CARACTERIZACION REOLOGICA DEL MUCILAGO Y DE LAS SUSPENSIONES MUCILAGO-CAFE EN BABA Y MUCILAGO-CAFE PERGAMINO HUMEDO

Carlos E. Oliveros T.* Sundaram Gunasekaran**

RESUMEN

OLIVEROS T., C.E.; GUNASEKARAN G. C. Caracterización reológica del mucílago de café y de las suspensiones mucílago-café en baba y mucílago-café pergamino húmedo. Cenicafé (Colombia) 45(4): 125-136. 1994.

El comportamiento reológico, índice de consistencia (K_m) e índice de flujo (n_m),del mucílago de café de las variedades caturra y Colombia es significativamente afectado por el tiempo entre la cosecha y el beneficio (TPP) y por la cantidad de cerezas maduras (CCM). Es altamente pseudoplástico lo cual podría deberse al efecto combinado de destrucción de estructuras debido a la acción de fuerzas de tensión y cortantes, y a la tendencia de las partículas a alinearse en la dirección principal del campo de flujo. El aumento en la viscosidad aparente del mucílago con el incremento en el TPP podría atribuirse a la concentración de taninos. Las suspensiones de CB-mucílago presentan un alto comportamiento pseudoplástico. El modelo potencial ajusta bien los datos de esfuerzo cortante y de tasa de deformación en el rango de Υ de 0 a 100 s^{-1} y de ϕ de 32 a 45% v/v. El comportamiento reológico de las suspensiones es afectado significativamente por la concentración de partículas. Sólamente el índice de consistencia (K_s) aumenta significativamente cuando ϕ aumenta. Las suspensiones de CB-mucílago exhiben mayor comportamiento pseudoplastico que las suspensiones CPH-mucílago.

ABSTRACT

Mucilage of coffee cherries, Colombia and Caturra varieties contains structural parts of coffee pulp such as phloem vessels, cell wall and tannins, and the rest of the coffee bean parts such as parchment and silver skin. Rheological behaviour of mucilage is highly affected by the postharvest time, content of ripe cherry coffee (RCC) and variety. The flow behavior index (n_m) is significantly affected by the postharvest time (PT) and variety. The highly pseudoplastic behaviour exhibited by the mucilage could be attributed to the combined effect of destruction of structures due to the action of shearing and tensile forces, as found at shear rates higher than 100 s^{-1}, and the tendency for alignment of small particles with the flow field. The increase in viscosity with increase in the postharvest time (PT) could be due to the increase in the concentration of tannins in the mucilage at the highest PT value. Depulped Coffee Beans (DCB)-mucilage suspensions exhibit high shear thinning behavior. Power-law model fits well the shear stress and shear rate experimental data in the range of shear rate 0 - 100 s^{-1} and concentration 32 - 44% v/v. Rheological behaviour of DCB-mucilage suspensions is significantly affected by the concentration or volume fraction. The consistency index (K_s) significantly increases when the concentration increases. No significant effect of concentration on n_s was observed. A significant effect of coffee condition (depulped and parchment) on parameters K_s and n_s was observed. Suspensions prepared with depulped coffee beans (DCB) exhibited more pseudoplastic behaviour than suspensions obtained with parchment coffee beans (PCB). Shear-thinning behavior exhibited by DCB-mucilage suspensions could be due to the alignment of the coffee beans with the flow field, especially at the higher shear rate values.

* Investigador Científico III. Ph.D. Cenicafé. Disciplina de Ingeniería Agrícola.

** Profesor Asociado. Ph.D. University of Wisconsin-Madison. Departamento de Ingeniería Agrícola.

Colombia es el primer productor y exportador mundial de los denominados **cafés suaves.** La alta calidad de este producto es el resultado de la interacción de diferentes factores como la variedad, el tipo de suelo, las prácticas culturales y especialmente el cuidado durante la cosecha y el beneficio.

Las operaciones de pos-cosecha utilizadas en Colombia para la obtención de cafés suaves son: **despulpado, fermentado, lavado, clasificado y secado.** La mayoría de los defectos observados en la calidad de la bebida son atribuidos al mal control durante la fermentación. Algunos de estos defectos, como el sabor a fermento, podrían ser evitados utilizando técnicas de remoción rápida del mucílago como el desmucilaginado mecánico.

El conocimiento de las propiedades reológicas del mucílago y de las suspensiones mucílago-café (en baba o lavado) es necesario para el estudio del desmucilaginado mecánico.

Es importante revisar algunos conceptos teóricos que describen las caractrísticas reológicas de los fluídos:

Viscosidad de fluidos Newtonianos y no-Newtonianos. En fluídos Newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación ó tasa de cortante (γ). Estas propiedades se pueden relacionar por medio de la siguiente expresión,

$$\tau = \mu\gamma \qquad \text{«1»}$$

La mayoría de los fluídos biológicos no obedecen al comportamiento indicado en la ecuación «1» y el valor del esfuerzo cortante depende de la tasa de cortante aplicada y en varios casos del tiempo (6,23,29). Adicionalmente, el comportamiento reológico de los materiales biológicos es afectado también por la concentración de masa (1,18,27). En consecuencia se requiere de modelos más complejos para describir su comportamiento reológico. Los modelos de Hershel-Bulkley y de Casson son los más utilizados para ajustar datos de τ y γ en fluídos no-thixotropicos (4,23). En el modelo de Hershel-Bulkley (ecuación 2) se asume una relación no-lineal entre τ y γ y se propone un esfuerzo de fluídez ó mínimo esfuerzo para producir el flujo, τ_0.

