UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DEL MUCÍLAGO DEL CAFÉ (*Coffea arabica* L.) LIOFILIZADO.

TESIS

Para optar el título de:

INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Presentado por:

VLADIMIR ANTONIO REATEGUI ISLA

PROMOCIÓN I-2009

Tingo María – PERÚ

2015

DEDICATORIA

Dedicado a mi querida madre María Elena, gracias a tus largas jornadas de trabajo, tu desvelo y esfuerzo me permitió llegar a la universidad y culminar mi carrera profesional, estaré eternamente agradecido por todo lo que hiciste por mí.

AGRADECIMIENTO

- Expreso mi agradecimiento a Dios, quien hizo posible que pudiera terminar uno de mis proyectos, por darme fuerza de voluntad en los momentos de dificultad, y por haberme permitido conocer a personas maravillosas que me ayudaron de alguna manera en mi superación profesional.

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, mi alma mater y a los docentes de la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias por haber contribuido en mi formación profesional.

- Al Ing. Caleb Leandro Laguna, por apoyarme, asesorarme y compartir sus conocimientos, muchas gracias.

- A todas aquellas personas que me apoyaron para poder culminar esta etapa.

RESUMEN

El trabajo estudia la extracción, liofilización y caracterización reológica del mucílago del café. El comportamiento reológico del mucílago liofilizado y reconstituido, fueron estudiados a temperaturas de 5, 25, 40 y 60°C y concentraciones de 7, 10, 20 y 30%. Las determinaciones reológicas se realizaron a velocidades de deformaciones de 5 a 200 s^{-1}. De acuerdo a los resultados, analizados bajo la Ley de la Potencia, el mucílago de café liofilizado y reconstituido presentó un comportamiento no Newtoniano pseudoplástico, es decir, su viscosidad aparente disminuye conforme se incrementa la velocidad de deformación. Las soluciones evaluadas presentaron valores del índice de consistencia (m) de 0,282 $Pa.s^n$ a 346,812 $Pa.s^n$ y el valor del índice de flujo (η) varió 0,44 a 0,86. La concentración mostró un marcado efecto sobre las propiedades de flujo del material, m; se incrementa conforme la concentración aumenta. En cuanto al valor del η, éste disminuye conforme la concentración aumenta. El fenómeno de la pseudoplasticidad fue más evidente a mayor concentración, el cual es una situación típica en las soluciones poliméricas. El valor del índice de consistencia fue constante en el rango de temperatura estudiado, pero no en las concentraciones estudiadas. El valor de η varió estadísticamente con la Temperatura y concentración.

ÍNDICE GENERAL

Página

I. INTRODUCCIÓN 1

II. REVISIÓN DE LITERATURA 3

2.1. Antecedentes 3

2.2. Generalidades del producto café 5

2.2.1. Importancia 5

2.2.2. Morfología, botánica y composición química 8

2.2.3. Industrialización 9

2.3. Generalidades del mucílago del café 12

2.4. El mucílago de café y su posible utilización como solución hidrocoloidal 16

2.5 Conceptos generales relacionados con la reología 20

2.5.1 Viscosidad.....22

2.5.2 Factores que afectan la viscosidad.....31

2.6 Comportamiento reológico de algunos productos alimenticios.....32

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....36

3.1. Lugar de ejecución..... 36

3.2. Materia prima..... 36

3.3 Equipos, materiales y reactivos.....36

3.3.1 . Equipos y materiales de procesamiento.....36

3.3.2. Materiales de laboratorio..... 37

3.3.3. Reactivos y soluciones 38

3.4 Método de análisis……..38

3.5. Metodología experimental 39

3.5.1. Preparación del material……..……39

3.5.2. Extracción y liofilizado de del mucílago de café 40

3.5.3. Caracterización del mucílago natural y liofilizado .....….42

3.5.4. Evaluación reológica 42

3.5.5. Medición reométrica 44

3.6. Análisis estadístico 45

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 46

4.1. Caracteristicas fisicoquímicas del mucílago de café 46

4.2. Curva de secado 48

4.3. Caracteristicas fisicoquímicas del mucílago de café liofilizado 50

4.4.Evaluacion reológica…...…….....…..50

4.5 Viscosidad aparente o indice de consistencia m.……..…..…..……58

4.5.1. Efecto de la temperatura sobre m……..……...58

4.5.2. Efecto de la concentración sobre m…….....61

4.6. Indice de comportamiento de flujo η 61

4.6.1. Efecto de la temperatura sobre η……..….61

4.6.2. Efecto de la concentración sobre η……..….62

V. CONCLUSIONES 64

VI. RECOMENDACIONES 65

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67

ANEXO 72

I. INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de beneficio húmedo del café, los residuos y subproductos que se obtienen generan contaminación ambiental, por este motivo, en el pasado se buscó utilizarlos como materia prima para la producción de piensos, bebidas, vinagre, biogás, pectina, enzimas pépticas, y abono. El uso de la pulpa de café fresca o procesada ha sido tema de muchos estudios teniendo como resultado que los subproductos provenientes del beneficio húmedo del café pueden usarse de varias maneras, algunas de las cuales orientadas a la industria alimentaria.

El mucílago representa el 22% en peso del café despulpado y el 13% del peso del grano maduro. Contribuye con el 28% de la contaminación generada por el beneficio húmedo del café, lo que equivale en promedio a una demanda química de oxígeno (DQO) de 120 000 mg/L. Así mismo, se dice que el beneficio de un kilogramo de café equivale a la contaminación de 5,6 personas adultas en el día.

El mucílago del café constituye hoy en día un residuo industrial del cual se pueden obtener: pectinas sin refinar, en forma de gel soluble termorreversible; azúcares naturales del fruto del café, procedentes del agua del despulpe y compuestos antioxidantes y flavonoides, estos son principalmente los compuestos de antocianina de color del fruto, pero también contienen polifenólicos, como ácidos clorogénicos. Estas sustancias,

presentes en el mucilago pueden combinarse de varias maneras para elaborarse una serie de aditivos alimenticios, como el caso de un estabilizante para homogenizar bebidas y alimentos líquidos y pastosos, pero para llegar a ello se requiere de operaciones unitarias de ingeniería de los alimentos, siendo esencial el conocimiento de la viscosidad y las propiedades de flujo, los cuales cambian considerablemente, razón necesaria para comprender todos los procesos del flujo de fluidos.

El presente trabajo está orientado a la extracción, liofilización y caracterización reológica del mucílago del café, subproducto proveniente del beneficiado húmedo y uno de los principales agentes de contaminación ambiental, con el fin de proponer una alternativa de conversión a un producto con valor agregado para uso industrial, planteándose los siguientes objetivos:

- Evaluar las características fisicoquímicas del mucílago de café fresco.
- Liofilizar el mucilago de café y evaluar sus características fisicoquímicas y propiedades reológicas.
- Evaluar la respuesta reológica del material en condiciones de flujo de cizalla simple en función de la temperatura.
- Evaluar la respuesta reológica del material en condiciones de flujo de cizalla simple en función de la concentración.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

SALAZAR *et al.* (1994) en un estudio morfológico, anatómico y estructural del fruto de café (*C. arabica*) en el mesocarpio, constituyente conformado por material mucilaginoso, aparte de la presencia de haces vasculares inmersos y dispuestos circularmente, encontraron que está conformado por xilema en el interior y floema al exterior los cuales surten de agua y compuestos sintetizados respectivamente, observaron que entre la parte más externa del mesocarpio y el límite con el endocarpio se encuentra un tejido formado por tres capas de células en columna afirmándose que sea el origen de la capa mucilaginosa que recubre la semilla recién cosechada.

OLIVEROS y GUNASEKARAN (1994), en el estudio reológico del mucílago del café bajo las suspensiones mucílago en “baba” y mucílago café pergamino húmedo; encontraron que este exudado natural, proveniente de un desmucilaginador mecánico, es un fluido con sustancias de alto peso molecular y exhibe un comportamiento altamente pseudoplástico. Bajo las variables estudiadas de TPP (tiempo transcurrido entre cosecha e inicio del beneficio en horas) y CCM (contenido de cerezas maduras en %) en las variedades Caturra y Colombia; observaron un efecto significativo en el esfuerzo cortante. Los valores más altos del esfuerzo cortante se obtuvieron con el máximo TPP y el mínimo CCM catalogando a que se debe a las

diferencias; en la composición química del mucílago y a la mayor concentración de taninos. Atribuyen que el efecto significativo de la adición de agua es importante en los estudios de desmucilaginado mecánico ya que la concentración de partículas (granos de café) depende de la cantidad de agua adicionada durante el proceso, por lo tanto, la viscosidad relativa de las suspensiones mucílago-café aumenta y va siendo mayor el aumento cuando la tasa de corte es alto (alta velocidad de rotación del agitador).

El efecto de la temperatura sobre el comportamiento de flujo de los alimentos fluidos puede ser descrito por la ecuación de Arrhenius (RAO *et al.*, 1984; SARAVACOS, 1970; RAO y RIZVI, 1985; LEWIS, 1987). En cuanto al efecto de la concentración, generalmente el valor de k aumenta con el incremento de la concentración, la magnitud de η aumenta con la dilución. Este tipo de comportamiento fue observado en el jugo concentrado de naranja (RAO *et al.*, 1984) y jugo de maracuyá (VITALI *et al.*, 1974; CERVANTES, 1995).

De igual forma, se han realizado estudios de comportamiento de flujo en hidrocoloides, materiales poliméricos solubles o dispersables en agua de amplia aplicación en la industria alimenticia. Estos materiales son comúnmente usados para incrementar la viscosidad u obtener consistencia en los alimentos formulados. Algunos polímeros en solución diluida presentan comportamiento Newtoniano, pero cuando la concentración se incrementa, la viscosidad rápidamente se eleva y pasan a un comportamiento no Newtoniano, algunos forman geles relativamente a bajas

concentraciones. Ejemplos de estos hidrocoloides son la goma guar, arábica, tragacanto, agar, pectinas, carragenina, celulosa y la goma de algarrobo.

Muy pocos trabajos se han llevado a cabo acerca del comportamiento reológico del mucílago de café. OLIVEROS y GUNASEKARAN (1994), reportan este material como un fluido altamente pseudoplástico, que se explica por el efecto combinado de destrucción de estructuras, el comportamiento reológico del material es afectado significativamente por la concentración de partículas donde el índice k aumenta significativamente cuando la concentración se incrementa.

2.2. Generalidades del café.

2.2.1. Importancia

Durante el ciclo cafetalero de la última década, la producción obtenida a nivel nacional ascendió a muchos millones de quintales, superior en 6% a la obtenida durante la década anterior. El volumen de exportación en el citado período fue de 3 257 744 sacos de 60 kg (78,4% del total de la producción) hacia Estados Unidos, Japón, Corea, Rusia, Israel, Canadá y países miembros de la Unión Europea representando así, un monto de 678 millones de dólares (VALDÉS, 1995).

La caficultura genera empleos productivos para un gran número de pobladores peruanos, principalmente para aquellos que habitan en zonas tropicales y templadas de geografía muy accidentada, lo que dificulta el uso de estas tierras para otro tipo de cultivos.

La tecnología del beneficiado del café comprende el proceso industrial que transforma en producto comercial, el fruto del café a partir del suministro hecho por los cafeticultores (DIAZ, 1993). En tanto que es la primera etapa de la transformación primaria del café, el beneficiado húmedo se encuentra directamente relacionado e influido por la estacionalidad y características de la producción de café.

Su importancia radica en que por un lado, permite pasar un producto muy perecedero, la cereza, a uno que se puede almacenar hasta por 12 meses, el pergamino; mientras que por el otro, esta etapa tiene una influencia decisiva en la calidad final del grano (SANTOYO *et al.,* 1994).

En Latinoamérica, cerca del 90% de la producción de café se procesa por la vía húmeda, lo que conlleva a un tipo de café oro que cumple todos los requisitos de calidad. Sin embargo, este proceso presenta una gran problemática en torno a los desechos que genera, fundamentalmente porque la cáscara o pulpa y el mesocarpio o mucílago que se elimina del fruto, contamina las aguas que se emplean en las operaciones de despulpado y lavado respectivamente. Estas aguas residuales o de desechos son la causa principal de contaminación de los ríos, particularmente de las zonas cafetaleras (JACQUET, 1993).

La contaminación del agua por los beneficios húmedos de café es un problema que ha crecido a la par que aumentan los volúmenes cosechados y la demanda de agua en las ciudades ubicadas en las zonas cafetaleras o cercanas a ellas. Se estima que en promedio se usan 5,3 litros de agua por kilogramo de café, de modo que, sólo con una producción,

calculada en 600 mil toneladas para la cosecha, se están degradando 3,5 millones de metros cúbicos por año (VASQUEZ, 1996). En un estudio realizado en los beneficios se observó que el consumo de agua varía en función de la capacidad del beneficio. Así para un beneficio de 60 quintales por día (15 toneladas por día de café cereza), por cada kilogramo de cereza se gastan 7,87 litros de agua. En cambio en un beneficio de 300 quintales por día de café cereza se gastan 13,24 litros de agua por kilogramo de cereza (ESPINOSA, 1993).

La necesidad de reducir la contaminación a niveles aceptables para la protección del ambiente, constituye una prioridad de los países productores. Es indiscutible que esta agroindustria observa una demanda tecnológica urgente, debido a que ha preservado su diseño bajo consideraciones de tecnología tradicional con pocas innovaciones (JAQUET, 1994).

Teniendo en cuenta las circunstancias actuales de las zonas cafetaleras del mundo, se está desarrollando una nueva tendencia tecnológica en el proceso de beneficio húmedo del café, soportada fundamentalmente en la eliminación del agua como medio de transporte de materia, racionalización del uso del agua en la operación del lavado y utilización de los subproductos como materia para la generación de productos con valor agregado.

2.2.2. Morfología, botánica y composición química

Al fruto del cafeto se le conoce botánicamente como una drupa sincárpica bicarpelar, llamada comúnmente "cereza". Morfológicamente es ovoidea, subglobulosa, generalmente roja si está madura (LEÓN, 1981). Se compone de las partes que se muestran en el Cuadro 1 (DÍAZ, 1993).

El pericarpio es la cubierta o película externa del fruto, conocida vulgarmente como piel, cascara o pellejo. En estado inmaduro es de color verde y en estado maduro es rojo o amarillo. Cuando se seca es de color café castaño o negro. Presenta colorantes naturales que determinan la madurez. El mesocarpio es el tejido cantoso o mucilaginoso ubicado entre el epicarpio. Se caracteriza por su riqueza en sustancias pépticas y azúcares. Es conocido como mucílago o liaba. La pulpa del café la forman el epicarpio y parte del mesocarpio. Representa el 28,7% del peso total del fruto en base seca y el mucílago el 4,9%. El perispermo o endospermo es la película plateada de tejido delgado que cubre al grano del café y corresponde a la cubierta o tegumento seminal, que es la membrana que cubría la cavidad interna del ovario. Es de color gris plateado, rojizo o negro, según el resultado del beneficio. Endocarpio se le conoce como pergamino, pajilla o cascabillo, capa coriácea de tejido lignificado que recubre y protege el endospermo. De color amarillo pajizo, representa el 11,97% del peso total del fruto. El endospermo es el grano desprovisto de todas sus cubiertas, se le conoce también como café verde u oro. Está formado por el endospermo propiamente, cotiledón y embrión (planta en estado latente). Representa el 55,4% del peso del fruto (DÍAZ, 1993).

Cuadro 1. Principales partes estructurales del fruto de café.

