kg⁻¹ de cps, daño mecánico de 0,51% y potencia específica de 1,01 W.h.kg⁻¹ de café lavado.

En esta investigación se evaluó un equipo diseñado para lavar café en proceso con fermentación natural. Se evaluó el efecto del flujo de café y del volumen específico de agua en la remoción de mucílago, la potencia empleada y el daño mecánico causado a los granos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Esta investigación se desarrolló en el Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, localizado en Manizales (Caldas), altitud de 1.310 m, promedios de temperatura y humedad relativa de 21,5°C y 79,5%, respectivamente, y precipitación anual de 2.662 mm.

Descripción del equipo. El equipo utilizado para lavar café se presenta en la Figura 1, denominado ECOMILL® 3000. Consta de un tanque cilíndrico fabricado en acero inoxidable con capacidad para 1.000 kg de café despulpado, con fondo cónico, con ángulo de 60° con respecto a la horizontal, para permitir la descarga del café por gravedad. El café se suministra al lavador por medio de un

dosificador con tornillo sinfin de 15,24 cm de diámetro, accionado por una transmisión de potencia que permite variar su velocidad de giro de 20 a 40 rpm, para obtener los flujos de café propuestos en la investigación. El lavador de café, de flujo vertical ascendente de granos y descarga radial de fluidos, se diseñó a partir del desmucilagador DESLIM 2500 desarrollado en Cenicafé (16). El agua utilizada para lavar el café se suministra a través de tres perforaciones localizadas en la carcasa. El lavador se opera con un motor de 2,94 kW (4 HP).

Metodología. En esta investigación, de tipo explicativa, se evaluó el porcentaje de remoción de mucílago, daño mecánico ocasionado a los granos por el lavador y potencia para operarlo (variables de respuesta), considerando tres flujos de masa de café



Figura 1. Equipo ECOMILL® 3000, utilizado en la evaluación del lavador de café con mucílago degradado por medio de la fermentación natural.

lavado y tres volúmenes específicos de agua (tratamientos), descritos en la Tabla 1, bajo un diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial 3x3.

La unidad experimental consistió en 100 kg de café Variedad Castillo® con 18 h de proceso de fermentación natural y para cada tratamiento se tuvieron cinco unidades experimentales. Antes de cada ensayo se midió el caudal de agua requerido ajustando las válvulas instaladas en el equipo y registrando el volumen descargado en 30 s. El volumen total de agua utilizada en cada ensayo se midió empleando un contador con escala 0 a 1 m³ y resolución de 1 L.

La potencia requerida para operar el lavador se obtuvo midiendo el par o “torque” en operación continua (*T*), utilizando un equipo marca Torqsense, referencia RWT 310, con rango de torque o par de 0 a 501 N.m, con frecuencia de lectura de 1.000 s⁻¹, y la velocidad de giro del eje del motor (revoluciones por minuto), utilizando un tacómetro marca METEK, modelo 1716, con rango 0 a 10.000 rpm y resolución de 0,1 rpm. La potencia empleada por

el motor (*W*) se obtuvo a partir de la Ecuación <1>:

$$P = \frac{\Pi}{30} TN \quad \text{Ecuación <1>}$$

Donde:

P = Potencia, W

T = T, torque, N.m

N = Velocidad de giro del eje del motor, revoluciones por minuto

En cada unidad experimental se obtuvo la siguiente información: tiempo empleado (minutos); porcentaje de mucílago inicial y final del café, en muestra compuesta de 1 kg tomada antes (después de 16 h de proceso de fermentación) y después de procesarlas en el lavador mecánico, utilizando la enzima pectinolítica Rohapect TPL, pectin-liasa producida a partir de *Aspergillus niger* (13), con concentración de 100 mg de enzima por kilogramo de café despulpado y tiempo de contacto de 3 h (14); torque o par, durante 1 s, cinco veces en cada prueba, requerido para mover el rotor del lavador a la velocidad de giro (870 rpm).

El daño mecánico causado solamente por el lavador se evaluó en muestras extraídas antes y después del proceso, en granos que presentaban daño observable.