$$\tau = \tau_0 + K\,\gamma^n \qquad \text{«2»}$$

Cuando no se considera el esfuerzo de fluidez la ecuación «2» se convierte en el modelo de Ostwald- de Waele (modelo de potencia), descrito en su forma más general como se indica a continuación:

$$\tau = -K \left| \sqrt{\frac{(\Delta : \Delta)}{2}} \right|^{n-1} \Delta \qquad \text{«3»}$$

El efecto de la concentración de pectina en pulpa de mango ha sido evaluado (18). El esfuerzocortante, τ, a determinada tasa de cortante, γ, es significativamente afectado por una pequeña reducción en la concentración de pectina: una reducción de 5,7% de pectina reduce la viscosidad en 50%. El efecto de la concentración de pectina en el índice de flujo (n) y en la energía de activación fué bajo.

Reología de suspensiones. El comportamiento reológico de suspensiones es más complejo que el de fluídos puros. Es afectado por varios factores (interactuando) y entre los más importantes se tiene: la concentración de partículas su tamaño y distribución, la tasa de cortante, la estructura y la viscosidad de la fase contínua (15,16,19,20,24,26).

La ecuación de Einstein (10), se aplica al caso de suspensiones altamente diluídas ($\phi <$

Colombia es el primer productor y exportador mundial de los denominados **cafés suaves.** La alta calidad de este producto es el resultado de la interacción de diferentes factores como la variedad, el tipo de suelo, las prácticas culturales y especialmente el cuidado durante la cosecha y el beneficio.

Las operaciones de pos-cosecha utilizadas en Colombia para la obtención de cafés suaves son: **despulpado, fermentado, lavado, clasificado y secado.** La mayoría de los defectos observados en la calidad de la bebida son atribuidos al mal control durante la fermentación. Algunos de estos defectos, como el sabor a fermento, podrían ser evitados utilizando técnicas de remoción rápida del mucílago como el desmucilaginado mecánico.

El conocimiento de las propiedades reológicas del mucílago y de las suspensiones mucílago-café (en baba o lavado) es necesario para el estudio del desmucilaginado mecánico.

Es importante revisar algunos conceptos teóricos que describen las caractrísticas reológicas de los fluídos:

Viscosidad de fluidos Newtonianos y no-Newtonianos. En fluídos Newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación ó tasa de cortante (γ). Estas propiedades se pueden relacionar por medio de la siguiente expresión,

$$\tau = \mu\gamma \qquad \text{«1»}$$

La mayoría de los fluídos biológicos no obedecen al comportamiento indicado en la ecuación «1» y el valor del esfuerzo cortante depende de la tasa de cortante aplicada y en varios casos del tiempo (6,23,29). Adicionalmente, el comportamiento reológico de los materiales biológicos es afectado también por la concentración de masa (1,18,27). En consecuencia se requiere de modelos más complejos para describir su comportamiento reológico. Los modelos de Hershel-Bulkley y de Casson son los más utilizados para ajustar datos de τ y γ en fluídos no-thixotropicos (4,23). En el modelo de Hershel-Bulkley (ecuación 2) se asume una relación no-lineal entre τ y γ y se propone un esfuerzo de fluídez ó mínimo esfuerzo para producir el flujo, τ_0.

$$\tau = \tau_0 + K\,\gamma^n \qquad \text{«2»}$$

Cuando no se considera el esfuerzo de fluidez la ecuación «2» se convierte en el modelo de Ostwald- de Waele (modelo de potencia), descrito en su forma más general como se indica a continuación:

$$\tau = -K \left| \sqrt{\frac{(\Delta : \Delta)}{2}}^{\,n-1} \right| \Delta \qquad \text{«3»}$$

El efecto de la concentración de pectina en pulpa de mango ha sido evaluado (18). El esfuerzocortante, τ, a determinada tasa de cortante, γ, es significativamente afectado por una pequeña reducción en la concentración de pectina: una reducción de 5,7% de pectina reduce la viscosidad en 50%. El efecto de la concentración de pectina en el índice de flujo (n) y en la energía de activación fué bajo.

Reología de suspensiones. El comportamiento reológico de suspensiones es más complejo que el de fluídos puros. Es afectado por varios factores (interactuando) y entre los más importantes se tiene: la concentración de partículas su tamaño y distribución, la tasa de cortante, la estructura y la viscosidad de la fase contínua (15,16,19,20,24,26).

La ecuación de Einstein (10), se aplica al caso de suspensiones altamente diluídas (ϕ <

0,01). En esta ecuación, en la cual se asume que no hay interacciones entre las partículas, se propone una viscosidad íntrinseca de 2,5. Basado en el efecto en la viscosidad producido por la adición sucesiva de partículas (de forma esférica), Mooney (20) propuso el siguiente modelo para fluídos Newtonianos.

$$\eta_r = EXP\left[\frac{2.5\,\phi}{1 - K\,\phi}\right] \qquad «4»$$

Frankel y Acrivos (11) proponen un modelo desarrollado con base en el análisis del flujo hidrodinámico que ocurre en el espacio interparticular. Se asumió que las partículas se mueven a la misma velocidad del fluído que las rodea y que el índice de flujo (n) es constante. La principal restricción en este modelo es la predicción de comportamiento Newtoniano en suspensiones concentradas.