Nombre técnico	Nombre común
Pericarpio	Cáscara
Mesocarpio	Mucílago
Endocarpio	Cascarilla o pajilla
Espermodermo	Película plateada
Endospermo+Cotiledón+Embrión	Café verde u oro

Fuente: DÍAZ, 1993

Bioquímicamente, por la presencia de azúcares, proteínas y grasa; la pulpa y el mucílago constituyen un excelente medio de cultivo para microorganismos, lo que explica el rápido inicio del proceso de fermentación de la cereza madura y del grano despulpado en el beneficiado. Por otro lado, las características de baja humedad y alto contenido de fibra de la cascarilla, permite que ésta se haga un excelente protector del grano, de modo que el café pergamino llega a reunir las características para un almacenamiento más o menos prolongado (DÍAZ, 1993).

2.2.3. Industrialización

Técnicamente, el problema básico en el beneficiado del café consiste en el cómo quitar las cubiertas de la cereza en la forma más eficiente sin afectar la calidad, obteniendo la mayor parte posible de café verde u oro comercializable. Dos procedimientos se utilizan para lograr este fin: la "vía seca" y la "vía húmeda". La vía seca es utilizada principalmente en Brasil y consta de las siguientes etapas: la cosecha de las cerezas, el secado (comúnmente al sol), el morteado, la clasificación y el ensacado. Se obtiene

café "natural" de los denominados café arábicas brasileños y las robustas. La vía húmeda, es un procedimiento para la obtención de café "lavado" o "suave", comúnmente usado en países latinos. Se divide en dos etapas: el beneficio que va desde la recepción del café cereza hasta la obtención de café pergamino y la fase conocida como beneficio seco, que se inicia con la limpieza del café pergamino y concluye con el café oro lavado, debidamente clasificado y envasado (DÍAZ, 1993; SANTOYO, 1994).

Para la investigación, particularmente interesa el procesamiento de café por beneficiado húmedo ya que se lleva a cabo la operación de desmucilaginado cuyo objetivo es separar la capa mucilaginosa del fruto. Debido a la reciente introducción de maquinaria y equipo a los beneficios del país con el fin de optimizar el procesamiento y reducir la contaminación de desechos y estos aprovecharlos de manera directa para varios fines.

Las empresas dedicadas a la venta, mantenimiento, servicio y diseño de maquinaria para el mejoramiento de la tecnología del procesamiento de café, desarrollaron una forma de solucionar técnicamente el problema de la eliminación del mucílago del fruto, en un corto periodo de tiempo sin recurrir a los procesos de fermentación y el eliminar prácticamente el uso de agua, mediante el desmucilaginador mecánico ascendente, esta máquina trabaja en conjunto con una despulpadora cónica vertical, ambos se encuentran integrados en el denominado módulo Penagos; consta de un desmucilaginador con rotor tipo CENICAFE III, con barras cortas con desfase de 45° entre cada juego, y dos tronillos sinfines cortos, colocados en los extremos, para impulsar el café en baba desde la tolva de recibo a la cámara

de desmucilaginado y para descargarlo en la parte superior (flujo de café ascendente). Se cuentan con dos bombas (movidas por un motor de 0,5 HP) para alimentar agua limpia en la zona de lavado, localizada en la descarga, y el agua proveniente del tanque de trabajo (relativamente limpia). El desmucilaginador a 1100 rpm (inicialmente) es accionado por un motor trifásico de 6,6 HP. El café es despulpado por tres máquinas con capacidad cada una de 2000 kg/h de café en cereza (6000 kg en total), la despulpadora DV-255c no requiere agua para su funcionamiento, no trilla ni bota grano bueno en la pulpa, por su diseño cónico helicoidal despulpa todos los tamaños de grano y está provisto de un sistema de protección contra objetos duros para evitar daños internos en la máquina, en la canica o rolo dentado. El café en baba es zarandeado antes de entrar al desmucilaginador. Con relación al equipo y al desempeño, se tiene las siguientes observaciones:

- El equipo presenta características muy atractivas, tales como: gran capacidad, bajo consumo específico de potencia, excelente presentación del café procesado (buena remoción de mucílago) y excelente separación del mucílago desprendido: no se necesita canal semi surgido y bajo consumo específico de agua.

- Debido al bajo consumo específico de agua (1L/kg de café pergamino seco), según los fabricantes, el mucílago obtenido del equipo es altamente viscoso lo cual facilitaría el manejo de esta carga contaminante utilizando a la pulpa como filtro (TÉCNICA CENICAFE ANSEMA).

2.3. Generalidades del mucílago de café

El mucilago de café como polisacárido, pertenece al grupo de los exudados vegetales, siendo un material hidrocoloidal. Se puede encontrar cierta paridad de esto al compararlo con otros materiales coloidales o gomas que guardan cierta semejanza con respecto a la estructura química. Como ejemplo se encuentra la goma de algarrobo, polisacárido natural extraído de la semilla del árbol de algarrobo (*Ceratania siliqua* L). Este polisacárido se encuentra localizado en el endospermo como fuente de nutrientes para la germinación de la semilla. La estructura molecular de la goma consta de una cadena lineal de unidades de α-D- manopiranosil enlazadas a las unidades 1,4-α-D- galactopiranosil que se encuentran en posición lateral de la cadena principal α-D- galactopiranosil se localiza en el enlace 1-6 de la cadena principal. La propiedad principal de éste polisacárido es su alta viscosidad que presenta en soluciones acuosa dentro de un extenso rango de temperaturas y pH. Estas propiedades son una razón principal para la utilización de la goma en la industria alimentaria como agente espesante, estabilizante, dispersante, etc., por ejemplo en helados de crema, quesos y aderezos. Otra goma empleada en la industria alimentaria es la goma de mesquite, goma natural proveniente de la especie Prosopis. Se ubica en el endospermo de la semilla, es una exudación de grano. Como polisacárido principal contiene galactomanosa que es soluble en agua, empleado en la industria alimentaria como agente espesante y gelificante y también como estabilizador. La galactomanosa está constituido de polímeros neutros con una cadena principal de manosa en el enlace (1-4), ésta cadena posee

unidades de galactosa irregularmente distribuidas a lo largo de la cadena de manosa. Considerando que esta goma guarda una composición similar a la goma de algarrobo y la goma guar, parece ser que la goma de mesquite puede ser usada como agente espesante/gelificante en diversos productos alimenticios.

El mucílago de café se considera un material constituido de grandes cantidades de polisacáridos. Lo cual hace pensar en la posibilidad de que su uso sea industrial. Esto último nos deja una pauta que para la generación de nuevos productos se requiere aún del desarrollo de una serie de investigaciones para la generación de más conocimientos.

El método usado para procesar el fruto de café no ha sufrido mayor cambio a través de los años. De otra parte, poca atención se ha prestado en el pasado a la utilización de los subproductos derivados del procesamiento del fruto. Recientemente, debido a problemas tales como la eliminación de estos subproductos y la contaminación ambiental, estos materiales han recibido mayor atención que en el pasado. Es obvio que para utilizar estos subproductos más eficientemente se necesita una etapa preliminar e importante de investigación sobre su potencial como fuente de compuestos importantes que puedan ser utilizados para diferentes fines.

El mucílago está localizado entre la pulpa y la cáscara del grano de café y representa alrededor del 5% del peso seco de éste. Constituye una capa de aproximadamente 0,5 a 2 mm de espesor que está fuertemente adherida a la cáscara del grano de café. Desde el punto de vista físico, el

mucilago es un sistema coloidal líquido, liofílico, siendo por lo tanto un hidrogel (BRAHAM y BRESSANI, 1978; SIVETZ, 1979).

La cantidad de mucílago junto con su contenido de humedad varía de acuerdo a la variedad, el estado de desarrollo y las condiciones ambientales (BRAHAM y BRESSANI, 1978). Sin embargo, no varía en lo que respecta a la altitud en la que se desarrolla el fruto (MENCHU y ROLZ, 1973).

En composición química, el mucílago contiene agua, pectinas, azúcares y ácidos orgánicos (CLIFFORD y WILLSON 1985; CLARKE, 1987). Las sustancias pécticas totales pueden alcanzar valores de hasta 39%, con un valor promedio de 35,8%. La mayoría de los azúcares totales está en la forma reductora (BRAHAM y BRESSANI, 1978). Nadal (1959) citado por BRAHAM Y BRESSANI (1978) reporta que este material contiene 84,2% de agua, 8,9% de proteína, 4,1% de azúcar, 0,91% de ácido péctico y 0,7% de ceniza. En contenido de cenizas, aparentemente no contiene taninos ni cafeína, (BRAHAM y BRESSANI, 1978; AGUIRRE, 1966) pero contiene enzimas pectinolíticas que hidrolizan los constituyentes pécticos de este material y su actividad parece ser muy importante en la fermentación que ocurre durante el procesamiento del café (BRAHAM y BRESSANI, 1978).

Por otro lado, SIVETZ (1979) también reporta que este mucílago contiene cerca del 85% de humedad y 15% de sólidos. Los sólidos están constituidos de un 80% de ácidos pectínicos (12% del mucílago) y 20% de azúcares (3% del mucílago).

Durante la maduración del grano de café, el pectato de calcio, localizado en la laminilla media y la protopectina de la pared celular son convertidos en pectinas. Esta transformación o hidrólisis de las protopectinas resulta de la desintegración de la pared celular dejando un plasma celular libre. En este plasma, además de pectinas, se encuentran azúcares y ácidos orgánicos, derivados del metabolismo y la conversión del almidón en azúcares (Carbonell y Villanova, 1952; citado por BRAHAM y BRESSANI, 1978). También, durante el desarrollo de la fruta, el ácido carboxílico se forma a partir del azúcar (alcohol) por oxidación. El ácido anhídrido se forma por la liberación de una molécula de agua, después dos moléculas de anhídrido forman el dímero con la liberación de una molécula de agua. El número se forma por una reacción similar y así hasta que se forman varios cientos de moléculas de anhídrido, las cuales se combinan y forman cadenas protopectínicas. Además de los ácidos pectínicos y azúcares también se forman diversas enzimas, tales como: protopectinasas, pectinasas, pectinesterasas y pectasas. Si no se corta el fruto y permanece intacto hasta que caiga el árbol y se seque, estas enzimas causan la fermentación del mucílago hasta desdoblarse gradualmente a sus componentes más simples a partir de los cuales se formó. Esto tiene lugar dentro de la pulpa hasta que el mucílago desaparece como tal, entonces es transformado de una condición de hidrogel a hidrosol (SIVETZ, 1979). Perrier citado por LEÓN (1981) señala la presencia de una pectasa (pectosinasa) capaz de producir la pectósis y provocar la desintegración del mesocarpio (mucílago). Sin

embargo, se cree que ellas no están en el mucílago, sino que se originan en el pericarpio o endospermo a través de un proceso de osmosis y difusión; estas enzimas también catalizan solamente la eliminación de los grupos metoxilo de la molécula de la pectina, sin tener acción alguna sobre la unión glucosídica del ácido poligalacturónico (ácido péptico). Por consiguiente, las enzimas que están presentes en el mucílago pertenecen principalmente al grupo de las pectimetilesterasas.

Se ha encontrado también que el pH del mucílago varía de acuerdo con el grado de madurez, así como con el método usado para el procesamiento de café (BRAHAM y BRESSANI, 1978). El procesamiento manual de los granos de café maduro resulta en un pH del mucilago de cerca de 5,6 a 5,7, mientras que el procesamiento mecánico que usa agua con un pH de 6,4 resulta en un material con valores de pH de 5,0 a 5,2, Las variaciones en valores del pH deben tener una influencia significativa sobre la actividad de las enzimas en el proceso de fermentación, así como sobre los componentes de este subproducto (BRAHAM y BRESSANI, 1978; CLIFFORD y WILLSON 1985).

2.4. El mucilago de café y su posible utilización como solución hidrocoloidal

Los hidrocoloides, coloides hidrofílicos o comúnmente conocidos como gomas se caracterizan por modificar las propiedades funcionales de los sistemas alimenticios donde son formulados (IGOE, 1982). Los hidrocoloides son usualmente clasificados como polisacáridos solubles en agua.

Principalmente son usados en la industria de alimentos debido a que poseen características que los hacen ser preferentes como es su gran disponibilidad, bajo costo y no tóxicos. En la industria no alimentaria su aplicación radica en que presentan una característica que es el bajo costo con respecto a los polímeros sintéticos. Todas las aplicaciones de los hidrocoloides dependen de las propiedades funcionales que proporcionen sus enormes moléculas en varios estados de hidratación, principalmente las propiedades que imparten a soluciones y geles (WHISTLER, 1993).

En términos químicos, los hidrocoloides son moléculas hidrofóbicas o hidrofílicas de alto peso molecular, con propiedades coloidales que producen geles o suspensiones o soluciones altamente viscosas en bajas concentraciones (WHISTLER, 1993). Se clasifican básicamente en tres categorías: exudados vegetales (goma arábica, karaya y tragacanta), extracto de algas marinas (agar, furceralana, carragenina y algina) y gomas de semillas (goma guar, de algarrobo y tara) los cuales todos ellos son comúnmente usados en la industria alimenticia. También, los hidrocoloides son conocidos como aportadores o constructores de viscosidad (IGOE, 1982). Sus características están basadas en la capacidad de desarrollar o producir viscosidad cuando se solubilizan en medios acuosos. Debido a esta capacidad, presentan una diversidad de funciones sobre los alimentos, utilizadas para diferentes fines, como postres congelados o refrigerados, confitería, rellenos, salsas, productos lácteos, etc. (IGOE, 1982).

Por ser materiales hidrofílicos afectan las condiciones de proceso y el comportamiento sobre una gran variedad de productos alimenticios en

diversas formas. Las funciones importantes de los hidrocoloides en los productos alimentarios son: retención de agua, reducción de los volúmenes de evaporación, disminución de los efectos de congelación, modificación durante la formación de cristales de hielo, regulación de las propiedades reológicas o viscosidad, gelificantes, espesantes, ligadores, coberturas y suspensores (IGOE, 1982).

Cada hidrocoloide posee propiedades especiales reflejados de acuerdo a su estructura molecular individual (WHISTLER, 1993). Las propiedades reológicas (como el cambio de la viscosidad y efecto de cizalla), formación de gel y la capacidad de emulsificación son parámetros usados para determinar la efectividad del hidrocoloide en cierta aplicación (Cuadro 2).

Cuadro 2. Función de los polisacáridos en productos alimenticios.

Función	Aplicaciones
Agente recubridor	Confitería
Emulsificante	Aderezos y bebidas carbonatadas
Agente gelificante	Pudines y postres
Agente de suspensión	Leches de chocolate
Agente espesante	Salsas, mermelada

Fuente: MEDINA, 1997

Debido a que las propiedades de solución dependen de la estructura molecular del hidrocoloide y cada hidrocoloide posee una conformación

estructural particular, su aplicación puede resultar particular en determinados sistemas alimenticios.

La aplicabilidad de los hidrocoloides en cualquier alimento, se consigue desarrollando mezclas de diferentes gomas con el fin de generar determinadas propiedades funcionales afines al alimento en cuestión, es decir, las propiedades de solución de una goma pueden a menudo ser modificadas por medio de interacciones con otras gomas.

Estas funcionalidades son primordialmente comportamiento reológico, solubilidad, características gelificantes, reactividad, etc. (IGOE, 1982).

