

MÉTODO PARA IDENTIFICAR EL MOMENTO FINAL DE LA FERMENTACIÓN DE MUCÍLAGO DE CAFÉ

Aída Esther Peñuela Martínez*; Juan Rodrigo Sanz Uribe*; Jenny Paola Pabón-Usaquén*

RESUMEN

PEÑUELA M., A.E.; SANZ U., J.R.; PABÓN U., J.P.; Método para identificar el momento final de la fermentación de mucilago de café. *Cenicafé* 63 (1): 120-131. 2012

Se desarrolló un método con el cual se puede determinar de manera exacta, precisa y objetiva el momento en el cual finaliza la degradación del mucilago del café por fermentación natural y está listo para ser lavado. Para tal fin, en Cenicafé se realizaron mediciones de la altura de la masa de café en el tanque de fermentación y de la porosidad del café lavado, con un promedio de 7,0% de reducción total de altura de la masa de café y una porosidad de 36,5%. Con esta información se estableció la relación entre la remoción de mucilago y el cambio de volumen de la masa de café por fermentación natural. Se analizaron formas geométricas como cilindro, cono, cono truncado y reloj de arena, con los cuales se pudiera apreciar el cambio de volumen. Se seleccionó el cono truncado con un volumen de 500 mL, que brindó mayor sensibilidad en la determinación indirecta de la remoción de mucilago. Se construyó el dispositivo y se evaluó con café Variedad Castillo®, determinando la relación entre la altura del espacio vacío dentro del dispositivo y el porcentaje de remoción de mucilago de la masa, con un valor mínimo de 95% como criterio de aceptación. Se identificó que cuando la altura del espacio vacío dentro del dispositivo en su lugar más estrecho fue mayor que 85 mm, la remoción de mucilago fue de 95% o mayor, en el 90,8% de los casos. El método propuesto a partir de esta información cumplió con los requerimientos técnicos establecidos y contribuye al control del proceso de beneficio.

Palabras clave: Beneficio de café, remoción de mucilago, densidad aparente.

ABSTRACT

It was developed a method that can accurately, precisely and objectively determine the moment at which coffee mucilage degradation by natural fermentation ends and is ready to be washed was developed. To this end, measurements of coffee mass height in the fermentation tank and of washed coffee porosity with an average of 7.0% of the total coffee mass height reduction and a porosity of 36.5% were performed in Cenicafé. With this information, the relationship between mucilage removal and coffee mass volume change by natural fermentation was established. Geometric shapes such as cylinder, cone, truncated cone and hourglass that allowed the volume change to be seen were analyzed. The truncated cone with a volume of 500 mL, which provided greater sensitivity in the indirect determination of mucilage removal, was selected. The device was built and evaluated using Castillo® Variety coffee by determining the relationship between the height of the empty space inside the device and the mucilage removal percentage of the mass, with a minimum value of 95% as the acceptance criterion. It was found that when the height of the empty space inside the device at its narrowest point was greater than 85 mm, the mucilage removal was 95% or higher in 90.8 % of the cases. The proposed method derived from this data meets the technical requirements and contributes to the coffee process control.

Keywords: Coffee process, mucilage removal, bulk density.

*Investigador Científico I, Investigador Científico II y Asistente de Investigación, respectivamente. Disciplina de Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La fermentación del mucílago de café es un proceso natural en el cual intervienen factores biológicos, químicos y físicos, cuyo principal propósito es la degradación de la estructura del mucílago para ser fácilmente retirado en el lavado. Dada la naturaleza de este proceso, su control se lleva a cabo a través del tiempo, con el cual se determina la finalización del mismo. Diferentes autores han reportado los rangos de tiempo que puede durar este proceso. Wilbaur (15) cita que la fermentación en café frecuentemente dura entre 48 y 60 horas, y a veces más tiempo en regiones frías y de mayor altitud. Cleves (3) menciona que la eliminación del mucílago requiere para casi todos los cafés entre 24 y 36 horas, de acuerdo a la temperatura ambiente. Rolz (14), afirma que el tiempo para completar la fermentación puede variar de 12 a 90 horas, dependiendo del tipo de café y de las condiciones ambientales, y Menchú y Rolz (7), citan que los períodos de fermentación pueden variar entre 12 y 100 horas.

Así mismo, se han referenciado factores que pueden incidir en la duración de este proceso, aunque se desconoce concretamente el efecto de estas variables sobre el tiempo. Entre estos factores se encuentran:

- La temperatura del lugar. El mayor tiempo de fermentación se ha relacionado con las zonas más frías.
- El uso de agua. En la fermentación bajo agua es más lenta la degradación del mesocarpio, lo cual retrasa el inicio de la acidificación. La masa de café se calienta poco durante el proceso, retardando el inicio de la actividad microbiana.