Se han desarrollado modelos matemáticos para suspensiones no-Newtonianas a partir de los existentes para suspensiones altamente diluídas (Newtonianas). Riddley (24) propuso la siguiente expresión para suspensiones no-Newtonianas, basado en el modelo de Mooney.

$$\eta_r = EXP\ \frac{[\eta_r]_{\gamma}\,\phi'}{[1 - K_{\gamma}\,\phi']} \qquad «5»$$

Los parámetros K y [η] dependen de la tasa de cortante y se pueden estimar considerando dos valores de viscosidad relativa (η) a diferente tasa de cortante. Para el caso de arreglo cúbico, el valor de K puede estar comprendido en el rango de 1,35 a 1,91 (20). La viscosidad íntrinseca es igual a la definida por Einstein (10) y su valor para el caso de suspensiones Newtonianas es 2,5. Sin embargo, para el caso de suspensiones no-Newtonianas Riddle (24) registró valores de K y [η] diferentes.

Kitano *et al.* (17) proponen un modelo empírico para correlacionar datos de viscosidad relativa (η_r) y la fracción de volúmen (ϕ). El modelo «6» fué utilizado exitosamente en materiales como fibra de vidrio, fibra de carbono y talco. El único parámetro por estimar (A) contabiliza el efecto de la geometría y el empacado "packing" en la suspensión.

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\phi}{A}\right)^{-2} \qquad «6»$$

Jarzebski (15) propuso un modelo basado en enfoque energético, considerando un arreglo cúbico. La suposición de índice de flujo constante (n) es la principal consideración limitativa de este modelo (24,26). Otros desarrollos empíricos basados en la observación de las curvas de η_r vs. ϕ han sido propuestos (8,30).

El efecto del tamaño y la distribución en la viscosidad de la suspensión es importante dependiendo de la concentración. Cuando $\phi < 0{,}20$ el tamaño de las partículas tiene poco efecto en la viscosidad mientras que a valores más altos el efecto es considerable (19).

Determinación experimental de la viscosidad en estado estacionario. La viscosidad de fluidos Newtonianos y no-Newtonianos en estado estacionario es usualmente determinada por medio de cilindros concéntricos, de placa y cono, placas paralelas y viscosímetros capilares (4,13,23). En el caso de los dos primeros métodos se mide el torque resistivo producido por las fuerzas de arrastre "drag forces" que actúan en la superficie del elemento rotante. La tasa de cortante es calculada para cada condición. Es posible obtener facilmente en la literatura expresiones matemáticas que relacionan torque y dimensiones físicas del viscosímetro (4).

Las constantes requeridas en los modelos reológicos se pueden estimar a partir de los datos de torque y tasa de cortante, definidos para

cada configuración del viscosímetro. La sedimentación de partículas y la dificultad para mantener la concentración de partículas uniforme son importantes limitaciones encontradas en los viscosímetros convencionales, aún en el caso de suspensiones de baja concentración. Chase *et al.* (5), proponen un viscosímetro especialmente diseñado para medir parámetros reológicos en suspensiones con pulpa de madera. El equipo consiste de un agitador con múltiples álabes que rota en un gran cilindro con álabes en su pared interior.

Pordesimo *et al.* (22) evaluaron el efecto del tamaño y la forma de sólidos en el comportamiento reológico de suspensiones. Prepararon cubos pequeños, cilindros y discos de papa, variedad Idaho. Se usó un fluido no-Newtoniano para la fase continua. Se utilizó la siguiente expresión matemática, propuesta por Cross y Kaye (9), para correlacionar el torque requerido para rotar un disco a través de la suspensión y el esfuerzo cortante en su borde.

$$T + \frac{\omega}{3}\frac{dT}{d\omega} = \frac{2\pi^3 \tau}{3} \qquad \text{«7»}$$

Los resultados más importantes obtenidos por Pordesimo *et al.* (22) fueron:

- El tamaño de las partículas tiene efecto significativo en el índice de consistencia (K_s). El efecto de la concentración en (K_s) fué significativo al nivel del 10%.
- El índice de flujo (n_s) es afectado por el incremento en el tamaño y la concentración de cubos.
- Independientemente del medio contínuo, **n** aumenta linealmente cuando el tamaño y la concentración de partículas aumentan.

Este trabajo estuvo dirigido a caracterizar el comportamiento relógico del mucílago del café y las suspensiones mucílago- café tanto en baba como lavado. Se describen los procedimientos teóricos y experimentales utilizados en la determinación de la viscosidad aparente del mucílago y de las suspensiones descritas.

MATERIALES Y METODOS

El tiempo transcurrido entre la cosecha y el inicio del beneficio del café, denominado tiempo de preproceso ó TPP, la variedad y el contenido de cerezas maduras (CCM) de la masa de café pueden afectar significativamente el comportamiento reológico del mucílago del café y de las suspensiones café (baba ó lavado). La caracterización reológica del mucílago se hizo teniendo en cuenta el efecto de estos parámetros en la variable respuesta esfuerzo cortante (τ), mediante un diseño de clasificación simple con arreglo factorial 2x2 , 2 TPP y 2 CCM (Tabla 1).

El efecto de la concentración de partículas (granos de café), condición del café (en baba ó en pergamino húmedo) y el CCM en la reología de las suspensiones (tratamientos) se evaluó considerando un diseño de clasificación simple con arreglo 2x2x2 (2 CCM, 2 Concentraciones de partículas y 2 Estados del café) (Tabla 1).

La unidad experimental (u.e.) fué 5 kg de café cereza y para cada tratamiento se utilizaron mínimo siete unidades experimentales.