Los compuestos bioquímicos que se encuentran en el fruto del café principalmente son cenizas y minerales, proteína, lípidos y carbohidratos. Respecto a los carbohidratos, los constituyentes más abundantes son los polisacáridos así como mono, di y oligosacáridos pero en menor cantidad. CLIFFORD y WILLSON (1985) reportan que los granos de café tanto la variedad Robusta y Arábica el 38-48% lo constituyen los polisacáridos. De igual manera, BRADBURY y HALLIDAY (1990) en los granos de ambas especies, encontraron que el porcentaje de polisacáridos en base seca fue del 48%. Principalmente los polisacáridos que constituyen los granos de café son arabinogalactosa, manosa y celulosa. La estructura química que guarda la arabinogalactosa es su presencia del enlace p 1-3 ligada a la cadena principal de la galactosa con 2 unidades laterales de Ara-pl-3-Gal-, La manosa muestra ser un polímero lineal de enlace p1-4 de peso molecular relativamente y grado de sustitución de cadenas laterales bajo. La

celulosa se constituye de cadenas de homoglucosa con enlace p1-4 la cuál varía en longitud y cristalinidad. Otro polisacárido de relevancia presente en estos granos es la hemicelulosa, componente más dominante en la pared celular primaria y secundaria (CLIFFORD y WILLSON 1985).

La pectina es también considerada un compuesto de constitución polisacárida (35,8% de peso en el fruto) (BRAHAM y BRESSANI, 1978). En el grano de café se piensa que sea una mezcla y/o combinación química de tres polisacáridos: l) β 1-3 galactosa lineal; 2) arabinosa de cadena corta con unidades de arabinofuranosa, algunos con enlace β 1-3 y otros con α 1-5 y 3) el componente mayor, un polisacárido de alto peso molecular constituido de bloques de α 1-4 galacturanosa unidos por dos unidades de α 1-2 ramnopiranosa. Las pectinas constituyen entre el 1 y 4% la pared celular localizándose mayormente en ésta y adyacente a la laminilla media. En el grano se encuentra del 0,8 al 3% (CLIFFORD y WILLSON 1985). Los polisacáridos de la pectina retiene agua en forma de gel y la composición química llega a variar esta propiedad, estos polisacáridos son extremadamente importantes porque llevan a cabo cambios sobre la naturaleza física de la pared celular el cuál esta se precede de una expansión.

2.5. Conceptos generales relacionados con la Reología

Los alimentos, además de ofrecer un olor, un color y un sabor característico, exhiben determinado comportamiento mecánico: reaccionan de un cierto modo cuando se intenta deformarlos. Pueden ser

duros o blandos, correosos; gomosos o quebradizos, de textura uniforme o fibrosa, etc. Unos fluyen fácilmente, otros con dificultad (MULLER, 1973; LEWIS, 1987).

La propiedad que define por qué algunos materiales se comportan mecánicamente diferentes, es la viscosidad. Esto origina a la generación de conocimientos acerca de las conductas de los materiales en torno a este fenómeno para así llegar a manejarlos adecuadamente en cualquier situación. La Reología es la ciencia encargada de estudiar ampliamente éste fenómeno.

Un fluido ideal es un fluido hipotético que tiene una viscosidad con valor de cero y no ofrece resistencia al esfuerzo de deslizamiento. Como todo lo ideal, los líquidos o sólidos ideales no existen. Sin embargo, todas las sustancias poseen alguna característica de estos ideales. La proporción de cada característica ideal de sólido o líquido mostrada por cada material, dependerá de las condiciones prevalecientes y del esfuerzo al que sea sometido. De esta manera, bajo condiciones dadas, el grado de solidez o fluidez que muestren estos materiales decidirá si se clasifican como sólidos o líquidos (LEWIS, 1987).

Existe un índice llamado índice de Deborah que se define como el tiempo de observación partido por el de deformación (o relajación), que indica que cuanto mayor sea dicho índice, más tenderá el producto a parecer un sólido, y cuanto más pequeño, más se parecerá a un líquido. Cualquier sustancia puede exhibir todo tipo de propiedades reológicas y comportarse como un sólido y como un líquido, aunque

siempre predomina uno de estos tipos de comportamiento (CHOPLIN y BRITO, 1994; RAO y RIZVI, 1985 y LEWIS, 1987).

Al estudio físico del comportamiento mecánico de los materiales se le denomina Reología, rama de la Física que puede definirse como la ciencia de la deformación de la materia (MULLER, 1973; LEWIS, 1987).

2.5.1. Viscosidad

En el procesamiento de los alimentos, es importante tomar muy en cuenta la propiedad de transporte que define el comportamiento hidrodinámico de algún fluido: la viscosidad (LEWIS, 1987).

La medida de la viscosidad es a menudo muy importante para el control de calidad, particularmente en productos que se suponen sean de una consistencia particular en relación a su apariencia o sensación, por ejemplo crema, yogurt, pastas, etc. (RAO y RIZVI, 1985; LEWIS, 1987). También, con el estudio de la viscosidad, se persiguen otros propósitos, como son: la conformación estructural de los fluidos, aplicaciones en ingeniería de procesos y su relación con la evaluación sensorial, donde este último se considera una área importante de la reología de alimentos (RAO y RIZVI. 1985).

La viscosidad puede ser simplemente definida como la fricción interna que actúa dentro del fluido, es decir, la resistencia a fluir (LEWIS, 1987). Existen básicamente dos tipos de comportamiento reológico de fluidos, estos son: Newtoniano y no Newtoniano.

2.5.1.1. Flujo Newtoniano

Según VERNON *et al.* (1985); RAO y RIZVI (1985), el comportamiento de flujo de algunos fluidos puede ser caracterizado por un solo parámetro, la viscosidad newtoniana, la cual está definida como:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Donde existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante τ y la velocidad de deformación dv/dy.

El flujo Newtoniano de fluidos en general se puede comprender de la siguiente manera (VERNON *et al* ,1985; RAO y RIZVI, 1985):

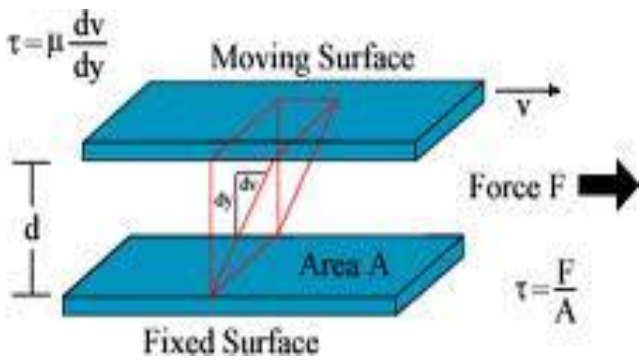


Figura 1. Modelo para el flujo Newtoniano.

Supóngase que un espacio entre dos planos paralelos que se encuentran separados una distancia *y* está lleno con un líquido. Si se aplica una fuerza F por unidad de área A (esfuerzo cortante, τ) al plano superior, mientras que el plano inferior se mantiene estacionario, el plano superior se moverá con una velocidad constante v (ver Figura 1). El líquido que se encuentra entre los dos planos no se mueve a la misma velocidad (VERNON *et al*, 1985; RAO y RIZVI, 1985), adquiere una determinada cantidad de

movimiento en la dirección del eje x. Este fluido comunica a su vez, parte de su cantidad de movimiento a la capa adyacente de fluido, dando lugar a que se mantenga en movimiento en la dirección del eje x. de tal manera que se establece un gradiente de velocidad dentro del fluido, definido como la velocidad en cualquier punto del fluido divido por la distancia desde ese punto hasta la pared de la placa, también llamada velocidad de deformación o velocidad de corte (dv/dy) (TOLEDO, 1980). La rapidez con que se mueve este líquido varía de acuerdo a su distancia del plano superior; la velocidad máxima ocurre en la capa adyacente al plano superior y es cero en la capa adyacente al plano inferior (VERNON *et al.* ,1985; LEWIS, 1987).

En un fluido newtoniano, la viscosidad del líquido μ está dada por la relación τ/dv/dy, y ésta se mantiene constante (VERNON *et al*, 1985; LEWIS, 1987). Un fluido Newtoniano se define como aquel en el cuál la representación del esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte es una línea recta; la constante de proporcionalidad se le denomina coeficiente de viscosidad o también viscosidad dinámica (MULLER, 1973). Sin embargo, el comportamiento de flujo de la mayoría de los alimentos no puede ser caracterizado con una viscosidad constante. A los materiales que muestran una desviación del comportamiento de flujo newtoniano se les conoce generalmente como fluidos no-Newtonianos (VERNON *et al.*, 1985, LEWIS, 1987).

2.5.1.2. Flujo no Newtoniano

En flujo no Newtoniano la viscosidad varía conforme se cambia la velocidad de deformación. Es decir, el esfuerzo cortante τ y la velocidad de deformación $\frac{dv}{dy}$ no están relacionadas linealmente (LEVER y TORREBLANCA, 1985). Este tipo de flujo viene descrito por la ecuación de la potencia:

$$\tau = m\left(\frac{dv}{dy}\right)^n$$

Lo que significa que el esfuerzo cortante τ es igual a la velocidad de deformación (dv/dy) multiplicada por la viscosidad aparente m o coeficiente de consistencia que está en función de la velocidad de corte dependiendo del índice de flujo η.

Existen numerosos líquidos, frecuentemente empleados en la industria alimentaria donde esta relación tan simple se cumple o no (MULLER, 1973). Algunos de estos fluidos son soluciones concentradas de macromoléculas (almidón, proteínas, gomas) y materiales coloidales tales como emulsiones, pastas y suspensiones (LEWIS, 1987). Así por ejemplo, en dispersiones, las partículas dispersas (fase continua) pueden interaccionar entre sí, al igual que con el medio (fase continua), en cuyo seno no se encuentran. Si la interacción depende de la velocidad de flujo, el coeficiente deja de ser una constante. En lugar de usar este coeficiente (distinguiendo p Newtoniano), se emplea el coeficiente de viscosidad aparente (m que se define como la tensión tangencial dividida por la velocidad de deformación (MULLER, 1973).

La viscosidad aparente no es una constante; depende del esfuerzo cortante y gráficamente se demuestra que la relación entre este esfuerzo y la velocidad de corte es una curva de flujo del Esfuerzo cortante τ en función de la velocidad de deformación dv/dy o de m en función de dv/dy.

Un líquido no Newtoniano se define como aquel que exhibe flujo uniforme, pero para el que no es constante la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte; la viscosidad no es constante (MULLER, 1973).

La viscosidad y la acción del esfuerzo cortante dependen de un número de factores como los que a continuación se mencionan:

- La naturaleza de la fase continúa y dispersa.
- La interacción partícula-partícula y la interacción partícula-solvente.
- La concentración de partículas, su forma, tamaño y composición química.

Los Fluidos no Newtonianos son más difíciles para su manejo y para su clasificación experimental, debido a que su viscosidad llega a depender de las condiciones experimentales seleccionadas (LEWIS, 1987). Este tipo de fluidos se dividen en dos categorías principales atendiendo al comportamiento de esfuerzo cortante/velocidad de deformación.

Fluidos en los que el esfuerzo cortante es independiente del tiempo o duración de la acción cortante (tiempo-independientes) y fluidos en los que el esfuerzo cortante depende del tiempo o duración de la acción cortante (tiempo dependientes).

Para el caso de los primeros, m dependerá solamente del índice de corte, mientras que para los últimos, también m dependerá de la duración de corte (RAO y RIZVI, 1985). Dentro de los Flujos independiente del tiempo tenemos los que exhiben pseudoplasticidad, estos líquidos son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de corte que cuando se cizallan lentamente. Lo anterior se explica porque existe un rompimiento o re arreglo de la estructura, resultando una menor resistencia al flujo. La viscosidad aparente depende en ellos de la velocidad de corte por cizalladura, pero no del tiempo al que están sometidos a la tensión cizallante. La velocidad de deformación aumenta en proporciones más altas que el esfuerzo cortante, de manera que la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de deformación (ver Figura 2). A este tipo de fluidos pertenecen la mayoría de los fluidos no Newtonianos como son: grasas, suspensiones de almidón, la mayonesa, ciertos fluidos biológicos, etc., mismos que experimentalmente han demostrado una disminución de la m al aumentar el esfuerzo cortante (GEANKOPLIS, 1986). El comportamiento pseudoplástico es debido a la presencia de (RHA, 1978):

- Compuestos de alto peso molecular o partículas grandes con suficiente concentración.

- Alta interacción entre las partículas, causando agregación o asociación por enlazamiento secundario.

- Alta proporción axial y asimétrica de partículas requiriendo orientación a lo largo de la línea de flujo.

- Variación en el tamaño y forma de las partículas, permitiendo el amontonamiento.

- La no rigidez o flexibilidad de las partículas las cuáles pueden cambiar geométrica o su conformación.

Otro tipo de fluidos no Newtonianos independientes del tiempo, son los que exhiben dilatancia, el cual es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo, que se da a altas velocidades de corte, se trata del fenómeno opuesto a la pseudoplasticidad. La gráfica no es lineal, pero los valores de τ y dv/dy están unívocamente relacionados (espesamiento en estado estacionario) m aumenta al aumentar dv/dy, en la Figura 2 se muestra gráficamente el comportamiento de estos fluidos.

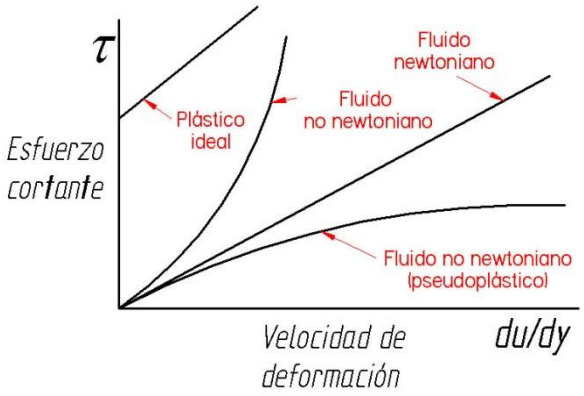


Figura 2. Clasificación de los fluidos no Newtonianos independientes del tiempo.

Algunas soluciones dilatantes son la harina de maíz y el azúcar en solución, el almidón en agua y una solución que contenga concentraciones elevadas de polvos en agua (GEANKOPLIS, 1986).

El fenómeno de dilatancia también es del resultado de los factores que interviene en un: fluido pseudoplástico; sin embargo, la

concentración y la variación en la forma de los materiales juega un papel crítico en esta conducta. La dilatancia puede ser visualizada como partículas de variado tamaño y forma encerradas, acomodadas y empacadas herméticamente, de tal manera que el flujo comienza a ser más difícil cuando la presión incrementa. Con el incremento de la velocidad de deformación, las grandes partículas flexibles llegan a elongarse, gradualmente incrementando el radio axial de las partículas; contribuyéndose así a originarse el fenómeno de dilatancia (RHA, 1978).

Los sistemas dilatantes y pseudoplásticos son evaluados a través de la Ley de la Potencia, que matemáticamente viene expresada por la ecuación (Lewis, 1987; Rao y Rizvi, 1985) ya mencionada anteriormente donde m y η son constantes, m se denomina índice de consistencia y η índice de comportamiento de flujo. Este último constituye una medida del grado de desviación del comportamiento.

Existen Flujos dependientes del tiempo y uno de ellos lo constituyen los que exhiben Tixotropía, que es un ablandamiento dependiente del tiempo. La representación gráfica que le corresponde es una curva similar a la de pseudoplasticidad (ver Fig. 3), en cuanto que μ_{app} desciende a medida que aumenta la velocidad de deformación. Difiere, sin embargo, de ella en que el descenso μ_{app} no está relacionado exclusivamente con la velocidad de deformación, sino también con el tiempo. Manteniendo constante la velocidad de deformación, μ_{app} desciende con el tiempo de manera que μ_{app} depende sólo de la velocidad, sino también de la duración de la deformación.