- La cantidad de mucílago en el grano. El café tipo robusta tiene un mesocarpio más delgado y resistente, por lo que necesita de 24 a 36 horas más de fermentación. Estudios realizados por Menchú y Rolz (7), indican que no existe correlación entre la altitud de los cultivos de café variedad Borbón con el contenido de mucílago.
- El grado de madurez del café. Estudios realizados por Puerta (13) confirman que la fermentación requiere menos tiempo cuando el café está maduro.

Para determinar el momento en el cual se debe lavar el café, el caficultor debe recurrir a métodos tradicionales, que se han utilizado para determinar de forma fácil, pero subjetiva, el punto de lavado¹. Mediante un sondeo realizado a caficultores de los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío, Antioquia y Valle del Cauca (10) se indagó acerca del método empleado para determinar el punto final de la fermentación. En este sondeo se encontró que se utilizan métodos tradicionales como son la respuesta al tacto y el método de la estabilidad de un agujero realizado en la masa de café con un madero, con una frecuencia de uso de 30,7% y 30,8%, respectivamente. Así mismo, el 12,3% de los caficultores que participaron en este sondeo, reconocieron que el café debe lavarse varias veces, ante la situación de no identificar este punto adecuadamente, con lo que se aumenta el consumo específico de agua y se incrementa el volumen de agua contaminada. Como principal conclusión de este sondeo, se evidenció la subjetividad en la determinación del momento final de la fermentación y la

¹ **Punto de lavado.** Es el momento del proceso de fermentación de mucílago en el que éste alcanza la degradación total y se pueden retirar sus residuos por medio del lavado, para que no se alteren las características sensoriales del café y el grano pueda continuar con la etapa de secado (2).

necesidad de establecer controles objetivos para este proceso, de gran importancia sobre la calidad del café.

Ante la ausencia de métodos objetivos, debe recurrirse a la recomendación de métodos tradicionales para el control de este proceso. Es así como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura- FAO (9) recomienda la evaluación de la fermentación mediante el tacto, con el cual se percibe una sensación áspera en el pergamino, dado que los granos pierden su textura lamosa. Otros investigadores han tratado de dar control al proceso a través del seguimiento de variables como el pH. Es el caso de investigaciones realizadas por Jackels *et al.* (6), con café de Nicaragua, donde realizaron el seguimiento de la fermentación de mucílago en el laboratorio, estudios en los cuales interrumpieron la fermentación de pequeñas muestras, a través del lavado, cuando el pH de la masa en fermentación decrecía aproximadamente a 4,6; 4,3 ó 3,9, y posteriormente, secaron y tostaron las muestras para evaluar su calidad en paneles de catación. Los resultados mostraron una débil correlación positiva entre el pH del café en el lavado y la calidad. Jackels *et al.* (6), también realizaron el trabajo con caficultores, quienes interrumpieron la fermentación después de un proceso de optimización del tiempo, a través de los valores de pH, para lo cual utilizaron papel de pH estándar, prueba que requirió un tiempo corto de fermentación para finalizar con un valor de pH relativamente alto para el proceso que es llevado a cabo.

En diferentes manuales y guías del proceso de beneficio publicados en países donde realizan el proceso por vía húmeda, tales como Costa Rica (3), IHCAFÉ en Honduras (4), Anacafé (1) y el IICA (5) en Guatemala, se recomienda determinar el momento final

de la fermentación del mucílago del café, a través de los dos métodos mencionados anteriormente.

En Cenicafé se realizó la evaluación de los dos métodos (Figura 1) más utilizados por los caficultores, para la determinación del momento final de la fermentación, con el fin de establecer su eficacia (12). En el método del orificio en la masa se introdujo un trozo de madera de sección circular a la masa de café contenida en el tanque, a una profundidad de penetración de 30 cm, hasta que no hubo caída de los granos dentro del agujero, observación con la cual se registró respuesta afirmativa según el método (punto lavado). En el método del tacto se tomaron muestras de 25 a 30 g de la superficie de la masa de café en proceso de fermentación, se lavaron con agua limpia y se frotaron en las manos, Cuando la muestra se sintió carrasposa, a criterio de expertos en beneficio, se registró respuesta afirmativa según el método (punto de lavado).