TABLA 1. Tratamientos y niveles aplicados para evaluar el comportamiento reológico del mucilago [m] y de las suspensiones mucílago-café[s].

Tratamiento	Nivel
Tiempo preproceso (TPP)[m], h	3 6
Contenido de cereza madura (C.C.M.) en peso[m,s], %	100 70
Concentración de café[s], v/v%	32 44
Estado del café[s]	Despulpado Pergamino húmedo

Los lotes de café en cereza recibidos en el beneficiadero fueron sometidos a la clasificación hidraúlica para eliminar los materiales livianos. Las cerezas de café fueron clasificadas manualmente en tres grados de madurez: sobremaduras, maduras y pintonas. Las muestras de trabajo para cada tratamiento, 5 kg de café en cereza, fueron preparadas a partir de estos materiales, los cuales fueron despulpados manualmente y desmucilaginados utilizando un dispositivo similar al RMM-CENICAFE citado por Oliveros (21).

Se adicionó un pequeño volúmen de agua (0,3 l/kg de café en baba) para facilitar la separación del mucílago desprendido de los granos de café.

El esfuerzo cortante (τ) en función de la tasa de cortante (γ) para cada u.e., en cada tratamiento, se obtuvo a partir de los correspondientes valores de índice de consistencia (K_m) y de índice de flujo (n_m), utilizando un viscosímetro Brookfield HB DV-III, con software Rheocalc® desarrollado por la Brookfield Engineering Labs, Inc., con un adaptador para muestras pequeñas (cilindros coaxiales) modelo SSA15/7RPY con rango de 0,16 a 10^5 Pa.s.

La muestra de mucílago requerida en cada ensayo fué de 3 ml. Se recirculó agua para mantener una temperatura de la muestra en el rango 21 ± 1°C.

El comportamiento reológico de las suspensiones mucílago-café se evaluó utilizando un viscosímetro de placas paralelas (V.P.P.). La instrumentación, similar a la utilizada por Pordesimo *et al.* (22), constó de : la cabeza rotante del viscosímetro Brookfield HB DV-III con rango máximo para torque de 57496 dinas-cm; un disco de 4,717 cm de diámetro y 2 mm de espesor construído en acero inoxidable; un recipiente con capacidad de 140 ml, 5,20 cm de díametro interno. Para la comparación de las medias de tratamientos se utilizó la prueba de Tukey con un nível de significancia del 5 %.

RESULTADOS Y DISCUSION

El mucílago obtenido mediante el desmucilaginado mecánico no es un material puro. Además de sus constituyentes químicos (pectinas, azúcares, agua, etc) contiene estructuras celulares provenientes del propio mesocarpio, básicamente paredes celulares y vasos de floema, residuos de pergamino, de la película plateada y taninos (Figura 1).

Reología del mucílago. El comportamiento reológico del mucílago en cada tratamiento es mostrado en la Figura 2. Como se espera en fluídos que contienen sustancias de alto peso molecular (23), el mucílago exhibe un comportamiento altamente pseudoplástico. Se observó

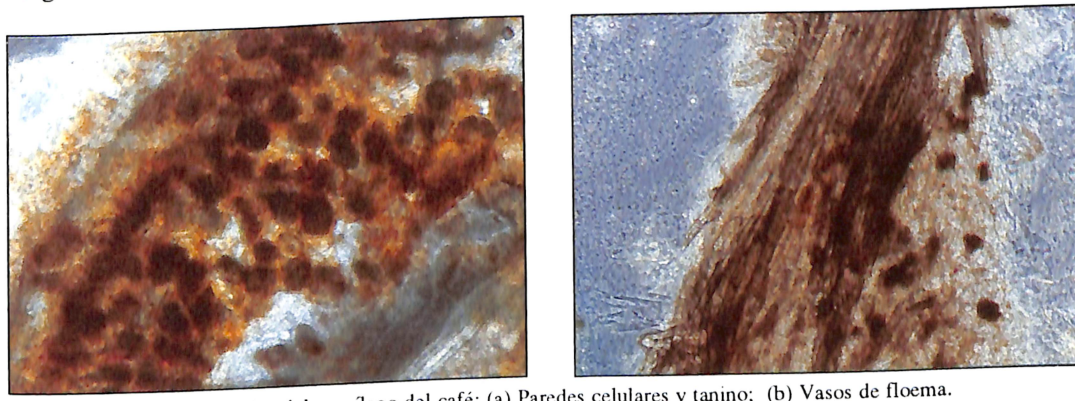

Figura 1. Vista microscópica del mucílago del café: (a) Paredes celulares y tanino; (b) Vasos de floema.

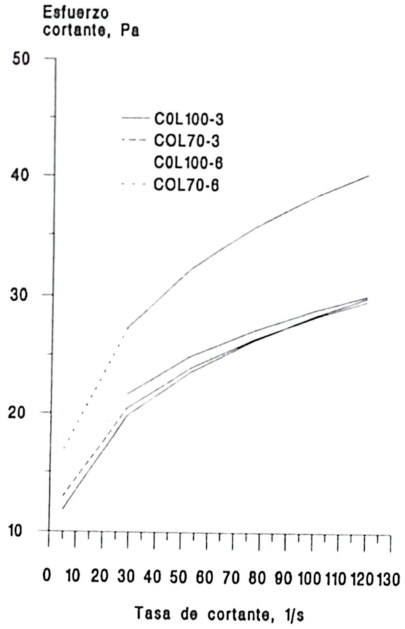

Figura 2. Esfuerzo cortante en función de la tasa de cortante para mucílago de café variedad Colombia.

efecto significativo del tiempo de preproceso (TPP) y del contenido de cerezas maduras (CCM), en el esfuerzo cortante, τ, en cada variedad de café. Los valores más altos de τ se obtuvieron con el máximo TPP y el mínimo CCM. Estos resultados podrían atribuirse a diferencias en la composición química del mucílago y a la mayor concentración de taninos a mayor valor de TPP.