Si las representaciones de τ en función de dv/dy son dependientes del tiempo, terminan formando un bucle, el bucle de histéresis (proceso de deformación en el que las fases de carga y descarga no coinciden (MULLER. 1973; RAO y RIZVI, 1985).

La reopexia es un espesamiento dependiente del tiempo, en el que es curvilíneo el diagrama τ-dv/dy y en el que estos dos parámetros no están unívocamente relacionados. Existen dos valores de dv/dy para cada valor de τ y a la inversa, si se hacen rutinariamente pruebas cíclicas. La reopexia es el fenómeno inverso de la tixotropia; es necesario un riguroso control del tiempo en las determinaciones.

En la Figura 3 se presentan gráficamente las curvas de estos fluidos (MULLER, 1973; RAO y RIZVI, 1985).

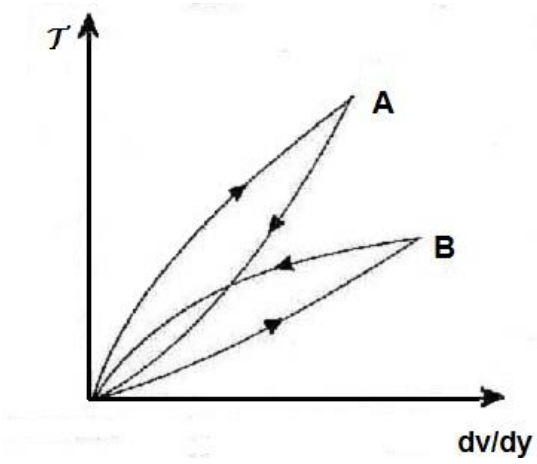


Figura 3. Fluidos dependientes del tiempo: A: Tixotrópicos; B: Reopécticos.

Los factores que contribuyen a que se dé la tixotropia son los que también contribuyen a la pseudoplasticidad y los factores que causan el comportamiento de flujo reopéctico son los que causan la dilatancia. Ambas

conductas son el resultado de un rearreglo estructural del sistema. La tixotropía indica un continuo adelgazamiento o rearreglo de la estructura con reducida resistencia al flujo, mientras que la reopexia implica el espesamiento o rearreglo estructural con alta resistencia al flujo (RHA, 1978).

2.5.2. Factores que afectan la viscosidad

2.5.2.1. Efecto de la temperatura

Los alimentos fluidos están sujetos a diferentes temperaturas durante su procesamiento, almacenamiento, transportación, venta y consumo. Por esta razón, las propiedades reológicas son estudiadas como una función de la temperatura. Generalmente la viscosidad desciende muy acusadamente al aumentar la temperatura (MULLER, 1973; VITALI *et al.,* 1974; RAO y RIZVI, 1985).

$$\mu_{ap} = Aexp(\frac{Ea}{RT})$$

Donde μ_{ap} es la viscosidad (Pa.s); A es una constante (Pa.s); Ea es la energía de activación (Kcal/g mol); R es la constante de los gases y T es la temperatura absoluta en grados kelvin (°K).

Es generalmente aceptada la aplicabilidad de ésta ecuación, no obstante se encuentran otros modelos que describen con éxito el comportamiento de la viscosidad al variar la temperatura (MULLER, 1973). Así en el caso de fluidos que obedecen a la ecuación de la Ley de la Potencia, la ecuación de Arrhenius es generalmente usada para cuantificar

el efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia, k (IBARZ y BARBOSA, 2005).

$$k = k_0 exp(\frac{Ea}{RT})$$

Donde k es el índice de consistencia y k_0 una constante.

2.5.2.2. Efecto de la concentración

Otro factor que afecta la viscosidad es la concentración de sólidos, la cual al aumentar produce un incremento de la viscosidad. Esto, al igual que la temperatura, repercute en ciertas operaciones unitarias como la evaporación, osmosis inversa, etc., en donde la viscosidad del producto determina en muchas ocasiones el grado de concentración al que es posible llegar (LEWIS, 1987).

En jugos y purés de frutas y verduras, la viscosidad también es afectada por la composición del fruto, la variedad, la época de cosecha y las condiciones del proceso de transformación (RAO *et al*, 1984).

2.6. Comportamiento reológico de algunos productos alimenticios

La viscosidad es usualmente considerada como una importante propiedad física relacionada con la calidad de los productos alimenticios. La obtención de los parámetros de la viscosidad es esencial para el diseño y la evaluación de los equipos en el proceso; así como en el control de calidad, evaluación sensorial y diversas aplicaciones ingenieriles relacionadas con el procesamiento y manejo de los alimentos.

Estudios previos sobre las propiedades reológicas y diferentes tipos de comportamiento de flujo en jugos de fruta ha sido realizado por diversos autores.

En el Cuadro 3, se presenta valores de energía de activación de flujo de algunos alimentos.

Cuadro 3. Energía de activación de flujo para algunos alimentos.

Producto	% sólidos	N	Energía de activación Ea (Kcal/gmol)	Referencias
Plátano (puré)	-	0,47	6	Charm y Merril (1959)
Durazno (puré)	11,7	0,34	1,7	Saravacos(1970)
Leche (condensada, azucarada)	-	0,83(25°C)	26,0	Holdswoth (1971)
Manzana				
(Jugo despectinizado)	75"Bx	1	14,2	Saravacos(1970)
	50°Bx	1	8,4	
	30°Bx	1	6,3	
	15°Bx	1	5,3	
(jugo con turbidez)	65,5°Bx	0,65	9,1	
	50°Bx	0,85	6,1	
	40°Bx	1	5,8	
	30°Bx	1	**5,**1	
	10,5°Bx	1	3,5	
Naranja (jugo)	30°Bx	0,85	4,2	Saravacos(1970)
	44°Bx	0,65	5,4	
Pera (puré)	16°Bx	0,30	1,9	Saravacos(1970)
Tomate (concentrado)	5,8°Bx	0,54	1,9	Charm y Merril(1959)*
Uva (Concord) (jugo)	64°Bx	0,90	11,2	Saravacos (1970)
	50°Bx	1	6,9	
	30°Bx	1	6,2	
	15°Bx	1	5,3	
Maracuyá (jugo)	12°Bx	0,28	13,7	Cervantes (1995)
(25°C)	16°Bx	0,29	14,2	
	25°Bx	0,27	12,1	
	40°Bx	0,37	13,53	
	60"Bx	0,51	12,9	

FUENTE: RAO *et al.* (1984)

Saravacos (1970) citado por RAO *et al.* (1984), estudió el comportamiento de flujo del jugo de manzana y pera concentrados bajo el efecto de la temperatura (20-70°C). El jugo de manzana despectinizado (15-75°Bx) mostró un comportamiento Newtoniano, sin embargo al ser despectinizado y filtrado presentó un comportamiento pseudoplástico a alta concentración (50 y 65,6°Bx). En jugo de naranja concentrado encontró que presenta un comportamiento pseudoplástico a 30 y 40°Bx.

Por otro lado, LOZANO e IBARZ (1994) encontraron que algunas pulpas de fruta concentrada presentan comportamiento tixotrópico, como en el puré de chabacano; así mismo en jugo de naranja concentrado (Mizrahi y Berk, 1970, consultado por VITALI *et al.,* 1974).

La caracterización reológica de los alimentos fluidos puede ser descrita por diversos modelos de flujo (RAO y RIZVI, 1985).

Es sabido que los jugos de fruta despectinizados y purés presentan naturaleza pseudoplástica; su comportamiento reológico puede ser descrito por la ley de la potencia. Ejemplos de este tipo de comportamiento son: jugo de maracuyá (VITALI *et al.,* 1974); jugo de tomate (RAO *et al.,* 1984); jugo de manzana, uva y naranja (RAO *et al,* 1984); puré de manzana (SARAVACOS, 1970), pulpa concentrada de mango (MANOHAR *et al.*, 1990). Aunque también, otros modelos se han empleado: jugo de manzana, uva y naranja (RAO *et al.*, 1984); puré de manzana (SARAVACOS, 1970), pulpa concentrada de mango (MANOHAR *et al.*, 1990). Aunque también, otros modelos se han empleado conjuntamente con el modelo anterior para realizar la caracterización de los alimentos, como el

modelo de Herschel-Bulkley y el modelo de Casson modificados al aplicarlos en jugo de naranja concentrado (RAO *et al*., 1984).

La viscosidad de un material alimenticio, como los jugos de fruta y purés depende de su temperatura y composición (BARBOSA y PELEG, 1982). La temperatura tiene un marcado efecto sobre los parámetros del modelo de la Ley de la potencia, principalmente el valor de k, el cual disminuye al ir aumentando la temperatura. Sin embargo, el valor de η no es afectado significativamente por la temperatura. Un comportamiento similar se observa en jugo de maracuyá (VITALI *et al.*, 1974; CERVANTES, 1995).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El presente trabajo se desarrolló en los laboratorios de Ingeniería de Alimentos, Análisis de Alimentos y en la Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en la Ciudad de Tingo María, región de Huánuco, a 660 msnm, con temperatura promedio anual de 25°C y humedad relativa del 80%.

3.2. Materia prima

La materia prima utilizada fue café (*coffea arabica* L.) variedad Catimor, procedente de los cafetales de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicados en La Divisoria, distrito de Hermilio Valdizan, perteneciente a la provincia de Leoncio prado en la región Huánuco.

3.3. Equipos, Materiales y Reactivos utilizados.

3.3.1. Equipos y materiales de procesamiento

- Liofilizador de Laboratorio marca LABOTEC, modelo 01JLG/12Fd
- Congeladora marca INRESA modelo ALASKA 150PB0 de 150 litros de capacidad.

- Bandejas especiales de congelación y liofilización.
- Reómetro Brookfield DV III Ultra Programable
- Estufa marca Felisa® modelo 133
- Secador de bandejas marca ARMFIELD
- Molino marca PULVEX, modelo Pulvex mini 100 de discos.
- Balanza analítica OHAUS GA200, de 200 g de capacidad.
- Balanza analítica OHAUS 1-10, de 1 a 10 gramos de capacidad.
- Balanza analítica METTLER BB3000
- Centrifuga BECKMAN J2-MC
- Baño María HAAKE
- Cocinas a gas y eléctricas
- Tamiz marca RICELI
- Recipientes contenedores de plástico (20 L).
- Malla de plástico comercial.
- Malla filtro comercial de tela.
- Papel filtro Whatman No. 1
- Frascos de vidrio para empacar producto seco.

3.3.2. Materiales de Laboratorio

- Termómetro Promlab de -50 a 150 °C
- Matraz de Erlenmeyer de 250 ml.
- Buretas.
- Balones de digestión.

- Vasos de precipitación de 50, 100 y 250 ml.
- Crisoles de porcelana.
- Fiolas de 50, 100 y 500 ml
- Vaguetas
- Pipetas graduadas de 2.5 y 10 ml.
- Placas Petri.
- Embudos de vidrio.

3.3.3. Reactivos y soluciones

- Azida de sodio marca J.T Backer.
- Acetona marca J.T. Backer.
- Alcohol iso-propílico marca J.T.Backer.
- Hidróxido de sodio 0,1 N.
- Indicador de fenoltaleina 1%.
- Buffer acetato de sodio 0,1 M pH 4,5.
- Buffer acetato de sodio 1M pH 5.
- Ácido sulfúrico.
- Colorante 2-6 diclorofenolindofenol.

3.4. Método de análisis

- **Extracción del mucílago:** mediante el empleo de solventes, según lo recomendado por MEDINA (1997).

- **Humedad:** Método gravimétrico según la NTP 206.011 1981.

- **Cenizas**: Método directo según la AOAC 930.22 2000.

- **Lípidos:** Método Soxhlet según FAO Vol. 14/7 1986.
- **Proteínas:** Método Kjeldahl según AOAC 950.36 2000.
- **Carbohidratos:** por diferencia según MS – INN Collazo 1993.
- **Fibra:** Método de filtración de fibras cerámicas según FAO FOOD AND NUTRITION PAPER Vol. 14/7 Pág. 230 - 232 1986.
- **Mediciones reológicas:** se empleó el reómetro Brookfield DV III Ultra Programable, estableciendo el splinder adecuado a diferentes Temperaturas y concentraciones partiendo del producto liofilizado.

3.5. Metodología experimental

3.5.1. Preparación del material

La materia prima se trasladó al laboratorio, se realizó el pesado, se lavó con agua potable y se procedió al despulpado, una vez obtenida la solución agua-mucilago se sometió a tratamiento térmico (85°C/1 minuto, para provocar la desactivación enzimática que causaría el deterioro del mucílago, debido a la presencia de la enzima pectimetilesterasas que degrada la pectina del mucílago. Luego se congeló la muestra.

3.5.2. Extracción y liofilizado del mucilago del café

El método empleado para la extracción, congelado y liofilizado del mucílago de café congelado y liofilizado, se muestra en la Figura 4.

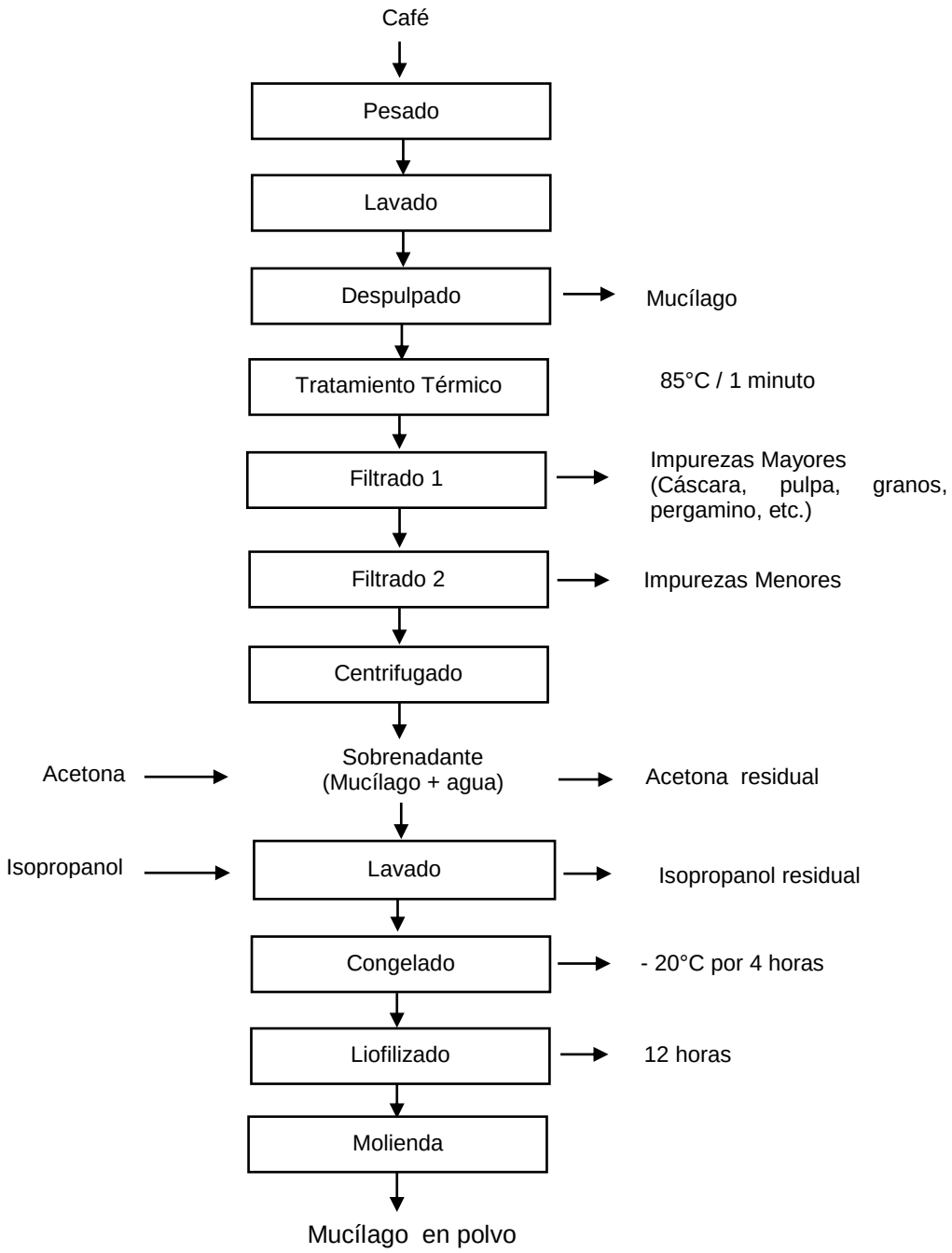


Figura 4. Proceso de extracción y liofilizado del mucílago de café.