Estos dos métodos fueron evaluados en el tiempo, considerando cuatro alturas de llenado del tanque, 100%, 75%, 50% y 25%, y dos clases de materia prima, café sin clasificar y clasificado, antes del proceso de despulpado. El tiempo promedio obtenido con el método de orificio en la masa identificó el punto de lavado cuando el proceso de fermentación presentó en promedio 7,29 h, y con el método del tacto, el tiempo del punto de lavado se registró a las 10,23 h, en promedio, después de iniciado el proceso. Con ambos métodos, el tiempo determinado para lavar el café fue diferente del momento determinado con el método de referencia, es decir, cuando se detecta que la remoción de mucílago es superior al 97% mediante reacción con enzima pectinolítica, el cual es de 15,5 ±0,9 horas.

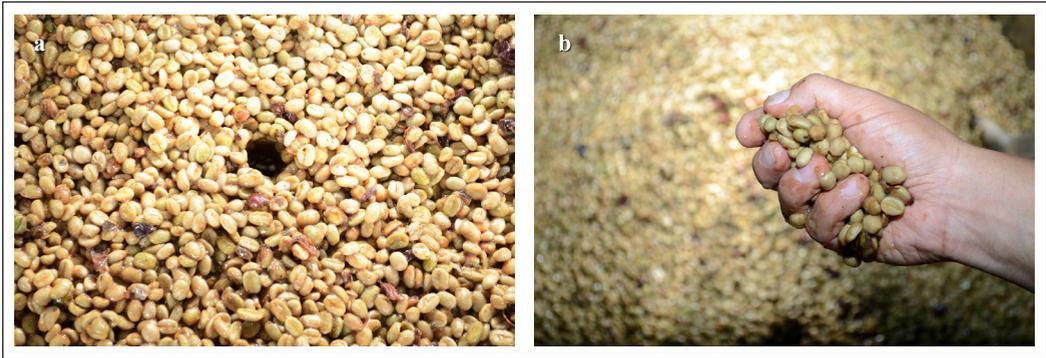


Figura 1. Métodos tradicionales utilizados por el caficultor, para determinar el momento de finalización de la fermentación del café. **a.** Orificio en la masa de café; **b.** Método del tacto.

Los métodos tradicionales utilizados por los caficultores para identificar el punto de lavado presentaron respuesta afirmativa mucho antes de degradar completamente el mucílago. Adicionalmente, presentaron diferencias entre ellos, en el tiempo de respuesta, siendo mayor para el método del tacto. Con el tiempo determinado se obtuvieron porcentajes de remoción en promedio de 58% y 74%, para los dos métodos, respectivamente. En este estudio se incluyó el análisis de variables como la temperatura, el pH y la resistencia de la masa al punzonamiento, con el fin de establecer la relación de estas variables con el porcentaje remoción de mucílago y utilizarlas como variables potenciales para determinar el punto de lavado del café. Se determinó que la calidad de la materia prima tuvo efecto sobre la respuesta en la temperatura, el pH y la resistencia al punzonamiento. La respuesta de la última variable también se afectó por la cantidad de café en el tanque. Adicionalmente, se obtuvo alta dispersión de los valores. Se concluyó que las variables evaluadas no son adecuadas para el desarrollo del método requerido.

Dada la necesidad de un método que determine fácil y objetivamente el momento de finalización de la fermentación natural, este

trabajo de investigación tuvo como propósito desarrollar un método sencillo para que el caficultor identifique el momento adecuado para lavar el café, con al menos 90% de confiabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del método se tuvieron en cuenta los resultados reportados por Peñuela (11), de observaciones realizadas a la masa de café en fermentación, en las cuales se apreció una pérdida de volumen del café despulpado al café lavado, con valores entre 5,6% y 9,7%. La reducción de volumen puede estar entre 11,9% y 13,1%, basado en los cambios de densidad aparente (8) y en una pérdida de masa del 25%, correspondiente al mucílago, entre los dos estados mencionados (12).

El desarrollo del método constó de tres etapas, las cuales fueron llevadas a cabo en las instalaciones de Cenicafé, (Manizales, Caldas). En la primera etapa se realizó el análisis de la disminución de la altura de la masa de café en los tanques de fermentación, considerando dos estados del proceso: Café despulpado (entrada) y café lavado (salida), también se determinó la porosidad del café

lavado. En la segunda etapa, se realizó el diseño y la selección del instrumento para determinar el punto final de la fermentación. En la tercera etapa se realizó la evaluación del dispositivo en el laboratorio.

Etapa I. Análisis de las propiedades físicas de la masa de café. Las pruebas se realizaron en el beneficiadero de Cenicafé, en tanques para disponer el café y remover el mucílago por fermentación natural, con café Variedad Castillo®, procedente de la Estación Central Naranjal. Se determinó la disminución de altura de la masa de café en el proceso de fermentación y el porcentaje de porosidad de la masa de café lavado. Esta información fue registrada en 10 lotes de café procesados en diferentes tiempos de proceso.