Con la información de las variables de respuesta se estimó el promedio y la desviación estándar, por tratamiento, y se aplicó el análisis de varianza, bajo el modelo para el diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial 3x3, al 5%. Además, se evaluó la tendencia lineal y cuadrática con la variable de respuesta potencia, de acuerdo con el flujo de café lavado y caudal de agua, y prueba de contraste para identificar la mejor combinación de tratamientos, con la variable de respuesta porcentaje de remoción.

Table 1. Tratamientos considerados en la evaluación del lavador mecánico, con café procesado con fermentación natural.

Tratamiento	Flujo de café (kg.h ⁻¹ de café lavado)	Consumo específico de agua (L.h ⁻¹)
1	2.400 – 2.600	0,29 – 0,31
2	2.400 – 2.600	0,39 – 0,41
3	2.400 – 2.600	0,49 – 0,51
4	2.900 – 3.100	0,29 – 0,31
5	2.900 – 3.100	0,39 – 0,41
6	2.900 – 3.100	0,49 – 0,51
7	3.400 – 3.600	0,29 – 0,31
8	3.400 – 3.600	0,39 – 0,41
9	3.400 – 3.600	0,49 – 0,51

Para determinar el contenido de minerales del mucílago seco obtenido en un secador solar, se tomó una muestra compuesta de 1 kg, la cual fue enviada al laboratorio de suelos en Cenicafé (Multilab), para su respectivo análisis de minerales (Tabla 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El café con mucílago degradado utilizado en los ensayos presentó en promedio 16,3% de mucílago, con intervalo entre 15,74% y 16,77%, con un coeficiente de confianza del 95%. Este valor, inferior a los promedios para frutos maduros de café Variedad Castillo® de 30,9% presentados por Peñuela *et al.* (12), y de 27,3% de acuerdo con Montilla *et al.* (10), se debe a que durante el proceso de degradación parte del mucílago fluye fuera del tanque, el cual puede representar en promedio 33,4% del mucílago inicial (20). Aunque el café se dejó en el tanque de fermentación durante 18 h, el promedio de degradación de mucílago observado fue 67,0%, con intervalo de 64,6% y 69,5%, con un coeficiente de confianza del 95%.

El análisis de varianza no mostró efecto ni de la interacción ni de los factores por separado en la variable de respuesta porcentaje

de café con daño mecánico, variando los promedios entre 0,15% y 0,65% (Tabla 3). Este resultado es aceptable teniendo en cuenta que es descriptivamente inferior a los reportados por Mejía *et al.* (9), en desmucilaginado mecánico con tecnología DESLIM desarrollada en Cenicafé (16), con valores de 0,8% a 1,1%, y similar al obtenido para el equipo con rotor de varillas, con valores de 0,3% a 0,4%. Como indican Oliveros *et al.* (11), el bajo daño mecánico causado a los granos con esta tecnología se atribuye al menor tiempo de residencia de los granos (11,3 s), con relación a los 33,6 s requeridos en el equipo DESLIM 2500 utilizado para el desmucilaginado mecánico del café (16), y al menor número de agitadores empleados en el rotor (11 en lugar de 25).

El mucílago degradado es retirado de los granos por efecto de los esfuerzos cortantes, generados por el rotor, las colisiones entre los granos y las partes móviles y fijas de la máquina, y por el agua que se adiciona. El mucílago que todavía permanece adherido al pergamino del café se desprende por efecto de los esfuerzos cortantes y colisiones entre granos que se generan a medida que avanzan en el interior del equipo y, posteriormente, es expulsado radialmente a través de las

Table 2. Metodologías utilizadas en el análisis del material obtenido de las aguas residuales del lavado del café.

Item	Método empleado
pH	Pasta saturada
Humedad	Estufa a 70°C durante 24 h
Nitrógeno total	Semimicrokjeldahl
K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Cu	Espectrofotometría de Absorción Atómica
P	Colorimétrico con molibdo vanadato de amonio
Conductividad eléctrica	Conductivimétrico
COox	Walkley Black
Cenizas	Mufla a 475°C durante 4 h

Table 3. Promedios y desviación estándar (D.E.) para la variable porcentaje de café con daño mecánico (%), volumen específico de agua (L.kg⁻¹ de cps) y flujo de café lavado (kg.h⁻¹) evaluados.