El mucílago obtenido del desmucilaginado mecánico no es un material puro. Por este motivo, se aplicó un método de extracción para obtener mucílago libre de esos constituyentes. Consistió primeramente de un filtrado con malla comercial de plástico para separar impurezas mayores, seguida de una segunda separación con malla de tela por filtración separando las impurezas más pequeñas (finas fibras). Posteriormente una centrifugación a 10000 rpm por 10 minutos. Obteniendo en esta operación un sobrenadante conteniendo el mucilago con gran cantidad de agua y el pelet constituido de residuo de pulpa y fibrillas.

En una relación 1:3 (v/v) de sobrenadante y acetona respectivamente, se procedió a separar el mucílago de la fase acuosa. El aislamiento se realizó en un embudo de separación mediante agitación manual con el fin de conseguir el más íntimo contacto con las fases y optimizar la separación en menor tiempo. La mezcla se dejó reposar con el motivo de permitir la precipitación del mucílago "lavado". Se obtuvo por un lado, mucílago en forma precipitada, y por el otro, acetona residual. Se permitió ventilar a la intemperie el mucílago precipitado con el fin de eliminar pequeñas cantidades de acetona todavía contenidas.

Posteriormente se realizó la adición de alcohol n-isopropílico en una relación de 1:1 (w/w) para la neutralización de la goma.

Se dejó secar en un liofilizador durante 12 horas. El grado de secado de las muestras se verificó cuando tuvo las condiciones de solido que puede ser molido y convertido en polvo. Una vez secada la muestra, se

procedió a la preparación de las soluciones acuosas mediante el uso de agua destilada y agitación manual.

3.5.3. Caracterización del mucílago natural y liofilizado

En esta etapa se realizó la evaluación fisicoquímica del mucílago fresco y liofilizado.

3.5.4. Evaluación reológica

Una vez obtenida la goma liofilizada se procedió a reconstituir las muestras por concentración y tomando en cuenta la temperatura se evaluaron las propiedades de flujo del material.

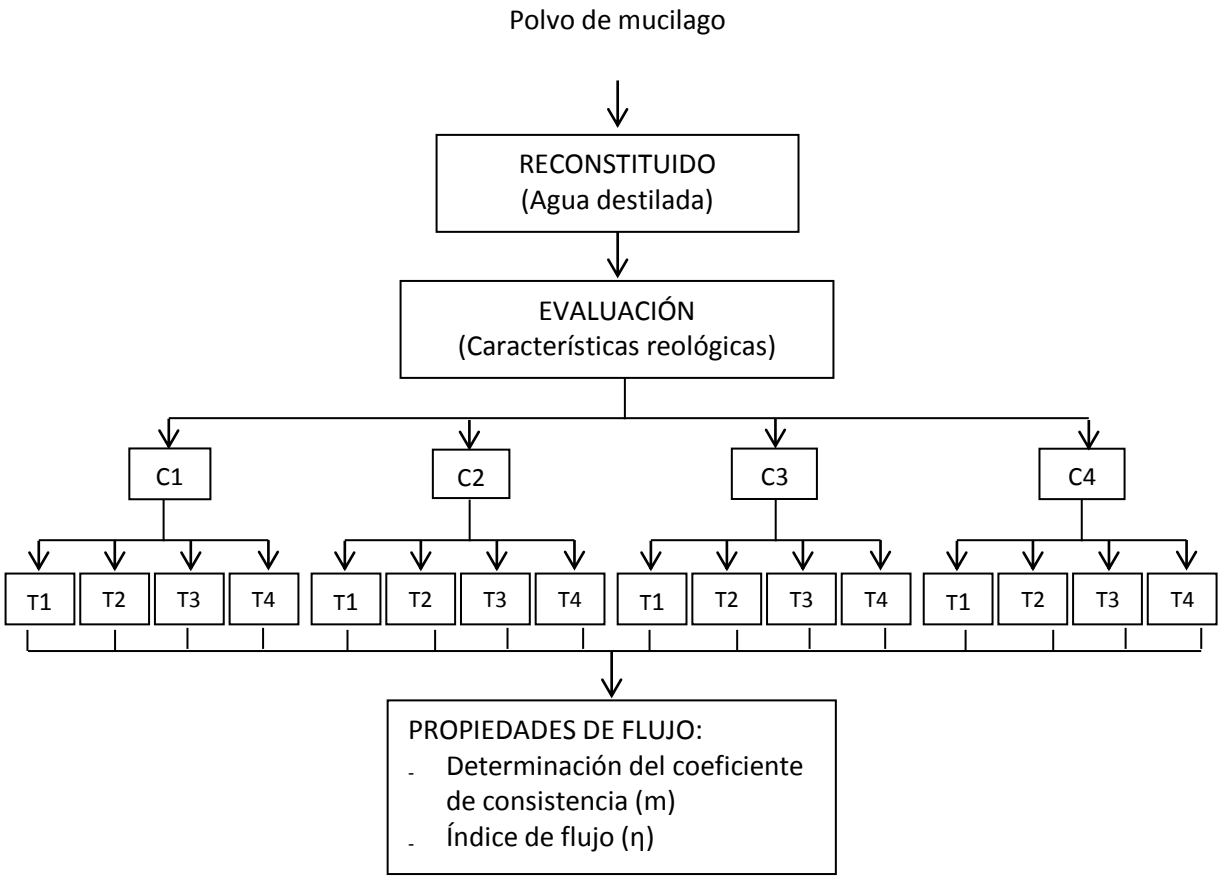
La caracterización reológica del material se hizo bajo el efecto de dos factores: (1) la concentración y (2) la temperatura.

El cuadro 4 presenta la matriz experimental empleada y la Figura 4 el diseño experimental de la investigación.

Cuadro 4. Matriz experimental.

Temperatura (°C)	Concentración (%)			
	7	10	20	30
5	$P_{1,1}$	$P_{1,2}$	$P_{1,3}$	$P_{1,4}$
25	$P_{2,1}$	$P_{2,2}$	$P_{2,3}$	$P_{2,4}$
40	$P_{3,1}$	$P_{3,2}$	$P_{3,3}$	$P_{3,4}$
60	$P_{4,1}$	$P_{4,2}$	$P_{4,3}$	$P_{4,4}$

En el Cuadro 4, los subíndices indican la combinación de los tratamientos (Temperatura y Concentración), es decir $P_{1,1;}$ es el experimento realizado con una concentración de 7% de mucilago a una temperatura de 5°C.



Dónde:

Ci: Concentración del mucílago: 7, 10, 20 y 30%

Ti: Temperatura: 5, 25, 40 y 60°C

Figura 5. Diseño experimental para la evaluación reológica del mucílago de Café

3.5.5. Medición reométrica

Para la medición de las propiedades de flujo del mucílago de café, se empleó el reómetro Brookfield DV III ultra programable rotacional con diferentes velocidades de deformación encontrando por experimentación el splindle adecuado.

Una cantidad de 600 ml de muestra de cada tratamiento fue colocada en el vaso de precipitación instalado en el reómetro. A continuación se hizo descender el huso por medio de los controles del equipo, después de haber hecho una calibración del porcentaje de esfuerzo de deformación inicial a aplicar. Enseguida se ejecutó la medición y se efectuaron las lecturas. Los parámetros de la de velocidad de deformación estuvieron en un rango de 5 a 200 s^{-1}, (5, 10, 20, 40, 80, 160, 200) para las todas las concentraciones (7, 10, 20 y 30%) y temperaturas propuestas en el diseño experimental (5, 25, 40 y 60°C).

3.5.6. Modelo empleado

Para la descripción del comportamiento reológico del mucílago de café se emplearon los modelos de las ecuaciones de Potencia y Harchel Bukley adaptándole a una regresión lineal simple aplicado logaritmo a la ecuación de la Potencia con la finalidad de obtener las constantes de flujo de interés, η y m.

3.6. Análisis estadístico

Las pruebas estadísticas se hicieron a nivel de las evaluaciones reológicas con la finalidad de ver si la variación del coeficiente de consistencia y del índice de flujo es significativa en función a la concentración y a la temperatura. Para el ajuste de parámetros reológicos de la goma reconstituida en función de la concentración y de la temperatura, se utilizó un ANVA DCA considerando la concentración y la temperatura como variables para analizar la consistencia o viscosidad aparente y el índice de flujo, el modelo matemático utilizado fue:

$$\mathbf{Yijk = U + Ci + Tj + EijK}$$

Dónde:

Yijk = Resultado de la evaluación de la consistencia y del índice de flujo

U = Efecto medio de las evaluaciones

Ci = Concentración de la muestra con goma con 4 niveles

Tj = Temperatura con 4 niveles

Eijk = Error experimental

El modelo del análisis de varianza se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Análisis de varianza del diseño experimental

Fuente	G. L.	S. C.	C. M.	$F_{calculado}$	P_{valor}
Concentración (C)	3				
Temperatura (T)	3				
Error	9				
Total	15				

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características fisicoquímicas del mucílago del café

En el Cuadro 6 se presenta los resultados de la evaluación fisicoquímica del mucílago de café fresco.

Cuadro 6. Componentes fisicoquímicos importantes del mucílago de café.

Componentes	Porcentaje
Agua	88,00[1]
Materias pécticas totales	3,92[1]
Azúcares reductores	3,5[2]
Azúcares no reductores	2,3[2]
Celulosa, cenizas, etc.	1,30[1]
Carbohidratos totales	5,93[1]
Proteína	0,85[1]
Acidez (Como ácido cítrico)	4,56[2]
pH	5,5 a 5,8[2]

1) La sumatoria debe dar 100%; 2) Valores que no tiene que ver con el porcentaje

El grano de café recién despulpado está cubierto de una capa mucilaginosa (mesocarpio), que representa el 15,55 a 22% del peso del fruto maduro. El mucílago es una estructura rica en azúcares y pectina que cubre el endospermo de la semilla y mide aproximadamente 0,4 milímetros de espesor.

El pH del mucílago en café maduro variedad Catimor fue de 5,5 a 5,8 similar a lo reportado por GARCÍA (1992) quién indica de 5,6 a 5,75 y cercano a lo reportado por MENCHÚ (1973) de 6,0 a 6,2.

El contenido de humedad del fruto maduro dependerá del régimen de lluvias en los días anteriores a la recolección. Esto es importante, debido a que cuanto mayor sea la hidratación, mayor será el contenido de mucílago; lo cual afecta los rendimientos de café maduro a oro.

Por otra parte, es importante agregar que el café de cada zona posee por naturaleza enzimas que actúan a su manera. El mucílago fresco obtenido en forma mecánica representa una fuente natural para la obtención de pectinas de buena calidad para su uso en la industria de alimentos, medicinas, y químicos. Esto no es explotado en la industria, mientras que el mucílago que se obtiene de la fermentación natural ha sufrido un proceso de degradación irreversible y no se pueden obtener pectinas. Además, representa una alta carga orgánica y para removerlo del grano es necesario hacer un lavado donde utilizaremos agua, que se debe, tratar posteriormente.

En la agroindustria del café se conocen dos sistemas de procesamiento: por vía seca y por vía húmeda. Por vía seca, el café seca con todas sus cubiertas y tejidos exteriores cuando aún se encuentra en la planta o después de recolectado simplificando de esta manera el proceso y obteniendo como resultado cafés naturales. En el procesamiento por vía húmeda, el proceso es más complejo pues implica la eliminación del mucilago para obtener cafés suaves, lavados y de mejor calidad.

4.2. Curva de secado

Los datos de masa de las muestras antes y después del liofilizado luego de cada hora de liofilización se presentan en la el Cuadro 7, así como el porcentaje de agua removida.

Cuadro 7. Datos para realizar la curva de secado del mucilago de café.

Muestra	Masa Antes Liofilización (g)	Masa Después Liofilización (g)	Masa Removida (%)
1	100,00	91,10	8,90
2	100,00	74,20	25,80
3	100,00	67,10	32,90
4	100,00	64,30	35,70
5	100,00	51,50	48,50
6	100,00	45,90	54,10
7	100,00	38,00	62,00
8	100,00	34,00	66,00
9	100,00	28,98	71,02
10	100,00	28,00	72,00
11	100,00	23,98	76,02
12	100,00	23,20	76,80
13	100,00	22,00	78,00
14	100,00	19,00	81,00
15	100,00	18,50	81,50
16	100,00	15,00	85,00
17	100,00	14,50	85,50
18	100,00	13,00	87,00
19	100,00	13,00	87,00
20	100,00	11,88	88,12
21	100,00	11,88	88,12
22	100,00	11,88	88,12
23	100,00	11,87	88,13
24	100,00	11,87	88,13

La curva de secado del mucílago de café se presenta en la Figura 6, ésta muestra el porcentaje de agua removida en 24 horas de operación. También se muestra en su ecuación, la línea de tendencia hallada para la curva de datos experimentales, la cual se ajusta a un polinomio de tercer orden con un r^2 de 0,9941.

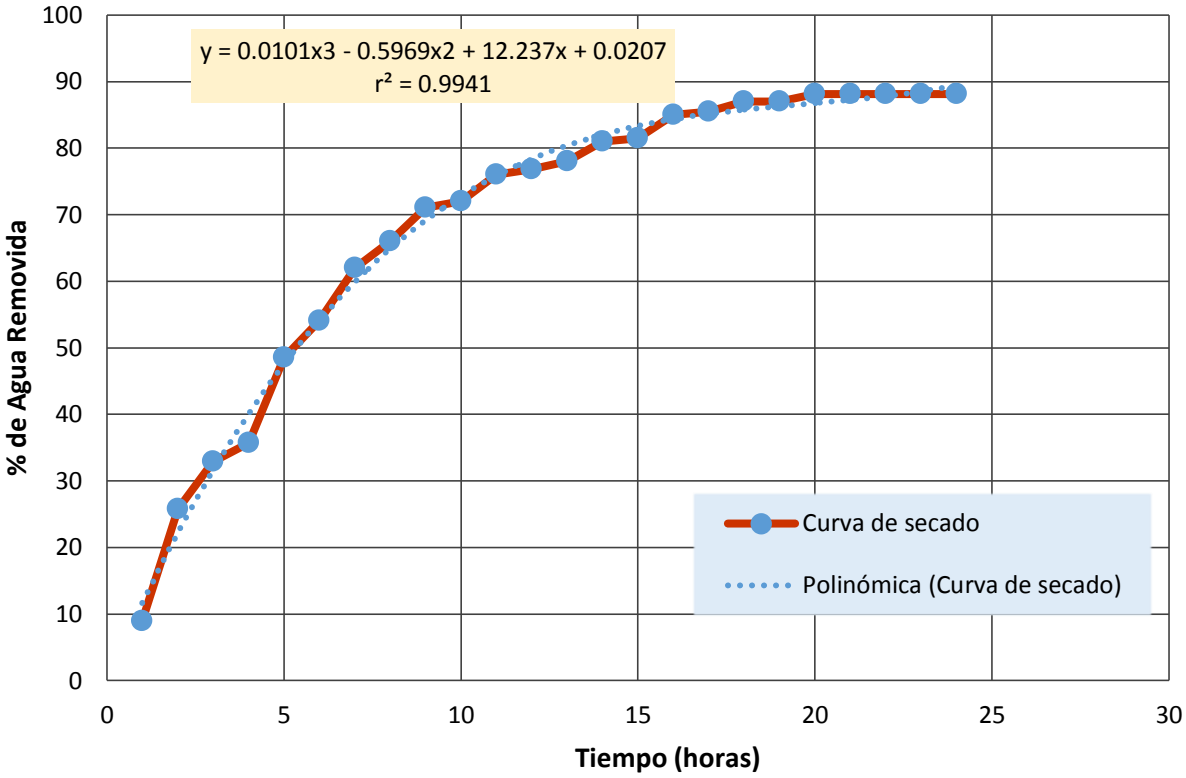


Figura 6. Curva de secado del mucilago de café.