Los datos de esfuerzo cortante (τ) obtenidos en cada prueba y para cada tratamiento, fueron ajustados a un modelo de potencia obteniendose el índice de consistencia (K_m) y el índice de flujo (n_m). El coeficiente de determinación (r^2) en cada conjunto de datos fué superior a 0,9. Para cada tratamiento se obtuvieron los correspondientes promedios de los valores de K_m y n_m. En la Figura 3 se muestran valores de viscosidad aparente en función de la tasa de cortante. Como se indica en la figura, en todos los tratamiento se presenta una fuerte reducción en la viscosidad aparente a la máxima tasa de cortante (120 s^{-1}).

Las diferencias en viscosidad aparente a las tasas más altas de deformación se observan mejor utilizando escala log-log, como se muestra en la Figura 4.

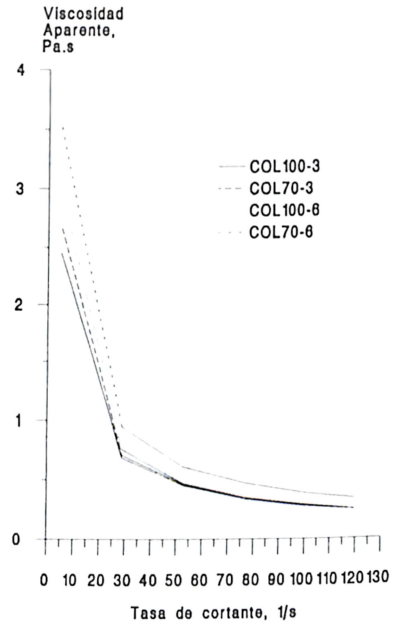

Figura 3. Viscosidad aparente vs. tasa de cortante para mucílago de café variedad Colombia.

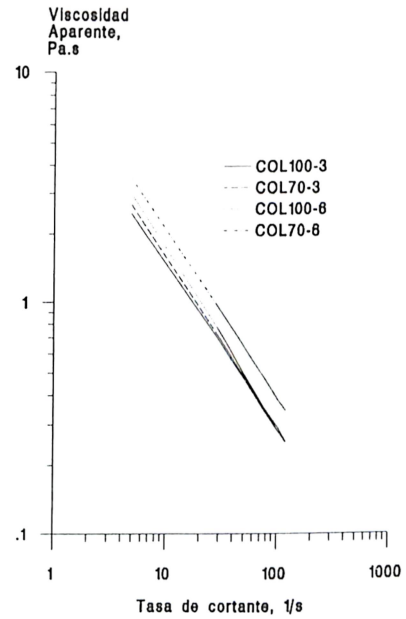

Figura 4. Viscosidad aparente vs. tasa de cortante. Mucílago de café variedad Colombia (escala log-log).

El análisis de varianza para la variable respuesta K_m no mostró efecto de las interacciones variedad*CCM*TPP y la doble interacción variedad*CCM*TPP K_m y mostró efecto de la variedad, el contenido de cerezas maduras (CCM) y el TPP al nivel del 1%. Para la variable respuesta n_m, el análisis de varianza mostró efecto de la variedad y el TPP al nivel del 1%.

Los valores promedios de K_m y n_m obtenidos en cada tratamiento fueron comparados por medio de la prueba de Tukey (al 1%). Con base en este análisis, mostrado en la Tabla 2, se observa que los valores de K_m son estadísticamente diferentes para cada variedad, CCM y TPP. Los valores promedios de n_m son significativamente diferentes entre variedades y entre TPP. Los coeficientes de variación (c.v.) mostrados en la Tabla 2 son altos pero aceptables en experimentos con materiales biológicos en los cuales podría existir diferencias en el grado de madurez entre las muestras, preparadas con material clasificado manualmente, y en la composición química del mucílago de un lote a otro.

Los promedios de los valores de K_m y n_m con dos niveles de CCM (70 y 100%) y de TPP (3 y 6 h) son mostrados y comparados en las Figuras 5 y 6. Como se puede observar en las gráficas, el mucílago obtenido de Caturra es más viscoso y relativamente más pseudoplástico que el mucílago obtenido de café variedad Colombia.

Reología de suspensiones. El torque requerido para rotar el disco en el viscosímetro de placas paralelas se midió a diferentes velocidades. Siguiendo el método descrito por Pordesimo *et al.* (22), el primer paso en la obtención de K_s y n_s

TABLA 2. Valores promedios de K_m y n_m para mucílago.