Volumen específico de agua (L.kg ⁻¹ de cps)	Flujo de café lavado (kg.h ⁻¹)						Promedio	D.E.
	2.500		3.000		3.500			
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.		
0,3	0,23	0,04	0,54	0,27	0,65	0,33	0,47	0,17
0,4	0,36	0,13	0,20	0,19	0,15	0,02	0,24	0,11
0,5	0,25	0,12	0,45	0,34	0,40	0,21	0,37	0,10
Promedio	0,28		0,40		0,40			
D.E.	0,07		0,18		0,25			

perforaciones de la carcasa. En general, la mayor cantidad de mucilago es expulsada en los dos tercios inferiores del lavador (Figura 2). En tratamientos con porcentaje de remoción de mucilago superior al 95% los granos de café presentan pergamino con el color que se observa en la Figura 3.

Para la variable porcentaje de remoción de mucilago, el análisis de varianza mostró efecto de la interacción, de tal manera que los mayores valores de remoción de mucilago

se obtuvieron con un volumen específico de agua de 0,5 L.kg⁻¹ de cps, para flujos de café lavado de 2.500 y 3.000 kg.h⁻¹, y con un volumen específico de agua de 0,4 L.kg⁻¹ de cps para un flujo de café lavado de 3.500 kg.h⁻¹ (Tabla 4), de acuerdo con la prueba de contraste al 5%. Teniendo en cuenta lo anterior y buscando obtener café de mejor lavado y menor consumo específico de agua, para el mejor aprovechamiento del equipo, se recomienda operarlo con un flujo de 3.500 kg.h⁻¹ y un volumen específico de 0,4 L.kg⁻¹ de cps.



Figura 2. Estado de la carcasa del equipo durante el lavado del café.



Figura 3. Café pergamino obtenido en el lavador mecánico evaluado, **a.** con porcentaje de remoción de mucílago superior al 95% y **b.** en tanque con aplicación de cuatro enjuagues.

Para la variable de respuesta potencia, el análisis de varianza no mostró efecto de la interacción, pero sí de los factores por separado, de tal manera que la prueba de contraste indicó una tendencia lineal negativa con respecto al volumen específico de agua, y una tendencia lineal positiva con respecto al flujo de café lavado (Tabla 5 y Figura 4); es decir, a mayor volumen específico

de agua menor potencia y a mayor flujo de café lavado mayor potencia.

Este resultado se puede atribuir principalmente al aumento de la resistencia, por el incremento del flujo másico (kg.s.m^{-2}), y por la presencia de mayor cantidad de mucílago durante el recorrido de los granos en el interior de la carcasa del equipo.

La potencia específica, Pe (W.h.kg^{-1} de café lavado), es un indicador de la eficiencia energética en el lavado del café. En la Tabla 6 se presentan los valores para los tratamientos evaluados, los cuales variaron entre 0,52 y 0,71 W.h.kg^{-1} de café lavado, inferiores a los reportados por Oliveros *et al.* (11) para un equipo similar con capacidad para 1.500 kg.h^{-1} de café lavado, con 0,86 a 1,29 W.h.kg^{-1} de café lavado. Teniendo en cuenta la potencia específica empleada en el desmucilagador DESLIM 2500, desarrollado en Cenicafé (15), 7 W.h.kg^{-1} de café lavado, el lavador ECOMILL® 3000 también es más eficiente.

El impacto en el volumen específico de agua (VEA) y en la potencia específica (Pe) con relación a otras tecnologías utilizadas en Colombia para el lavado del café se presenta en la Tabla 7. La reducción en el VEA y en la Pe es notoria en cada una de éstas. Con relación al tanque tina y utilizando la bomba sumergible la reducción en el VEA es de 88,0% y 91,7%, respectivamente.

Table 4. Promedios y desviación estándar (D.E.) para la variable porcentaje de remoción de mucílago (%) para cada caudal de agua (L.min^{-1}) y flujo de café lavado (kg.h^{-1}) evaluados.