De la Figura 6, se observa un comportamiento acelerado en el porcentaje de remoción de agua durante las primeras horas de operación, el cual va decreciendo a medida que se acerca a valores cercanos al 80% de agua retirada. También se aprecia que el tiempo de liofilización para la goma de mucilago de café fue aproximadamente de 19 horas, pues a este tiempo la cantidad de agua removida en el proceso permaneció casi constante.

4.3. Características fisicoquímicas del mucilago de café liofilizado.

En el Cuadro 8 se presenta los resultados de la caracterización fisicoquímica del mucílago de café liofilizado, donde se observa que una humedad de 8% y los demás componentes han variado mínimamente en relación al mucilago integral del café.

Cuadro 8. Características fisicoquímicas del mucílago de café liofilizado

Componentes	Gramos	Porcentaje
Agua	0,94	8,00
Materias pécticas totales	2,85	24,01
Celulosa, cenizas, etc.	1,30	10,95
Carbohidratos totales	5,93	49,95
Proteína	0,85	7,16
Acidez	4,56[1]	
pH	5,4[1]	

1) No están considerados en la sumatoria para un 100%

4.4. Evaluación reológica

Los resultados de la evaluación reológica realizado al mucílago de café liofilizado y reconstituido expresado como Velocidad de deformación (dv/dy) y Esfuerzo de corte del mucílago se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Velocidad de deformación (dv/dy) y Esfuerzo de corte del mucílago.

Temp. °C	Concentración (%)							
	7		10		20		30	
	dv/dy (s^{-1})	τ (Pa)	dv/dy (s^{-1})	τ (Pa)	dv/dy (s^{-1})	τ (Pa)	dv/dy (s^{-1})	T (Pa)
5	5	1,29122	5	9,60288	5	283,499	5	704,111
	10	2,18667	10	15,8177	10	395,408	10	955,2
	20	3,70311	20	26,0546	20	551,493	20	1295,83
	40	6,27118	40	42,9167	40	769,192	40	1757,93
	80	10,6202	80	70,6916	80	1072,83	80	2384,81
	160	17,9852	160	116,442	160	1496,32	160	3235,24
	200	21,3092	200	136,737	200	1665,48	200	3569,01
25	5	1,14397	5	6,73199	5	172,689	5	584,063
	10	1,96434	10	11,2436	10	254,59	10	808,991
	20	3,37304	20	18,7788	20	375,335	20	1120,54
	40	5,79194	40	31,3639	40	553,344	40	1552,07
	80	9,94553	80	52,3832	80	815,779	80	2149,79
	160	17,0778	160	87,4892	160	1202,68	160	2977,7
	200	20,3246	200	103,197	200	1362,76	200	3306,95
40	5	1,09279	5	5,02504	5	91,9907	5	499,07
	10	1,92922	10	8,62865	10	143,352	10	700,916
	20	3,40587	20	14,8165	20	223,389	20	984,398
	40	6,01273	40	25,4419	40	348,114	40	1382,53
	80	10,6149	80	43,6871	80	542,476	80	1941,69
	160	18,7396	160	75,0165	160	845,357	160	2727,00
	200	22,5023	200	89,2784	200	975,13	200	3042,08
60	5	1,12555	5	4,02249	5	84,0069	5	485,769
	10	2,04291	10	6,95519	10	134,591	10	696,571
	20	3,70796	20	12,026	20	215,633	20	998,851
	40	6,73009	40	20,7939	40	345,475	40	1432,31
	80	12,2154	80	35,9542	80	553,499	80	2053,87
	160	22,1714	160	62,1676	160	886,782	160	2945,15
	200	26,8618	200	74,152	200	1032,09	200	3307,51

Los datos mostrados en el Cuadro 9, se han obtenido aplicando la ley de la potencia, y cada tratamiento según la matriz experimental se muestran en los Anexos del 1 al 16, de esta forma se puede representar gráficamente la dependencia entre la velocidad de deformación y el esfuerzo de corte, para cada valor de temperatura y concentración, que se muestran en las Figuras 7 al 10.

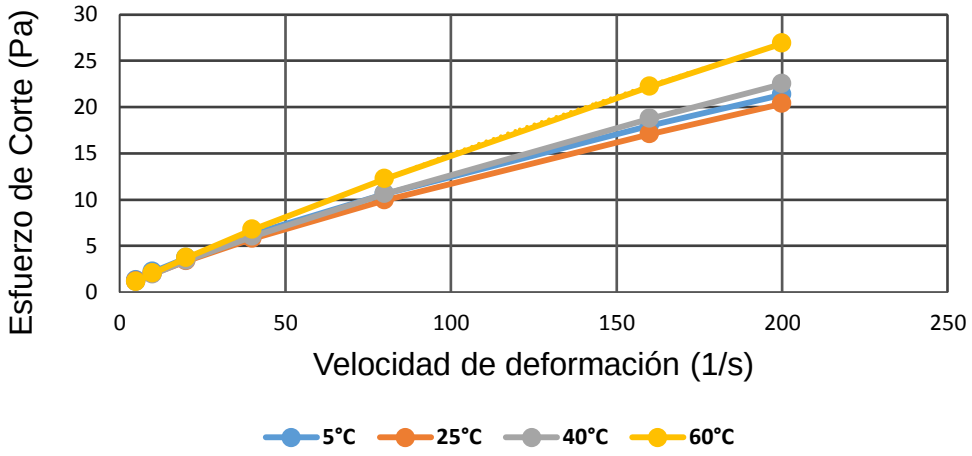


Figura 7. Curvas Velocidad de deformación Vs Esfuerzo de corte a 7% de concentración.

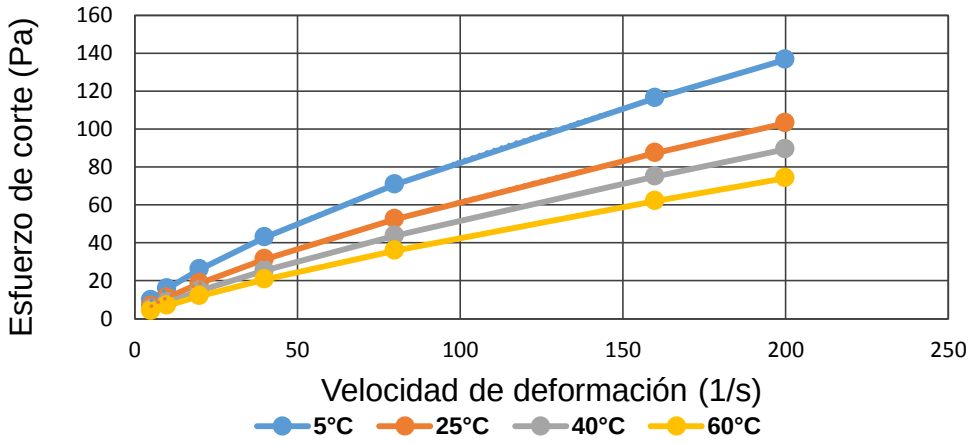


Figura 8. Curvas Velocidad de deformación Vs Esfuerzo de corte a 10% de concentración.

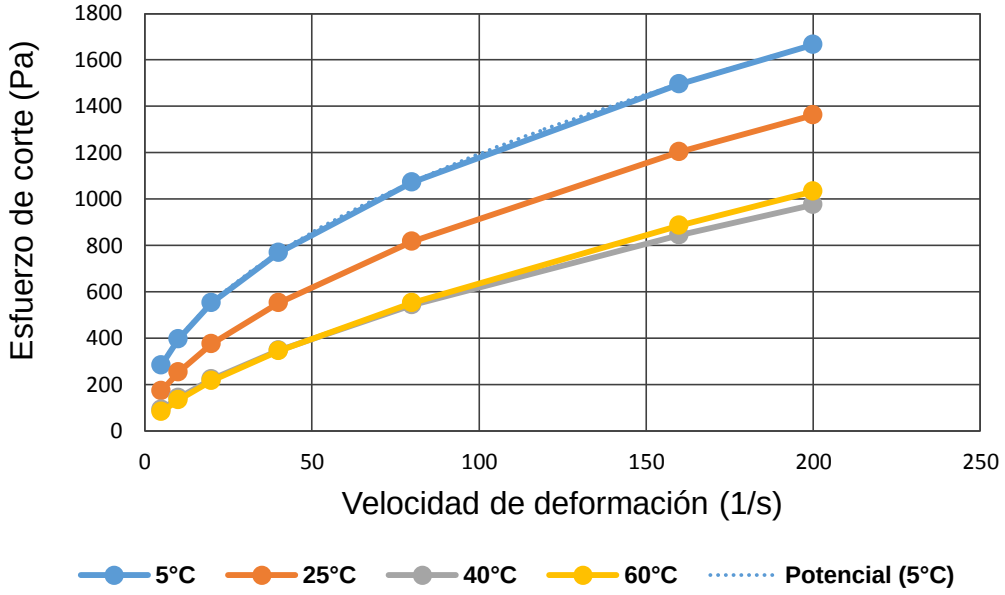


Figura 9. Curvas Velocidad de deformación Vs Esfuerzo de corte a 20% de concentración.

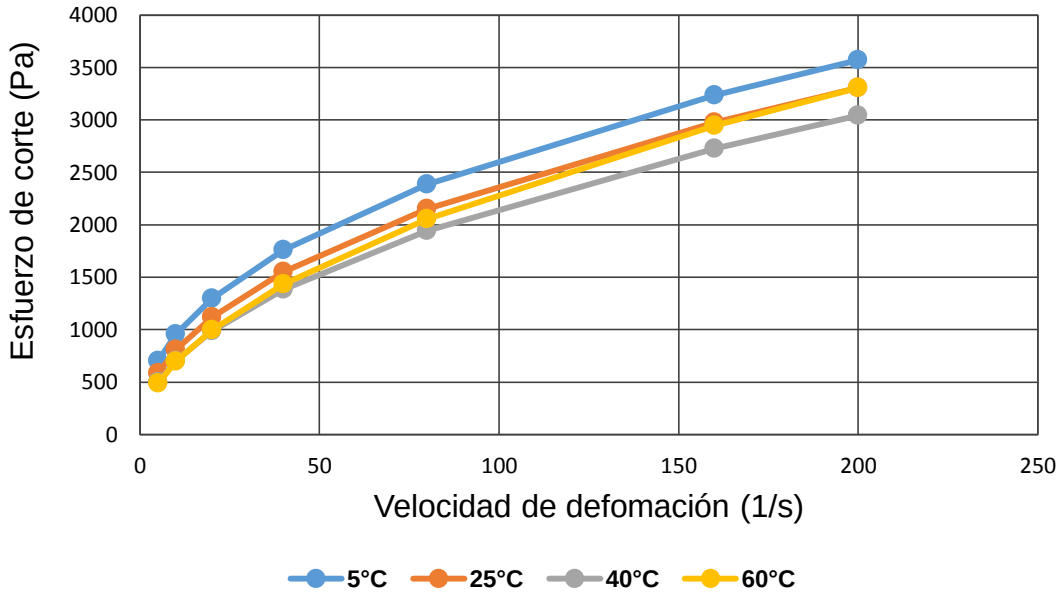


Figura 10. Curvas Velocidad de deformación Vs Esfuerzo de corte a 30% de concentración.

A partir de las curvas obtenidas se estimaron los parámetros η y m (índice de consistencia), para cada temperatura y concentración, que se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Parámetros reológicos en muestras de mucílago de café a diferente temperatura y concentración (%).

Temperatura °C	Concentración (%)							
	7		10		20		30	
	m (Pa.s)	N	m (Pa.s)	n	m (Pa.s)	n	m (Pa.s)	N
5	0,380	0,76	3,014	0,72	130,932	0,48	346,812	0,44
25	0,326	0,78	2,046	0,74	70,12	0,56	274,122	0,47
40	0,292	0,82	1,432	0,78	32,84	0,64	226,812	0,49
60	0,282	0,86	1,128	0,79	28,12	0,68	210,361	0,52

De acuerdo con los resultados, se aprecia claramente que la viscosidad aparente (coeficiente de consistencia) disminuye conforme se incrementa la temperatura, por lo que el comportamiento reológico que presenta el mucilago de café reconstituido es pseudoplástico según el modelo de la ley de la potencia al obtener valores de η menor a 1.

La selección del modelo mencionado fue debido a que ofrece una representación aproximada en la caracterización de este tipo de materiales y por su sencillez al aplicarse, además de considerarse un modelo para propósitos ingenieriles.

Los valores de las constantes η y m fueron calculados confiablemente, demostrado por los altos valores de correlación, r^2 (0,98 – 0,99).

Del análisis de varianza mostrado en el Anexo 17, para el coeficiente de consistencia m, el P valor para temperatura es mayor que 0,05 lo cual demuestra que no hay diferencia estadística y para concentración es menor que 0,05 indicando que si existe diferencia significativa.

En cuanto al Índice de flujo η (Anexo 18), tanto para temperatura como para concentración, el P valor es menor que 0,05 por lo que se puede afirmar que si existe diferencia estadística.

Los comportamientos descritos propiciaron realizar las pruebas de diferencia de Tukey HSD que se presenta en el Cuadro 11 para el coeficiente de consistencia y en los Cuadro 12 y 13 para el índice de flujo.

Con respecto al efecto de la concentración, resulta estadísticamente iguales a 7, 10 y 20% de concentración de mucílago, variando a 30%, tal como se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 11. Prueba de Múltiples Rangos para Coeficiente de consistencia por efecto de la concentración (Método: 95%, Tukey HSD)

Concentración %	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
7	4	0,32	15,8168	a
10	4	1,905	15,8168	a
20	4	65,503	15,8168	a
30	4	264,527	15,8168	b

En el Cuadro 12 se presenta la prueba de múltiples rangos para el índice de flujo por efecto de la temperatura. El índice de flujo a 5 y 25°C no varía estadísticamente, así como entre 25 y 40°C y entre 40 y 60°C pero si hay diferencia estadística entre 5 y 40°C y entre 5 y 60°C.

Cuadro 12. Pruebas de Múltiple Rangos para Índice de flujo por efecto de la temperatura (Método: 95%, Tukey HSD)

Temperatura °C	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
5	4	0,6	0,0136994	a
25	4	0,6375	0.0136994	ab
40	4	0,6825	0,0136994	bc
60	4	0,7125	0,0136994	c

En el Cuadro 13 se presenta la prueba de múltiples rangos para el índice de flujo por efecto de la concentración donde se comprueba que los índices de flujo a concentraciones de 10, 20 y 30% varían estadísticamente, pero a 7 y 10% resultan estadísticamente iguales.