Tratamiento (variedad-CCM-TPP)	n_m	C.V.* (%)	K_m (Pa.s^n)	C.V. (%)
Caturra 100-3	0,26^a	31,15	8,17^e	34,03
Caturra 70-3	0,23^a	27,23	12,62^g	33,43
Caturra 100-6	0,19^b	28,29	11,96^f	39,61
Caturra 70-6	0,16^b	40,58	18,90^h	42,43
Colombia 100-3	0,29^c	13,15	7,49^i	20,87
Colombia 70-3	0,26^c	16,41	8,57^k	45,06
Colombia 100-6	0,23^d	16,49	10,04^j	11,89
Colombia 70-6	0,27^d	23,99	11,07^l	31,38

* Coeficiente de variacion

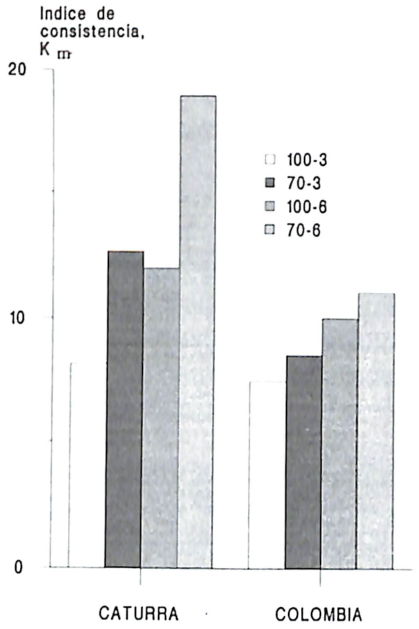

Figura 5. Indice de consistencia (K_m) para mucílago de café variedades Colombia y Caturra.

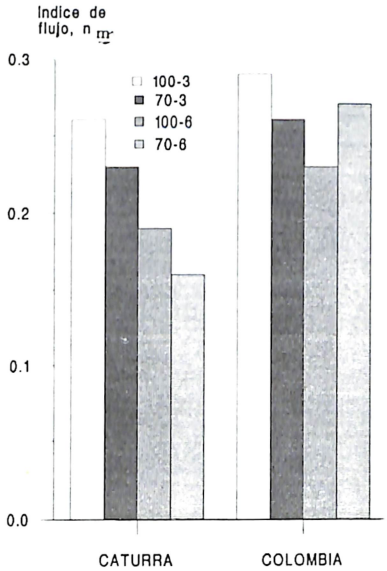

Figura 6. Indice de flujo (n_m) para mucilago de café variedades Colombia y Caturra a diferentes CCM y TPP.

para cada suspensión fué ajustar los datos (torque y velocidad angular) a un modelo apropiado, en este caso el modelo potencial. El coeficiente de determinación fué superior a 0,95 para las suspensiones de café en baba-mucílago (suspensiones CB) y 0,85 para las suspensiones café pergamino húmedo-mucílago (suspensiones CPH).

La máxima velocidad disponible en la cabeza del viscosímetro Brookfield fué 250 rpm. Todas las lecturas de torque fueron superiores al 10% del máximo rango (57490 dinas.cm), lo cual según los fabricantes del equipo asegura la máxima precisión.

El esfuerzo cortante en el borde del disco móvil, en cada velocidad angular, se calculó utilizando la ecuación 7 después de obtener el valor de $dT/d\omega$ a partir del modelo potencial. Se asumió que el comportamiento reológico de las suspensiones se puede explicar por medio del modelo de Ostwald-de Waele, ecuación 3 . El coeficiente de determinación para cada unidad experimental en cada tratamiento (r^2) fué superior a 0,90.

La viscosidad del mucílago se midió utilizando el método de cilindros concentricos[1] (CC) con poca luz o espacio libre entre ellos "narrow gap" y por medio de placas paralelas (PP). En general, como se indica en la Figura 7, ambas técnicas de medición de viscosidad dan valores similares.

El análisis de varianza para cada variedad mostró:

- En suspensiones con variedad Colombia no hay efecto significativo en n_s a niveles de 1% y efecto significativo en K_s al 1%.

- En suspensiones con variedad Caturra hay efecto de los tratamientos en n_s al 1% y no hay efecto de los tratamientos en K_s al 1%.

[1] Este método permite medir la viscosidad de fluidos con alta precisión y por lo tanto se lo considera en este estudio como estándar en la validación de otras metodologías.

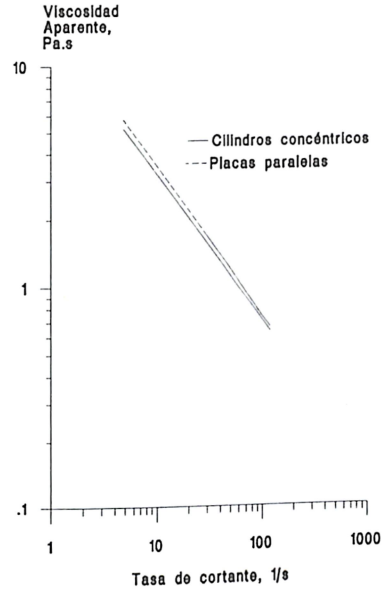

Figura 7. Viscosidad aparente del mucílago medida con cilindros concéntricos (C.C.) y con placas paralelas (P.P.).

Al comparar los valores promedios de K_s y n_s obtenidos en los tratamientos, a través de la prueba de t al 1%, no se observó efecto de la variedad. Similar tendencia se observó en el CCM. En forma similar a lo reportado por Saito (25) se observó efecto significativo de la concentración en la viscosidad aparente (Figura 8). Este efecto es esperado debido a la reducción del espacio libre entre partículas (2,11,12,28).

Los coeficientes de variación para K_s y n_s son altos. Esta respuesta es esperada teniendo en cuenta que la estructura de las suspensiones, la cual cambia aleatoriamente de un ensayo a otro, juega un papel preponderante en la reología de las suspensiones (6).