Volumen específico de agua (L.kg^{-1} de cps)	Flujo de café lavado (kg.h^{-1})					
	2.500		3.000		3.500	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
0,3	89,36	3,56	68,36	9,35	71,58	9,13
0,4	83,52	1,66	78,32	7,33	93,2	3,27
0,5	94,06	1,02	96,5	0,91	89,9	6,23

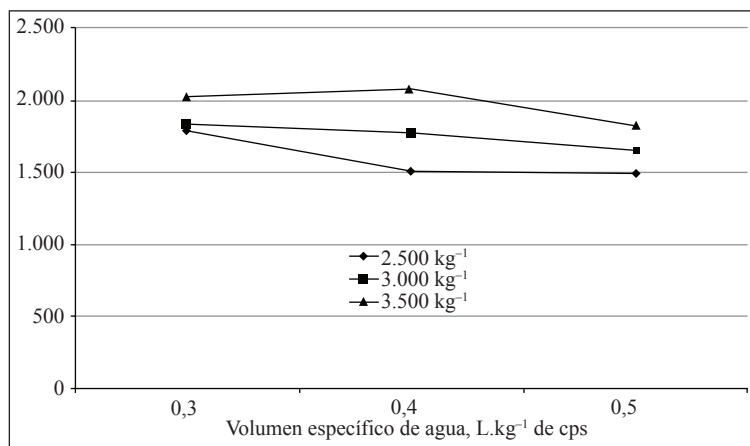


Figura 4. Comportamiento de la variable de respuesta potencia, de acuerdo al volumen específico de agua utilizada.

Table 5. Promedios y desviación estándar (D.E.) para la variable potencia (W), para cada caudal de agua (L.min⁻¹) y flujo de café lavado (kg.h⁻¹) evaluados.

Volumen específico de agua (L.kg ⁻¹ de cps)	Flujo de café lavado (kg.h ⁻¹)						Promedio	D.E.
	2.500		3.000		3.500			
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.		
0,3	1.786,00	228,61	1.826,30	194,47	2.018,90	179,36	1.877,07	124,47
0,4	1.502,70	96,87	1.769,10	128,30	2.071,80	248,41	1.781,20	284,74
0,5	1.483,90	177,30	1.643,00	106,32	1.825,10	150,48	1.650,67	170,73
Promedio	1.590,87		1.746,13		1.971,93			
D.E.	169,25		93,78		129,88			

En la *Pe* también se observan importantes reducciones, 42,0% y 90,7%, cuando se lava café con bomba sumergible y utilizando la tecnología para el beneficio ecológico del café BECOLSUB, respectivamente. Con relación al equipo evaluado por Oliveros *et al.* (11) se logra reducción en potencia específica (42,0%) aunque con incremento de 25,0% en el *VEA*. Estos resultados son de gran importancia desde el punto de vista del aprovechamiento eficiente del agua en el lavado del café y la posibilidad de tratar las mieles generadas por medios como la deshidratación solar (19), (Figura 5), que permite obtener un producto, con la composición química presenta en la Tabla 8, que puede ser utilizado como abono orgánico,

evitando el 100% de la contaminación de las fuentes de agua. La reducción en potencia específica contribuye al aprovechamiento eficiente de la energía eléctrica utilizada en el lavado del café.

Tabla 6. Potencia específica (W.h.kg⁻¹ de café lavado) requerida para el lavado del café

Volumen específico de agua (L.kg ⁻¹ de cps)	Flujo de café lavado (kg.h ⁻¹)		
	2.500	3.000	3.500
0,3	0,71	0,61	0,58
0,4	0,60	0,59	0,59
0,5	0,59	0,55	0,52
Promedio	0,64	0,58	0,56
D.E.	0,07	0,03	0,04

Table 7. Volumen específico de agua y potencia específica para tecnologías utilizadas en el lavado del café.

Tecnología	Volumen específico de agua		Potencia específica	
	L.kg ⁻¹ de cps	Reducción con ECOMILL® 3000 (%)	W.h.kg ⁻¹ de café lavado	Reducción con ECOMILL® 3000 (%)
Lavado en tanque tina con agitación manual	4,17	88,0	-	-
Lavado en tanque con bomba sumergible de 2 HP	6,0	91,7	1,00	42,0
BECOLSUB 2500	1,0	50,0	6,22	90,7
ECOMILL® 1500	0,4	-25,0	1,00	42,0
ECOMILL® 3000	0,5	-	0,58	-

Tabla 8. Caracterización del mucílago seco del café Variedad Castillo®, realizada en el laboratorio de Cenicafé (Multilab).