El café fue procesado según el protocolo definido por Cenicafé, para la obtención de semilla Variedad Castillo®. Una vez depositado el café despulpado en el tanque, se dejó el drenaje abierto para permitir la salida del mucílago degradado durante el proceso de fermentación. Se midió la altura de la masa, para lo cual se colocó una regla y ésta se marcó con la altura inicial. Al final del proceso se determinó el porcentaje de remoción de mucílago, según el procedimiento establecido por Peñuela (12), hasta alcanzar un valor mayor que 95%, momento en el cual nuevamente se midió la altura de la masa de café en el tanque.

Adicionalmente, se determinó el porcentaje de porosidad de la masa de café lavado, teniendo en cuenta que la masa de granos de café lavado presenta espacios intergranulares ocupados por el aire (intersticios). Estos espacios pueden ser ocupados por el mucílago degradado en el proceso de fermentación. Para esta determinación se utilizó el siguiente procedimiento; se utilizó un recipiente con volumen de 1.000 mL, se llenó con café

lavado al ras y, luego, se adicionó agua hasta alcanzar el nivel máximo del recipiente. Posteriormente, se drenó el agua y se recolectó en una probeta para determinar su volumen. El volumen de agua, representó el volumen de los espacios vacíos. Para estimar el porcentaje de porosidad del café lavado se utilizó la Ecuación <<1>>:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_T} \quad \text{<<1>>}$$

Donde:

ε : Porosidad del café lavado (Decimal)

V_v : Volumen de agua (mL)

V_T : Volumen total del recipiente (mL)

Se estimaron el promedio y la desviación estándar, tanto para la reducción de altura como para la porosidad del café lavado.

Etapa II. Diseño del dispositivo. Con el fin de definir la forma, características y dimensiones de un dispositivo que permitiera potenciar las diferencias de volumen mencionadas, se utilizó el cálculo infinitesimal con el propósito de estimar teóricamente las características del dispositivo y hacer un proceso de optimización. En este proceso se seleccionaron las dimensiones que facilitarían la aplicación del mismo.

Para tal fin se tomaron como criterios de optimización los parámetros sensibilidad y magnitud de la lectura. El proceso de optimización consistió en determinar la mayor sensibilidad y la mayor magnitud de la lectura, con un volumen y forma manejables, y una geometría sencilla.

En primera instancia, por observación, se determinó que un recipiente perforado, con un volumen de 500 mL y una altura máxima de 250 mm, son parámetros que

permiten producir una respuesta confiable para cualquier carga de café despulpado que se deposite en los tanques de fermentación. Así mismo, se determinó que un área perforada de 55% es suficiente para contener la masa de café y permitir el drenado del mucílago degradado en el proceso.

Para determinar la sensibilidad y la magnitud de la medida se realizó el análisis diferencial sobre el volumen y la altura del espacio que queda vacío a medida que se degrada el mucílago de la masa de café contenida en el recipiente. De este análisis resultan las relaciones dV/V y dh/H que están relacionadas entre sí por las características geométricas del recipiente perforado, donde V es el volumen total que abarca el recipiente, dV el volumen de espacio vacío, H la altura total del recipiente perforado y dh la altura del espacio vacío (Figura 2).

La relación dh/H está asociada al parámetro sensibilidad y su numerador a la magnitud de la medida del recipiente. A mayor sensibilidad y magnitud la medida es fácilmente observable.

En el diseño se estudiaron diferentes geometrías (Figura 3), como un cilindro,

un cono regular, un cono truncado recto y dos conos truncados invertidos unidos en su parte más estrecha por un cilindro, en forma de reloj de arena. De ellos, se seleccionó el sistema que presentó mayor sensibilidad y mayor magnitud a través de un proceso de optimización sobre la variable O , resultante del producto entre sensibilidad y magnitud, dh/H y dh , respectivamente, como aparece en la Ecuación <<2>>. Con este análisis se definió que la variable de optimización O tuviera el mayor valor posible. Para la selección también se tuvieron en cuenta las especificaciones de masa y altura mencionadas, lo mismo que la facilidad de construcción, con el fin de aplicar la metodología de Diseño para la Manufactura Económica, DEM (por sus siglas en inglés).

$$O = \frac{(dh)^2}{H} \quad \ll 2 \gg$$

Como resultado de esta etapa, se obtuvo el diseño del dispositivo, que fue seleccionado de acuerdo al valor más alto para la variable O , teniendo en cuenta las especificaciones de diseño, para realizar la construcción de los dispositivos y pasar a la etapa de evaluación.