Predicciones teóricas del comportamiento reológico de las suspensiones CB-mucílago. El modelo de Mooney (20), extendido por Riddle (24) para el caso de suspensiones no-Newtonianas, fué utilizado para obtener una expresión para la viscosidad relativa (η_s/η_m) válida en el rango de concentración considerado en este estudio, ϕ (32,44). Tomando logaritmo en ambos lados de la ecuación «5» e invirtiendo se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\ln(\eta_r)} = \frac{1}{[\eta]\phi} + \frac{K}{[\eta]} \qquad \text{«8»}$$

La viscosidad íntrinseca $[\eta]$ y el parámetro K, mostrados en la Tabla 3, para cada valor de tasa de cortante se pueden obtener graficando $1/\ln(\eta_r)$ vs. $1/\phi$.

Los valores de $[\eta]$ mostrados en la Tabla 3 son superiores al valor propuesto por Einstein (10) para soluciones Newtonianas altamente diluidas y equivale a 2,5. Valores tan altos como 5,5 han sido sugeridos por Riddle (24) para suspensiones no-Newtonianas altamente concentradas. Sólamente uno de los valores de congestionamiento (κ) obtenidos está en el rango definido por Mooney (20), considerando arreglos cúbicos y partículas esfericas. Es evidente el efecto del tamaño, la forma y el

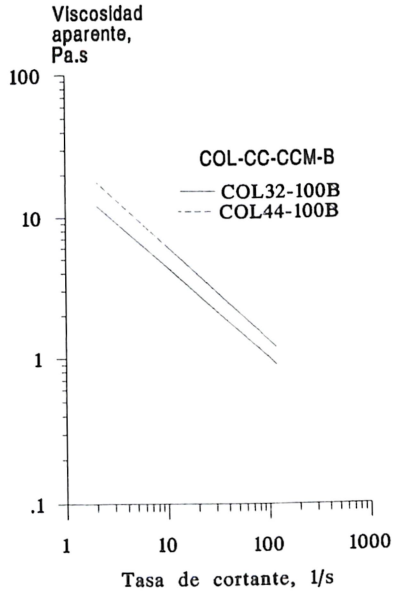

Figura 8. Efecto de la concentración en la viscosidad aparente de suspensiones de café en baba. Variedad Colombia.

TABLA 3. Parámetros [η] and K para suspensiones B-mucílago para el modelo de Mooney.

γ, s^{-1}	[η]	K
10	3,03	-0,093
30	4,18	-0,719
50	4,85	-1,074
70	5,31	-1,303
100	5,81	-1,550

acomodo de las partículas (estructura), el cual es variable durante la agitación de la suspensión. Tendencia similar con partículas esféricas suspendidas en fluído no-Newtoniano fué observada por Riddle (24).

En la Figura 9 se muestra el efecto significativo de la tasa de cortante en la viscosidad relativa, en cada nivel de concentración. Este efecto es importante en los estudios de desmucilaginado mecánico debido a que la concentración de partículas (granos de café) depende de la cantidad de agua adicionada durante el proceso.

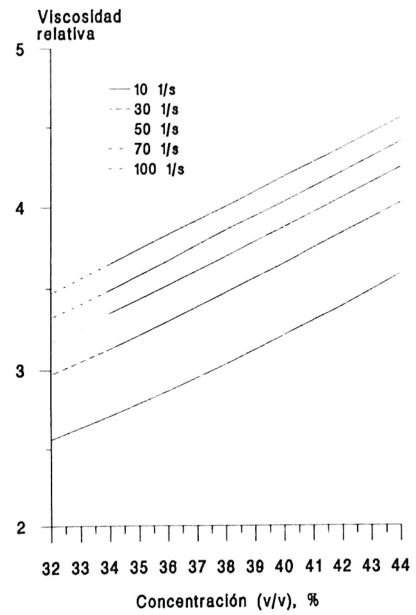

Figura 9. Valores estimados de viscosidad relativa de suspensiones de CB-mucílago.

Se prevee un aumento importante en la viscosidad relativa de las suspensiones mucílago-café, debido a la mayor concentración de partículas, cuando se reduzca el consumo específico de agua. Adicionalmente, debido a que la fase continua de las suspensiones (el mucílago) exhibe un comportamiento altamente "adelgazante", ó sea su viscosidad se reduce en forma notoria cuando la tasa de cortante se incrementa, se prevee un aumento importante de la viscosidad relativa de las suspensiones cuando se realice el proceso con alta tasa de cortante (alta velocidad de rotación del agitador).

El efecto de la concentración de partículas y de la tasa de cortante en el comportamiento reológico de las suspensiones mucílago-cafe, citado anteriormente, afectará el consumo de potencia y la capacidad de remoción de mucílago de un agitador utilizado para la remoción mecánica del mucilago.

Lista de Símbolos

K	Indice de consistencia, $Pa.s^n$
K_m	Indice de consistencia del mucílago, $Pa.s^n$
K_s	Indice de consistencia de la suspensión, $Pa.s^n$
n	Indice de flujo
n_m	Indice de flujo del mucílago
n_s	Indice de flujo de la suspensión
r	Posición radial, m
T	Torque, N.m
γ	Tasa de cortante, s^{-1}
κ	Factor de congestionamiento
η_f	Viscosidad del fluído puro, Pa.s
[η]	Viscosidad íntrinseca
η_r	Viscosidad relativa
η_s	Viscosidad de la suspensión, Pa.s
ϕ	Concentración (% v/v)
ω	Velocidad angular, $radians.s^{-1}$
Δ	Tensor de tasa de cortante
τ	Esfuerzo cortante, Pa

Descripción de las abreviaciones usadas en el texto y en las legendas de las figuras

ó CB	Café despulpado ó en baba
CPH	Café pergamino húmedo
CAT	Variedad Caturra
COL	Variedad Colombia
CC	Concentración, % v/v
CCM	Contenido de cerezas maduras, %
RMM	Removedor mecánico del mucílago
TPP	Tiempo transcurrido entre cosecha e inicio del beneficio, h
u.e.	Unidada Experimental

LITERATURA CITADA

1. ALLEN, G.D.; ROBINSON, C. Measurement of rheological properties of filamentous fermentation broths. Chem. Eng. Sci. (USA) 45:37-48. 1990.