Variable	Valor
Humedad (%)	6,6
pH	4,9
Densidad real (g.mL ⁻¹)	0,65
Conductividad eléctrica (mS.cm ⁻¹)	6,68
Cenizas (%)	8,7
Pérdidas por volatilización (%)	91,3
Retención de agua* (%)	186,8
Ntotal (%)	2,55
C.O.ox (%)	33,1
P (%)	0,29
K (%)	4,52
Ca (%)	1,02
Mg (%)	0,33
Fe (mg.kg ⁻¹)	971
Mn (mg.kg ⁻¹)	89
Zn (mg.k ⁻¹)	142
Cu (mg.kg ⁻¹)	46

Nota: Resultados expresados en base seca; * la retención de agua en base húmeda.

Se puede concluir que:

- La tecnología evaluada para el lavado del café permite remover mucílago degradado por fermentación natural con menor volumen específico de agua y menor potencia

específica que las tecnologías utilizadas actualmente. Con relación al lavado en el tanque con bomba sumergible el volumen específico de agua y la potencia específica se reducen en 91,7% y 42,0%, respectivamente.

- En los rangos de flujo de café lavado y volumen específico de agua considerados en esta investigación, la remoción de mucílago es afectada por el volumen específico de agua y la interacción flujo de café lavado x volumen específico de agua. La potencia para operar el equipo es afectada por el flujo de café lavado y el volumen específico utilizados. El daño mecánico causado a los granos no es afectado por el flujo de café lavado ni por la interacción flujo de café lavado x volumen específico de agua utilizado, variando entre 0,15% a 0,65%.

- La potencia para operar el lavador varió entre 1.483,9 y 2.071,8 W. La potencia específica, Pe (W.h.kg⁻¹ de café lavado), varió entre 0,52 y 0,71 W.h.kg⁻¹ de café lavado, valores inferiores a los reportados por Oliveros *et al.* (11) para un equipo similar con capacidad para 1.500 kg.h⁻¹ de café lavado, 0,86 a 1,29 W.h.kg⁻¹ de café lavado. Adicionalmente, es notoriamente



Figura 5. Secado solar de mieles resultantes del lavado del café. **a.** Vista interna del secador y **b.** mieles deshidratadas.

inferior a la observada en la tecnología para desmucilaginar mecánico DESLIM 2500, 7 W.h.kg^{-1} de café lavado. Considerando los valores de potencia específica anteriores y costo de energía eléctrica de \$ 400 kWh, al utilizar la nueva tecnología se podría obtener un ahorro de \$ 464.000 por tonelada de café seco obtenido en la finca.

- El mejor aprovechamiento del equipo y del agua utilizada se obtiene con flujo de café lavado de 3.500 kg.h^{-1} y volumen específico de agua de $0,4 \text{ L.kg}^{-1}$ de cps.
- Con la tecnología evaluada se controla hasta el 100% la contaminación causada por las aguas residuales de lavado, utilizando secadores solares de bajo costo o mezclándolas con la pulpa del café, valor superior al observado con Becolsub (90%).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Cenicafé, Colciencias y a la empresa JM. Estrada S.A. por el apoyo recibido para realizar esta investigación.

LITERATURA CITADA

1. AVALLONE, S.; GUYOT, B.; MICHEAUX-FERRIERE, N. Cell wall polysaccharides of coffee bean mucilage. Histological characterization during fermentation. *In: Colloque Scientifique International sur le café*, 18. Helsinki (Finlandia), Agosto 2-6, p 463-470. 1999.
2. CLARKE, R.J.; MACRAE, R. *Coffee Vol. 2. Technology*. Londres (Inglaterra). Elsevier Applied Science, 321p, 1987.
3. CLEVES S., R. *Tecnología en beneficiado de café*. 2a edición. San José Costa Rica, Cléves y Faith, 223p. 1998.
4. COSTE, R. *Coffee: The plant and the product*. Londres (Inglaterra). MacMillan Press, 328p, 1993.
5. ELIAS, L. G. Composición química de la pulpa de café y otros subproductos. *In: Braham, J. E. and Bressani, R. Pulpa de café. Composición, Tecnología y Utilización*. INCAP. Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá. CIID. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. 1978. 152 p.
6. FUKUNAGA E. T. A New mechanical coffee demucilaging machine. Hawaii, Agricultural Experiment Station, 1957. 18 p. (Bulletin No. 115).
7. GONZÁLEZ, E. Temas selectos sobre el aprovechamiento de los residuos del beneficiado húmedo del café. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México, D.F. 1982. (Informe técnico para optar el título de Ingeniero Bioquímico). 132 p.