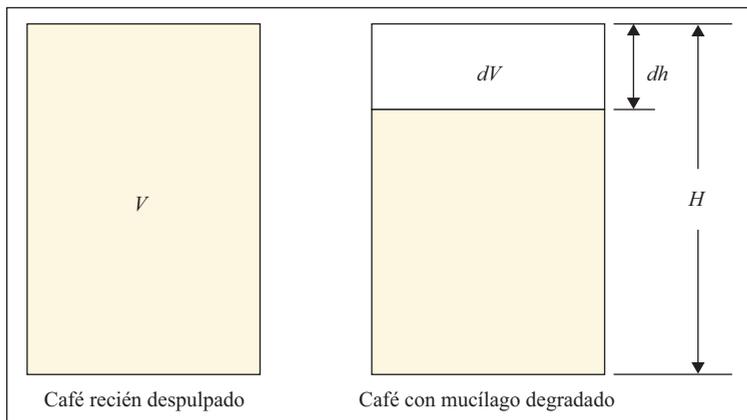


Figura 2. Reducción de volumen del cambio de estado del café en la etapa de beneficio.

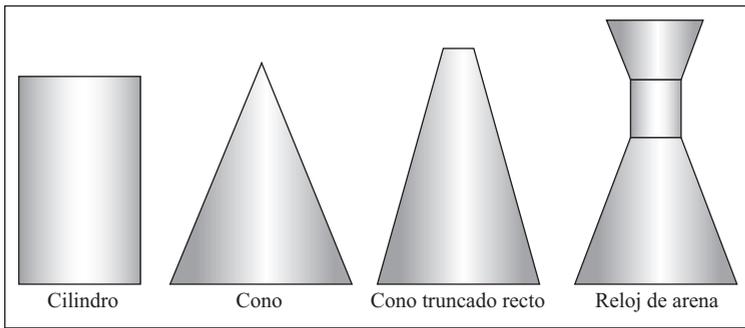


Figura 3. Formas de recipientes estudiados.

Etapa III. Evaluación. Con los dispositivos contruidos se realizaron 70 pruebas, y se determinó la eficacia del método. Esta etapa se desarrolló en el beneficiadero experimental de Cenicafé, con café Variedad Castillo®, procedente de la Estación Central Naranjal. El café fue procesado bajo los criterios de procesamiento de la semilla de café, dispuestos por Cenicafé. Una vez se obtuvo el café recién despulpado, en cada prueba, se llenó el dispositivo a ras, por la base mayor, se aseguró la tapa y se dispuso el dispositivo dentro de la masa de café, para iniciar el proceso de fermentación.

A partir de 12 horas de fermentación, se determinó el porcentaje de remoción de mucílago, según procedimiento establecido por Peñuela, se registró la altura del espacio vacío dejada por la masa de café dentro del dispositivo, por cada hora, hasta que la masa de café alcanzó una remoción mayor que 95%, considerada suficiente para determinar el punto final del proceso de fermentación sin afectar la calidad del café.

Como variables del proceso se tuvieron: Remoción de mucílago (%) y altura del espacio vacío dentro del dispositivo (mm).

Se estimaron el promedio y la variación del variables porcentaje de remoción de mucílago y de la altura del espacio vacío dentro del

dispositivo. Así mismo, se determinó el coeficiente de determinación entre las dos variables analizadas, con el fin de corroborar el comportamiento teórico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa I. Análisis de las propiedades físicas de la masa de café. En la Tabla 1 se observa que la disminución de la altura de la masa de café en el tanque, desde el estado despulpado hasta la finalización del proceso de fermentación, tiene un promedio de 7,0%, en un rango entre 5,6% y 9,7%. Esta disminución representa la pérdida de volumen de la masa, dada por la degradación del mucílago, el cual va drenando hacia la parte inferior del tanque a través de los granos que componen la masa y sale por la rejilla de evacuación de mieles.

La masa de café lavado presentó un promedio de la porosidad de 36,5%, en un rango entre 35% y 38%, y con una desviación estándar de 1,3%. Con esta información, se concluyó que el mucílago degradado que no es evacuado del tanque, tiene espacio suficientemente en los intersticios que se van generando entre los granos, a medida que se pierde la capa de mucílago sobre el pergamino en el proceso de fermentación, en razón a que el contenido inicial de mucílago de una masa de café despulpado es 25% de la masa, en promedio.

Tabla 1. Valores promedio, mínimo y máximo para la altura inicial, final de la masa de café en fermentación y para el porcentaje de disminución de altura.

	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Disminución de altura (%)
Promedio	21,7	20,2	7,0
Mínimo	15,0	14,0	5,6
Máximo	27,0	25,0	9,7
Desviación Estándar	3,72	3,56	1,3

Como resultado de esta etapa, se identificó la posibilidad de utilizar como principio de diseño del método, el cambio de volumen de la masa de café en el proceso de fermentación, apreciable a través de un dispositivo con un volumen de control.