2. BAGNOLD, R.A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proc. R. Soc. London Ser. (Inglaterra) A 225:49-63. 1954.

3. BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; E.N LIGHTFOOT, E.N. Transport phenomena. John Wiley & Sons. New York (USA). 1960.

4. CHARM, S.E. Food Engineering. Westport, Connecticut: The AVI Publishing Company (USA). 1971.

5. CHASE, W.C.; DONATELLY, A.A.; WALKINSHAW, J. Effects of freeness and consistency of hardwood and softwood pulp suspensions. Tappi Journal (USA) May:199-204. 1989.

6. CHENG, D.C.H.; EVANS, F. Phenomenological characterization of the rheological behavior of inelastic thixotropic and antithixotropic fluids. Brit. J. Appl. Phys. (Inglaterra) 16:1599. 1965.

7. CHENG, D.C.H. Further observations on the rheological behavior of dense suspensions. Powder Tech. (USA) 37:255-273. 1984.

8. COLLINS, E.A.; HOFFMAN, D.J.; SONI, P.L. Rheology of PVC dispersions. 1. Effect of size and particle size distributions. J. Colloid Interface Sci. (USA) 71:21- 29. 1979.

9. CROSS, M.M.; KAYE, A. Techniques for the viscometry and suspensions. Polymer Eng. and Sci. (USA) 26 (2):121-126. 1986.

10. EINSTEIN, A. A new consideration of molecular dimensions. Ann. Physik (Alemania) 19:289. 1906.

11. FRANKEL, N.A.; ACRIVOS, A. On the viscosity of a concentrated suspensions of solid spheres. Chem. Eng. Sci. (USA) 22: 847-853. 1967.

12. GOTO, S; NAGAZONE, H; KATO, H. The flow behavior of fiber suspensions in Newtonian polymer solutions. II. Capillary flow. Rheologica Acta (Alemania). 25:119-129. 1986.

13. HAMMOND, M.T. A new concept in viscometry. Measurement and Control (USA) August:294-296. 1977.

14. HOGG, V.R.; LEDOLTER, J. Engineering Statistics. Macmillan Publishing Company. New York (USA). 1977.

15. JARZEBSKI, G.J. On the effective viscosity of pseudoplastic suspensions. Rheol. Acta (Alemania) 20:280-287. 1981.

16. JEFFRY, D.J.; ACRIVOS, A. The rheological properties of suspensions of rigid particles. AIChE Journal (USA) 22 (3): 417 - 432. 1976.

17. KITANO, T; KATAOKA, K.; SHIROTA, T. An empirical equation of the relative viscosity of polymer melts filled with various inorganic fillers. Rheol. Acta (Alemania) 20:207-209. 1981.

18. MANOHAR, B.; RAMAKRISHMA, R.; RAMTEKE, R. S. Effect of pectin content on flow properties of mango pulp concentrates. Journal of Texture Studies (USA) 21: 179-190. 1990.

19. METZNER, A.B. Rheology of suspensions in polymeric liquids. Journal of rheology (USA) 29(6):739-775. 1985.

20. MOONEY, M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. J. Colloid Sci. (USA) 6:162-170.1951.

21. OLIVEROS, C.E. Analysis of mechanical demucilaging of depulped coffee beans. University of Wisconsin-Madison Madison, Wisconsin (USA), 1993. 199 p. (Tésis de Ph.D.).

22. PORDESIMO, L.O.; ZURITZ, C.A.; Mangalore, G.S. Rheological behaviour of coarse solid-liquid food mixtures. ASAE(USA), Paper 89-6404. 1989.

23. RAO, M.A. Rheology of liquid foods-A review. Journal of Texture Studies (USA) 8:135-167. 1977.

24. RIDDLE, M.J. The viscosity of suspensions of rigid spherical particles in viscoelastic fluids. University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin (USA), 1977. 200 p. (Tésis de Ph.D.).

25. SAITO, N. Concentration dependence of the viscosity of high polymer solutions. I. J. Phys. Soc.(Japón) 5:4-8. 1950.

26. SHAH, S.N. Rheological properties of hydroxypropyl guar (HPG) slurries. AICHE Journal (USA) 39(2):2-207-214. 1993.

27. TANGLERTPAIBULB, T.; RAO, M.A. Rheological properties of fomato concentrates as affected by particle size and methods of concentration. Journal of Food Science (USA)52(1): 141-145. 1987.

28. THOMAS, D.G. Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles. J. Colloid Sci. (USA) 29:267-277. 1965.

29. TIU, C.; BOGER, D.V. Complete rheological characterization of time-dependent food products. Journal of Texture Studies (USA) 5:329-338. 1974.

30. YAO, S.; MATSUMOTO, T. New type of equation for the relation between viscosity and particle content in suspensions. J. Non-Newt. Fluid Mech. (USA) 25:197-207. 1987.