Cuadro 13. Pruebas de Múltiples Rangos para Índice de flujo por Concentración (Método: 95%, Tukey HSD)

Concentración %	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
30	4	0,48	0,0136994	a
20	4	0,59	0,0136994	b
10	4	0,7575	0,0136994	c
7	4	0,805	0,0136994	c

Las Figuras 7, 8, 9 y 10 muestran claramente la tendencia de que

la viscosidad aparente y el índice de flujo varían primeramente influenciado por la velocidad de deformación y el esfuerzo de corte, esta variabilidad determina una curva donde se nota claramente un engrosamiento, dando un comportamiento de acuerdo a la Ley de la Potencia donde el η es menor que uno, lo que permite afirmar que es un fluido no Newtoniano con comportamiento Pseudoplástico. Las figuras también demuestran que esta tendencia se mantiene aunque se varíe la temperatura y la concentración, siendo más notorio a mayor concentración.

OLIVEROS y GUNASEKAIAN (1994), reportan que este material estudiado en otras condiciones también presenta un comportamiento pseudoplástico. En dicho estudio, el mucílago fue caracterizado en suspensiones mucílago-café en baba y mucílago café pergamino bajo la influencia del tiempo de pre proceso. TTP (horas) y el contenido de cerezas maduras, CCM (%), condiciones distintas a las empleadas en este estudio, al cual se aplicó un tratamiento de extracción y liofilización. Según los autores, la marcada pseudoplasticidad del material puede ser debido al efecto combinado de destrucción de estructuras, a causa de la acción de fuerzas de tensión y de cortantes y a la tendencia de las partículas a alinearse en la dirección principal del campo de flujo. El modelo de la Ley de la Potencia aplicado a los resultados de la evaluación reológica por estos autores, les permitió hacer las siguientes afirmaciones: El valor de η no depende del contenido de cerezas maduras en la muestra analizada, está fuertemente influenciado por el tiempo de pre proceso, disminuye cuando el tiempo de pre proceso aumenta. El valor de m disminuye al incrementar el contenido de

cerezas maduras, aumenta con el tiempo de pre proceso. El valor de m depende de las variedades, siendo mayor en la variedad caturra que es el que tiene mayor porcentaje de mucilago.

4.5. Viscosidad aparente o coeficiente de consistencia (m)

4.5.1. Efecto de la temperatura sobre m.

La viscosidad aparente o coeficiente de consistencia, m, no es afectado considerablemente por la temperatura, el cuál desciende conforme la temperatura se incrementa (Figuras 11, 12 y 13).

Generalmente, esta es la tendencia que presentan la mayoría de los coloides hidrofílicos; la viscosidad desciende conforme aumenta la temperatura, siempre y cuando sean temperaturas mayores de 25°C. Este efecto es reflejado a través de la variaciones que tiene m.

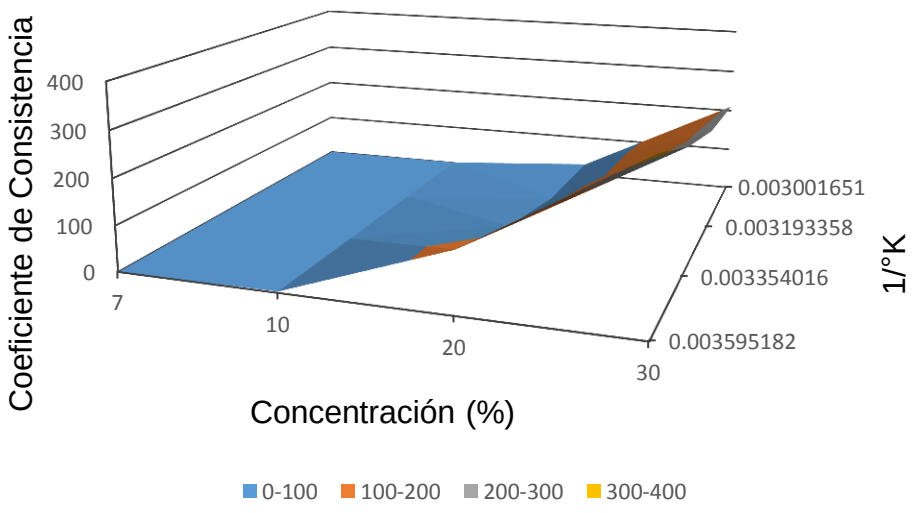


Figura 11**.** Superficie de respuesta viscosidad aparente, concentración y 1/Temperatura

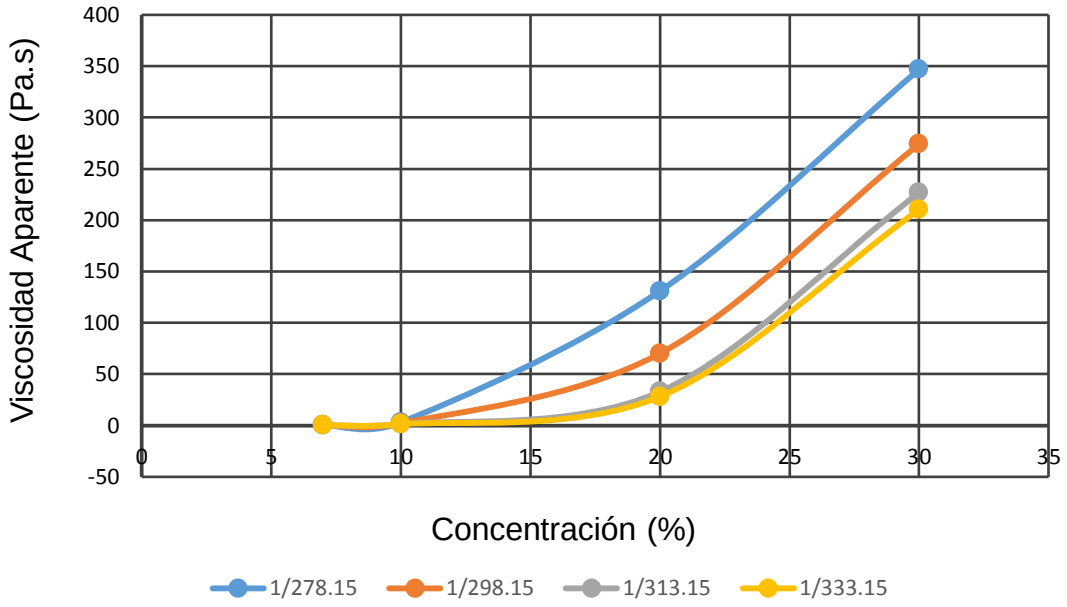


Figura 12**.** Reograma Viscosidad aparente Vs Concentración.

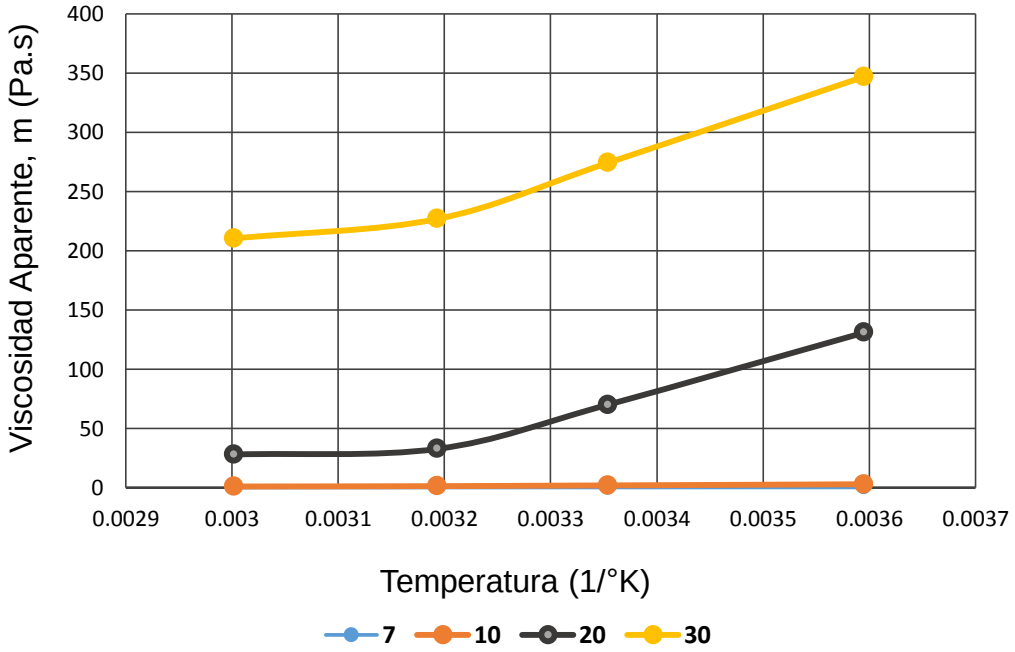


Figura 13**.** Reograma Viscosidad aparente Vs 1/Temperatura.

La ecuación que describe el efecto de la temperatura sobre las propiedades de viscosidad es la de tipo Arrhenius, muy usada en la mayoría de los alimentos, como en jugos y purés (BARBOSA y PELEG, 1982).

Este modelo fue empleado en la presente investigación y en el Cuadro 14 se presentan los valores obtenidos. Como puede observarse, al pasar la concentración de 7 a 20%, el valor de la energía de activación Ea, aumenta. Esta tendencia coincide con lo reportado por otros autores para productos alimenticios (BARBOSA y PELEG, 1982 ; VITALI y RAO, 1974).

Cuadro 14. Valores de la Energía de Activación del mucílago de café reconstituido a diferente concentración.

Concentración (%)	m_o (Pa.s)	Energía de Activación (Kcal/g mol K)
7	0,0268	0,630
10	0,0039	2,128
20	$3,63x10^{-5}$	3,618
30	6,2580	0,950

Del Cuadro 14, la Energía de Activación a concentraciones de 7% a 10% se incrementa notoriamente luego se ve que es menor cuando llega a 20% y luego para 30 de concentración el valor es mucho menor, esto quiere decir que a viscosidades aparentes mayores la Energía de Activación es menor.

Esto nos indica que las propiedades de viscosidad del mucílago de café reconstituido pueden llegar a ser considerablemente afectado en procesos que impliquen transferencia de calor.

4.5.2. Efecto de la concentración sobre m.

La viscosidad aparente o coeficiente de consistencia del fluido

es drásticamente afectado por la concentración, tal como se observa en la Figura 12, m asciende conforme la concentración también lo hace, esto se debe a la presencia de sólidos que se hacen cada vez más presentes a altas concentraciones. Las variaciones de m por el efecto de la concentración son importantes. Así a 5°C el incremento es del 99,8% al variar la concentración de 7 a 30%; así mismo a 40°C m incrementa en un 99,9% su valor en el rango tratado. Claramente se observa entonces que la concentración es el factor de mayor influencia sobre las propiedades reológicas del mucílago del café. El empleo de este material a altas concentraciones sobre algún proceso industrial reflejará diversas situaciones de requerimientos sobre el consumo de potencia en equipos, por ejemplo, en tanques agitados, donde la alta concentración lleva a que se aumente la velocidad de rotación del agitador (OLIVEROS y GUNASEKARAN, 1994).

4.6. Índice de Flujo (η).

4.6.1. Efecto de la temperatura sobre η.

La Figura 14 muestra el efecto de la variación de η en función de la temperatura y la concentración. De acuerdo a la figura, el efecto de la temperatura sobre η es significativo. Lo anterior es comparable en diversos productos alimenticios, donde η de igual manera presenta esa tendencia; como es en jugo de kiwi (IBARZ *et al,* 1995); jugo de naranja concentrado (RAO *et al*, 1984); puré de pera (BARBOSA y PELEG, 1982) y pulpa de mango (MANOHAR *et al,* 1990). También, esto ha sido observado en algunas soluciones acuosas de coloides hidrofílicos; como en la goma

guar, xantan y metilcelulosa (BARBOSA y PELEG, 1982). En términos prácticos, el índice de comportamiento de flujo no permanece constante y al igual que el coeficiente de consistencia varia con la concentración, donde a mayor concentración se hace más diferente de uno y a mayor temperatura tiende más a uno.

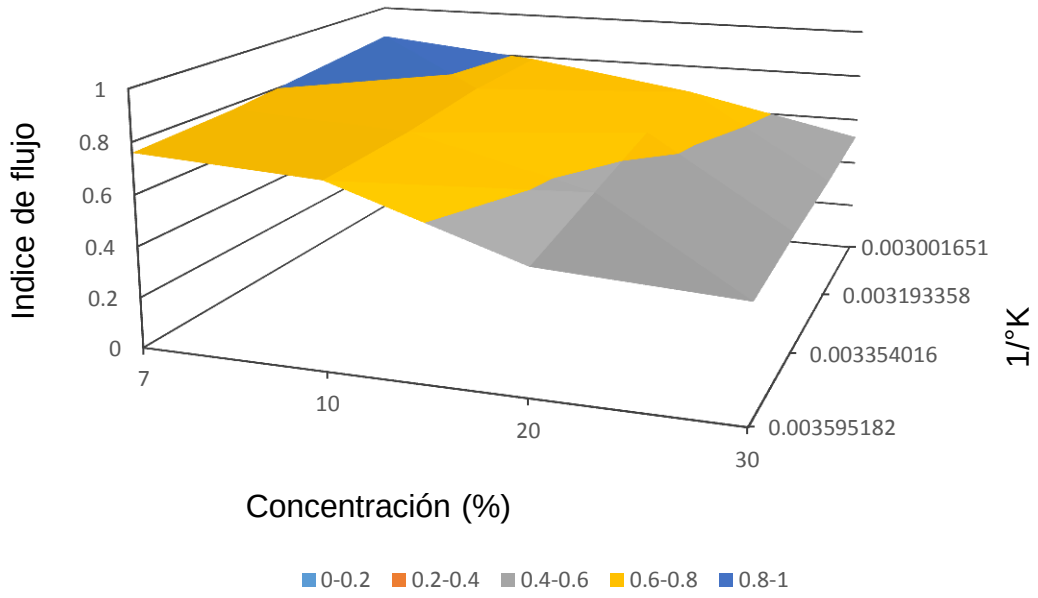


Figura 14. Superficie de respuesta índice de flujo, concentración y 1/temperatura.

4.6.2. Efecto de la concentración sobre η.

El índice de flujo, η disminuye conforme la concentración se incrementa, es decir que se distancia de uno tal como se aprecia en la figura 15 y 16.

De acuerdo con el Cuadro 7, el valor η sobre el rango de concentración varía en relación a cada una de las temperaturas. A su vez, se

aprecian importantes variaciones de η entre una y otra concentración continua.