8. MENCHU E., J.F. Manual práctico de beneficios de café. Guatemala, Asociación Nacional de Café. Subgerencia de Asuntos Agrícolas, 1973. 96 p. (Boletín No 13).
9. MEJÍA G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; MORENO C., E.L.; RODRÍGUEZ H., L.A. Evaluación del desempeño técnico y ambiental de un desmucilagador de café con rotor de varillas. *Cenicafé* 58(2): 122 - 133. 2007.
10. MONTILLA P., J.; ARCILA P., J.; ARISTIZÁBAL L., M.; MONTOYA R., E.C.; PUERTA Q., G.I.; OLIVEROS T., C.E.; CADENA G., G. Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. *Cenicafé* 59(2): 120-142. 2008.
11. OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; MONTOYA R., E.C.; RAMÍREZ G., C.A. Equipo para el lavado ecológico del café con mucilago degradado con fermentación natural. *Revista de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes*. Enero–Junio de 2011. Vol. 33, p 61-67.
12. PEÑUELA M., A.E; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R. Remoción del mucilago de café a través de fermentación natural. *Cenicafé* 61(2): 159 – 173. 2010.
13. PEÑUELA M., A.E.; PABÓN U., J.P.; RODRÍGUEZ V., N.; OLIVEROS T., C.E. Evaluación de una enzima pectinolítica para el desmucilagado del café. *Cenicafé*. 61(3): 241-251. 2010.
14. PEÑUELA M., A.E.; PABÓN U., J.P.; OLIVEROS T., C.E. Enzimas: un alternativa para remover rápida y eficazmente el mucilago del café. 2011, 8p. (Avances Técnicos N° 406).
15. PUERTA Q., G.I. Efecto de enzimas pectinolíticas en la remoción del mucilago de *Coffea arabica* L. Según el desarrollo del fruto. Chinchiná, *Cenicafé*, 60(4): 291:312. 2009.
16. ROA, M. G; OLIVEROS, T. C.E.; ÁLVAREZ G. J.; RAMÍREZ, G. C.A ÁLVAREZ, H.J.R.; DÁVILA, A.M.T.; ZAMBRANO, F. D.A.; PUERTA, Q. G.I.; I.; RODRÍGUEZ V., N. Beneficio ecológico del café. Chinchiná (Colombia), *Cenicafé*, 1999.
17. ROLZ, C.; MENCHUE, J.F.; ESPINOZA, A.; GARCÍA P., A. Coffee fermentation studies. *In: Colloque Scientifique International sur le café*, 5, Lisboa (Portugal), Junio 14-19, p 259 – 269. 1971.
18. SANZ U., J.R.; LÓPEZ P., U.; MEJÍA G., C.A.; RAMÍREZ G., C.A. Paleta plástica para lavar café con menores esfuerzo. 2007, 4p. (Avances Técnicos N° 361).
19. RAMÍREZ, G. C.A., Disminución del impacto ambiental en la tecnología Belcosub mediante la evaporación de lixiviados. Tesis: Maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente; Universidad de Manizales. Facultad de ingeniería, 92 p..2011.
20. TIBADUIZA, V. C.A. Evaluación de alternativas para el de manejo de mieles del proceso de beneficio de café con el equipo ECOLAV. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ*. *Cenicafé*. Informe anual de actividades de la disciplina de Ingeniería Agrícola 2010 – 2011. Chinchiná, *Cenicafé*, 2011. 17p. Informe anual de actividades.
21. SIVETZ, M.; FOOT, H. E. Coffee processing technology. Westport (Estados Unidos) The AVI publishing Company, 598p, 1963.
22. WILBAUX, R. Coffee processing. Roma, FAO, 1963. 232 p. (Boletín no oficial de trabajo N° 20).
23. WINTGENS, J.N. Coffee: Growing, processing, sustainable production. A guidebook for Growers, Processors. Traders and Researchers. Wienheim (Alemania), Wiley-VCH Verlag, 975p, 2004.
24. ZAMBRANO F, D. A; ISAZA H., J. D. Lavado del café en los tanques de fermentación. *Revista Cenicafé* (Colombia) 45(3):106-118. 1994.