Etapa II. Diseño del dispositivo. La Figura 4 presenta una gráfica donde pueden compararse las formas geométricas de los dispositivos, analizados a través del cálculo diferencial. La gráfica representa en el eje x el cambio de volumen (dV/V) y en el eje y la relación dh/H , la cual está asociada a la sensibilidad del instrumento. Los resultados muestran que los conos, con un ángulo total de 20° , con un volumen total del recipiente de 500 mL, son la forma geométrica en la que más se potencia la disminución de volumen esperado, con valores entre 11,9% y 13,1% para el cono recto, seguido del cono truncado. El recipiente en el que menos se observa el cambio de volumen es el cilíndrico (o prismático) y el recipiente en forma de reloj de arena tiene una sensibilidad media entre los conos y el cilindro, aunque se destaca como una ventaja la mayor pendiente en el rango de disminución de volumen esperado, lo que significa una mayor resolución que las demás formas geométricas.

Para hacer una evaluación de la geometría y su comportamiento en los dispositivos, se tomó como referencia el valor de disminución de volumen del 12,5%, por estar ubicado en la mitad de los límites entre los que se

esperan los resultados. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos para la variable de optimización O en esas condiciones, calculada con la Ecuación <<2>>. Al igual que el análisis anterior, para la sensibilidad, el valor más alto para la variable de optimización se obtuvo con el recipiente de forma cónica, seguido del recipiente con forma de cono truncado. El recipiente en forma de reloj de arena presentó un valor medio para la variable de optimización. El cilindro presenta un valor de la variable de optimización significativamente bajo.

No obstante los resultados para el cono recto, se seleccionó el recipiente con forma de cono truncado en razón a que la parte superior del primero es difícil de llenar completamente, dado el tamaño de los granos de café, lo que hace que en la práctica funcione igual que un recipiente en forma de cono truncado recto.

Una vez seleccionado el cono truncado y con la información de la Tabla 2, se identificó que cuando se alcanza una remoción de mucílago mayor que 95%, el valor teórico de la altura del espacio vacío dentro del dispositivo es mayor o igual que 83 mm, valor que se corroboró en la Etapa III.

Una vez se tuvo una geometría seleccionada, se realizó la construcción de los dispositivos, para lo cual se seleccionó como material de construcción malla plástica 5000, dado que cumple con las características de área perforada,

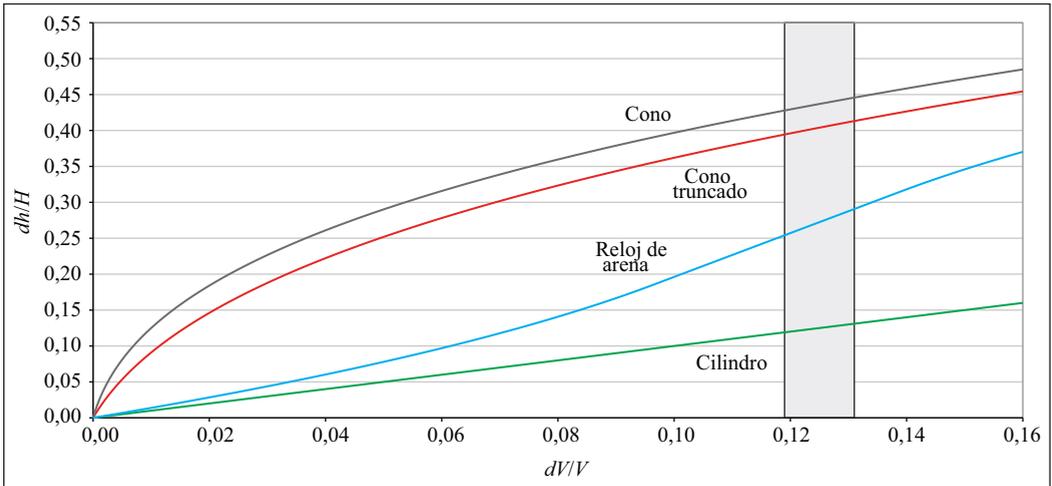


Figura 4. Cambio relativo de altura con respecto al cambio de volumen.

Tabla 2. Variable de optimización para una diferencia de volumen del 12,5%

Forma Recipiente	dh/H [dec.]	H [mm]	O [mm]
Cono recto	0,4369	248,5	47,4282
Cono truncado recto	0,4039	206,4	33,6719
Reloj de arena	0,2724	232,0	17,2144
Cilindro	0,1250	250,0	3,9063

además es lavable, inerte, liviana, resistente y rígida. La tapa inferior se construyó en malla expandida aplanada, en acero inoxidable, con perforaciones muy similares a las de la malla plástica, se consideró este material por tener las mismas características de la malla plástica, pero además por ser resistente a la deformación ocasionada por el peso del café dentro del dispositivo. La unión de las dos piezas consiste en un sistema de dos aros roscados con dos giros, colocados uno en el cono y otro en la base, contruidos en Poliamida 6 de 10 mm de espesor. Se diseñó un arnés en acero inoxidable en el que se introdujo la malla, con el fin de observar la altura del espacio vacío y la marca del punto final de fermentación. En la Figura 5 se muestra el prototipo diseñado y construido.

Etapa III. Evaluación. La Figura 6 muestra los datos experimentales para las dos variables analizadas al final del proceso de fermentación, altura del espacio vacío dentro del dispositivo y remoción de mucílago. Se observa una relación directa, dado que a mayor valor para la altura del espacio vacío, mayor valor del porcentaje de remoción de mucílago, por lo cual se concluyó que la dimensión dada por el dispositivo, explica la remoción de mucílago en un 99%, de acuerdo al coeficiente de determinación obtenido. La Ecuación <<3>> corresponde a la regresión lineal que explica la relación que existe entre las dos variables:

$$Rm = (0,011154 \text{ mm}^{-1}) h \quad \text{<<3>>}$$

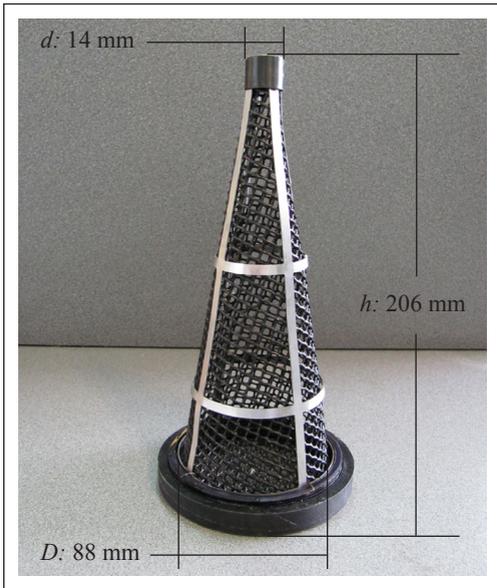


Figura 5. Prototipo diseñado y construido, de cono truncado, para la determinación del punto final de la fermentación.

Donde:

R_m : Remoción de mucílago (Decimal)

h : Altura del espacio vacío dentro del dispositivo (mm)

Con este análisis se determinó también que cuando la remoción de mucílago es

superior al 95%, la altura del espacio vacío es mayor o igual que 85 mm, muy cerca del valor teórico determinado (83 mm). Esta respuesta se presentó en el 90,8% de las pruebas realizadas, indicando un error del 9,2%, el cual fue ocasionado por la variación en el volumen de los dispositivos disponibles para las pruebas. Para disminuir ese error se diseñaron dispositivos fabricados en serie, mediante la técnica de prototipado rápido, que garantiza igual volumen para todas las piezas. El dispositivo fabricado y definitivo se muestra en la Figura 7.

Se realizaron siete pruebas del método usando este prototipo bajo las mismas condiciones de evaluación del dispositivo anterior. Como resultado se obtuvo una remoción de mucílago mayor a 95% cuando la altura del espacio vacío fue mayor o igual a 85 mm, en todas las pruebas realizadas.

Se puede concluir que:

Con base en el análisis de algunas propiedades físicas de la masa de café en el proceso de fermentación, se desarrolló un método indirecto para determinar objetivamente el momento final de la fermentación, basado en

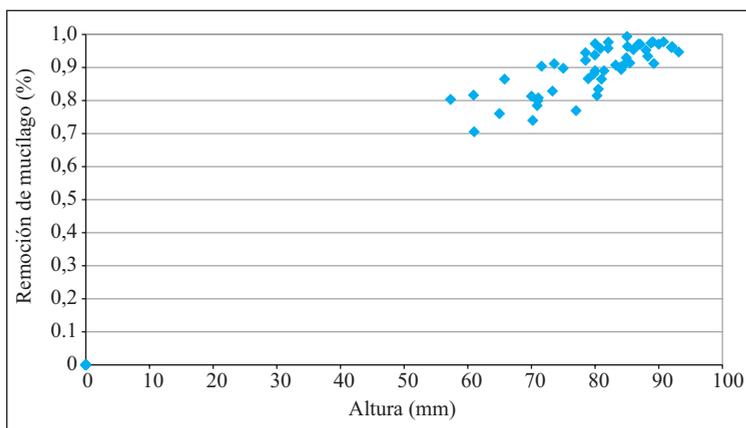


Figura 6. Relación del porcentaje de remoción de mucílago por fermentación natural con la altura del espacio vacío del dispositivo diseñado.



Figura 7. Prototipo definitivo del dispositivo utilizado para el método propuesto.

el cambio de densidad de la masa, apreciada por un cambio de volumen y relacionada con el porcentaje de remoción de mucílago. El método propuesto es confiable, exacto, de bajo costo y resulta fácil de usar, además permitirá disminuir los riesgos de deterioro en la calidad del café.

La forma de cono truncado en un volumen de 500 mL y un área perforada de 55% fue la configuración que mayor número de ventajas presentó para ser usado en esta aplicación.

Con la metodología utilizada para este desarrollo se logró obtener un error aceptable en la determinación del momento final de fermentación, relacionada con el porcentaje de remoción de mucílago, logrando la confiabilidad mínima deseada, aun con los dispositivos elaborados manualmente.

El método propuesto además de ser de fácil uso, no requiere de instrumentos

ni mediciones externas a la masa de café dentro del tanque, con lo que la etapa de fermentación adquiere un control sencillo y objetivo del proceso, sin complicar las labores en la finca.

El desarrollo resultado de esta investigación tiene alta posibilidad de ser industrializado con el fin de obtener dispositivos económicos para que sean asequibles por los caficultores. Así mismo, poder realizar la divulgación de este método de manera masiva para la producción de café con procesos controlados objetivamente, como es requerido cada vez con mayor frecuencia en el mercado.

La producción industrial permitirá obtener dispositivos con mayor estabilidad dimensional que los utilizados en esta investigación, por lo cual se espera una reducción considerable del error del método.

Se propone evaluar este método bajo condiciones de campo, con lo cual además de los aspectos técnicos bajo una amplia variabilidad de condiciones, se obtenga información acerca de la aceptación del método por el potencial usuario.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan los agradecimientos la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, financiadora de esta investigación, ING1123. Al personal de la Disciplina de Ingeniería Agrícola, especialmente a los ingenieros Paula Ramos G. y Mauricio García Navarro, y al Doctor Carlos Oliveros por sus aportes y colaboración.

LITERATURA CITADA

1. ANACAFÉ. Manual de beneficiado húmedo del café. Guatemala : Anacafé, 2005. 250 p.

2. CENICAFÉ. Cartilla cafetera. p. 162–163. Chinchiná : Federación Nacional de Cafeteros : Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2004.
3. CLEVES, R. Tecnología en beneficiado de café. San José de Costa Rica : Tecnicafé internacional : Impresora Tica, 1998. 223 p.
4. IHCAFÉ. Beneficiado y Calidad del Café. p. 213 –241. Manual de caficultura. Tegucigalpa : IHCAFÉ, 2001
5. IICA. Guía para el beneficio de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen. Guatemala : IICA, 2010. 107 p.
6. JACKELS, S.C.; JACKELS, C.F.; VALLEJOS, C.; KLEVEN, S.; RIVAS, R.; FRASER D., S. Control of the coffee fermentation process and quality of resulting roasted coffee: Studies in the field laboratory and on small farms in Nicaragua during the 2005-06 harvest. p. 434-442. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (21 : Septiembre 11-15 2006 : Montpellier). París : ASIC, 2006.
7. MENCHÚ, J.F.; ROLZ, C. Coffee fermentation technology. *Café cacao* the XVII(1):53-61. 1973.
8. MONTILLA P., J. Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café. Manizales : Universidad de Caldas. Facultad de ciencias agropecuarias, 2006. 107 p. Tesis: Ingeniera agrónoma.
9. FAO. Roma, Italia. [En línea]. Disponible en internet: http://www.coffee-ota.org/glossary.asp?lang=es#P151_29560. Consultado en Diciembre de 2006.
10. PEÑUELA M., A.E. Informe anual de actividades Sep 2005 – Oct 2006. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. 8 p.
11. PEÑUELA M., A.E. Informe anual de actividades Sep 2008 – Oct 2009. Chinchiná : CENICAFÉ, 2009. 20 p.
12. PEÑUELA M., A.E. Estudio de la remoción del mucílago de café a través de fermentación natural. Manizales : Universidad de Manizales, 2010. 82 p. Tesis: Magister en desarrollo sostenible y medio ambiente.
13. PUERTA Q., G.I. El beneficio y la calidad del café: Documento interno. Chinchiná : CENICAFÉ, 1995. 40 p.
14. ROLZ C. Coffee fermentation studies. p. 259-269. Lisboa : ASIC, 1972.
15. WILBAUX, R. Beneficio del café. Roma : FAO, 1972. (Boletín no oficial de trabajo No. 20).