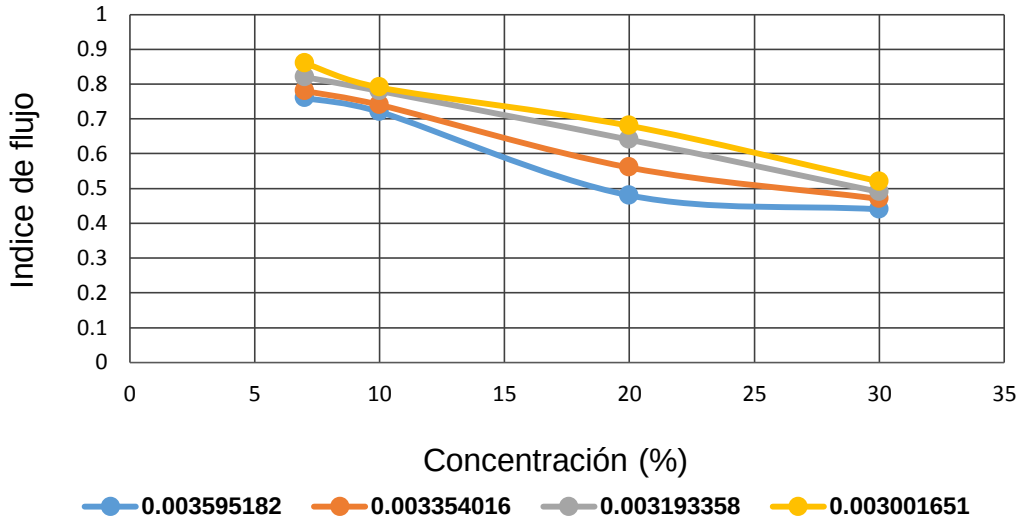


Figura 15. Reograma Índice de flujo Vs concentración.

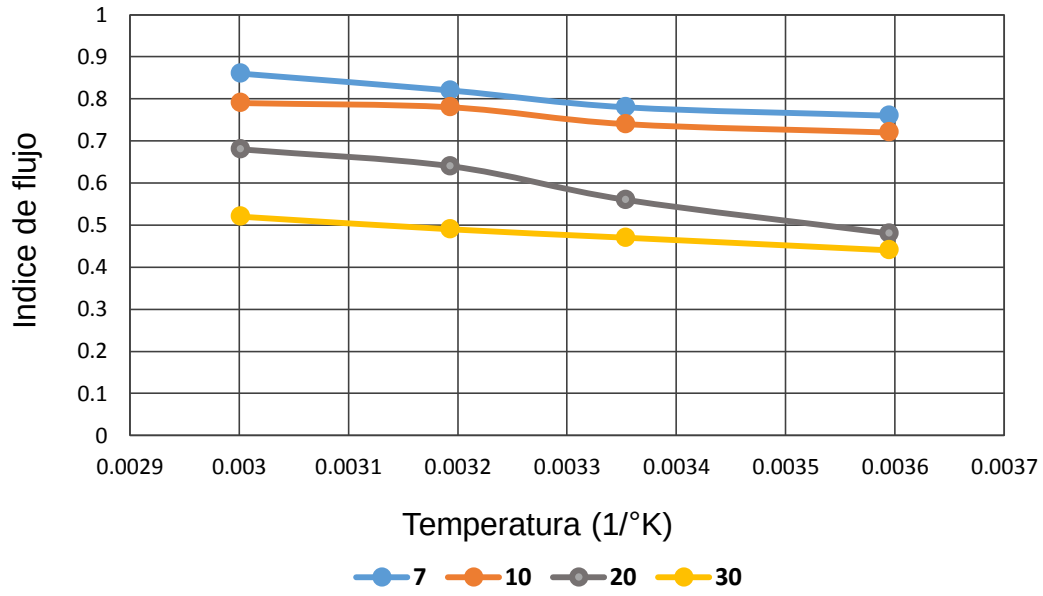


Figura 16**.** Reograma Índice de flujo Vs 1/temperatura.

V. CONCLUSIONES

Del análisis e interpretación de los resultados se llegaron a las siguientes conclusiones:

- El mucilago de café fresco de la variedad Catimor presentó un pH de 5,5 a 5,8; humedad, 88%, materias pécticas totales 3,92%.
- El mucilago de café liofilizado y reconstituido presentó 8% de humedad, pH: 5,4 a 5,8; y materias pécticas totales 24,01%.
- El mucílago de café liofilizado y reconstituido presenta las características de fluido no newtoniano con comportamiento pseudoplastico, por obtener valores del índice de comportamiento al flujo η menores a 1.
- Los valores del índice de consistencia, m, variaron de 0,282 Pa. s^n a 346,81 Pa.s^n, m es afectado por la temperatura, estadísticamente de forma no significativa. El índice de comportamiento del fluido η, si es afectado por la temperatura significativamente. Las variables η y m son afectadas significativamente por la concentración del mucilago de café. El índice de comportamiento η, tomó valores entre 0,44 y 0,86.

VI. RECOMENDACIONES

- Desarrollar una investigación sobre la cinética de degradación del mucílago de café y su impacto en el comportamiento reológico. Esta investigación permitiría obtener una idea de cómo se ve afectada la conducta reológica del mucílago debido a la serie de eventos de degradación de origen biológico y así proponer alternativas de la solución para evitarlo.
- Desarrollar y evaluar otros métodos de extracción del mucílago del café y determinar que técnica o técnicas permiten aislar el mucílago de café en condiciones de buena calidad, su influencia sobre el comportamiento reológico, óptimos rendimientos y menores tiempos de extracción.
- Realizar un estudio de la aplicación del mucílago de café a sistemas alimenticios, así como su capacidad de poderse obtener sinergismos con otros tipos de gomas.

ABSTRACT

This work studies the extraction, lyophilization and rheological characterization of coffee mucilage. The rheological behavior of the lyophilized and reconstituted mucilage, were studied at 5, 25, 40 and 60°C with concentrations of 7, 10, 20 and 30%. The rheological determinations were done at deformation speeds from 5 to 200 s^{-1}. In accordance with the results, which were analyzed using the law of potential, the lyophilized and reconstituted coffee mucilage presented a non-Newtonian pseudoplastic behavior, which is to say that its apparent viscosity diminishes as the deformation speed increases. The evaluated solutions presented consistency index values (m) of 0.282 $Pa.s^n$ to 346.812 $Pa.\ s^n$ and value of the flow index (η) varied from 0.44 to 0.86. The concentration showed a marked effect on the flow properties of the material, m; they increase as the concentration increases. Regarding the value of η, this decreases as the concentration increases. The phenomenon of the pseudoplastic behavior was more evident at a greater concentration, which is a typical situation in polymer solutions. The value of the consistency index was constant in the temperature range studied, but not in the concentrations studied. The value of solutions η varied statistically with the temperature and concentration

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE F. 1966. La utilización industrial del grano de café y de sus productos. Investigaciones Tecnológicas del ICAITI. No. 1. Guatemala.

AOAC. 1984. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Oficial Methods of Analysis. . 12th ed. Washington D.C. (USA). 43 p.

AOAC. 1995. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Oficial Methods of Analysis. Ed. Arlington. USA. 37: 2

BARBOSA, G.; PELEG, M. 1982. Propiedades de Flujo de Alimentos Líquidos y Semilíquidos. Tecnología Alimentaria. 17 (2):4-28.

BRADBURY W.; HALLIDAY D. 1990. Chemical Structures of Green Coffee Polysaccharides. 38: 389-392. U.S.A.

BRAHAM, J.; BRESSANI, R. 1978. Pulpa de café: Composición, tecnología y utilización. Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá. 152 pp.

BRITO, E. 1994. Reometría de los Alimentos Memorias delCurso Reología y su Aplicación al Proceso de Alimentos. PUAL. U.N.A.M. México, D.F.

CHOPLIN, L. 1994. Reología. Memorias del curso Reología y su Aplicación al Proceso de Alimentos. PUAL. U.N.A.M. México, D.F.

CLARK, R.; MACRAE, R. 1987. Coffe: Technology. VoL 2. Elsiever Aplied Science. N. Y. U.S.A.

CERVANTES, R. 1995. Caracterización Reológica del Jugo de Maracuyá (*Passiflora edulis Sims,* var. Flavicarpa). Tesis Lic. Depto. de Ingeniería Agroindustrial. U.A.Ch. México, D.F. 49 pp.

CLIFFORD, M.; WILLSON, K .1985. Coffee:Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage. AVI Publishing Company, Inc. U.S.A. 457 pp.

ESPINOSA, S. 1993. Estudio del secado convectivo de café pergamino (*Coffea arábica* L.). Tesis de maestría. ENCB-IPN. México. 93 p.

DÍAZ, C. 1993. El beneficio de café en México. Antecedentes, estadísticas y situación técnica. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. México.

GEANKOPLIS, C. 1986. Proceso de Transporte y Operaciones Unitarias. Ed. CECSA. 3era. Edición. México.

IGOE, R. 1982. Hydrocolloid Interactions Useful in Food Systems. Food Technology. 36: 72- 74.U.S.A.

IBARZ, A.; BARBOSA, G. 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Ediciones Mundi-prensa. Madrid. Barcelona. España.

JACQUET, M. 1993, Alternativas tecnológicas del beneficiado húmedo del café en relación con la conservación del medio ambiente. Promecafe. Honduras.85 pp

LEÓN, M. 1981. Evaluación de otros Sistemas Enzimáticos para el Desmucilaginamiento del Grano de Café (*Coffea arabica L*.) en tres

localidades de las zonas Centro y Sur-Oriente de Guatemala. Universidad de San Carlos Guatemala. Guatemala.

LEWIS, M. 1987. Physical Propierties of Food and Food Processing Systems. Ellis Horwood Ltd. Chichester, England. 465 pp.

LOZANO, J.; IBARZ, A.; 1994. Thixotropic behavior of concentrated fruits pulps. Lebensmittel wissensschaft und. Technologie. 27: 16-18. U.S.A.

MANOHAR, B.; RAMAKRISHNA, P.; RAMTEKE, R. 1990. Effect of Pectin Content on Flow Propierties of mango concentrates. Journal of Texture Studies. 21 : 179-190.

MEDINA, T. 1997. Estudio reológico del mucílago del nopal Opuntiaficus indica y su efecto sinérgico con otros hidrocoloides de uso alimenticio. Tesis predoctoral. Fac. de Química. Dpto. de Alimentos y Biotecnología. U.N.A.M.

MENCHU, J.; ROLZ, C. 1973. Coffee Fermentation Technology. Instituto Central Americano de Investigación Tecnológica para la Industria (ICAITI). Guatemala.

MULLER, H. 1973. Introducción a la Reología de los Alimentos.Ed. Acribia. Zaragoza, España.

OLIVEROS E.; GUNASEKARAN S. 1994. Caracterización Reológica del Mucílago y de las Suspensiones Mucílago-Café en Baba y Mucílago-Café Pergamino Húmedo. CENICAFE. 45 (4): 125-136. Chichiné, Colombia.

RAO, M.; ANANTHESWARAN, R. C. 1982. Food Technology. 36 (2): 116-126.

RAO, M.; COOLEY, H.; VITALI, A. 1984. Flow Propierties of Concentrated Juices at Low Temperatures. Food Technology. 38 (3): 113-119. U.S.A.

RAO M.; RIZVI, S. 1985. Engineering Properties of Foods. Marcel Dekker, Inc. U.S.A.

RHA, C. 1978. Rheology of Fluid Foods. Food technology. Vol. 32. No. 7. Pp. 77-82. U.S.A.

SALAZAR G.; RIANO H.; ARCILA P.; PONCED, C.A. 1994. Estudio Morfológico Anatómico y Ultraestructural del fruto de Café Coffea arabica L.CENICAFE. 45 (3): 93-105. Chinichiná, Colombia.

SANTOYO C., et al. 1994. Sistema Agroindustrial Café en México. Diagnóstico, problemáticas y alternativas. CIESTAAM-UACH. Chapingo, México.

SARAVACOS, G. 1970. Efect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. Journal of Food Science. 35 (2): 122-125. U.S.A.

SIVETZ, M. 1979. Coffe processing technology journal of food science. Vol.2, No 3. U.S.A.

VASQUEZ, R. 1996. Descontaminación de las aguas residuales del beneficiado húmedo del café. ICAFE, Vol. 10, No. 23. Costa Rica.

VERNON, C.; TORRE, B.; LEVER, G. 1985. Propiedades Reológicas de Emulsiones Alimenticias. Rev. Tecnología Alimentaria. Vol. 18, No. 1. México, D.F.

VITALI A.; ROIG S.; RAO M. 1974. Viscosity Behavior of Concentrated Passion Fruit Juice. Rev. CONFRUCTA, Vol. 19, No. 5. U.S.A.

WHISTLER, R. 1993. Introduction to Industrial Gums. En "Industrial Gums Polysaccharides and their Derivates". Third Edition. Whistler, R.L. y BeMiller, J.N. Academic Press Inc. U.S.A.

ANEXO

Anexo 1. Cálculos para m y η a 7% y 5°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
0,11100	1,29122	-0,4202	0,38	0,76	0,69897	5
0,.33978	2,18667	-0,4202	0,38	0,76	1	10
0,56857	3,70311	-0,4202	0,38	0,76	1,30103	20
0,79735	6,27118	-0,4202	0,38	0,76	1,60206	40
1,02613	10,6202	-0,4202	0,38	0,76	1,90309	80
1,25491	17,9852	-0,4202	0,38	0,76	2,20412	160
1,32857	21,3092	-0,4202	0,38	0,76	2,30103	200

Anexo 2. Cálculos para m y η a 7% y 25°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
0,05841	1,14397	-0,4868	0,326	0,78	0,69897	5
0,29322	1,96434	-0,4868	0,326	0,78	1	10
0,52802	3,37304	-0,4868	0,326	0,78	1,30103	20
0,76282	5,79194	-0,4868	0,326	0,78	1,60206	40
0,99763	9,94553	-0,4868	0,326	0,78	1,90309	80
1,23243	17,0778	-0,4868	0,326	0,78	2,20412	160
1,30802	20,3246	-0,4868	0,326	0,78	2,30103	200

Anexo 3. Cálculos para m y η a 7% y 40°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
0,03854	1,09279	-0.5346	0,292	0,82	0,69897	5
0,28538	1,92922	-0,5346	0,292	0,82	1	10
0,53223	3,40587	-0,5346	0,292	0,82	1,30103	20
0,77907	6,01273	-0,5346	0,292	0,82	1,60206	40
1,02592	10,6149	-0,5346	0,292	0,82	1,90309	80
1,27276	18,7396	-0,5346	0,292	0,82	2,20412	160
1,35223	22,5023	-0,5346	0,292	0,82	2,30103	200

Anexo 4. Cálculos para m y η a 7% y 60°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
0,05136	1,12555	-0,5498	0,282	0,86	0,69897	5
0,31025	2,04291	-0,5498	0,282	0,86	1	10
0,56913	3,70796	-0,5498	0,282	0,86	1,30103	20
0,82802	6,73009	-0,5498	0,282	0,86	1,60206	40
1,08691	12,2154	-0,5498	0,282	0,86	1,90309	80
1,34579	22,1714	-0,5498	0,282	0,86	2,20412	160
1,42913	26,8618	-0,5498	0,282	0,86	2,30103	200

Anexo 5. Cálculos para m y η a 10% y 5°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
0,9824	9,60288	0,47914	3,014	0,72	0,69897	5
1,19914	15,8177	0,47914	3,014	0,72	1	10
1,41588	26,0546	0,47914	3,014	0,72	1,30103	20
1,63263	42,9167	0,47914	3,014	0,72	1,60206	40
1,84937	70,6916	0,47914	3,014	0,72	1,90309	80
2,06611	116,442	0,47914	3,014	0,72	2,20412	160
2,13588	136,737	0,47914	3,014	0,72	2,30103	200

Anexo 6. Cálculos para m y η a 10% y 25°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
0,82814	6,73199	0,31091	2,046	0,74	0,69897	5
1,05091	11,2436	0,31091	2,046	0,74	1	10
1,27367	18,7788	0,31091	2,046	0,74	1,30103	20
1,49643	31,3639	0,31091	2,046	0,74	1,60206	40
1,71919	52,3832	0,31091	2,046	0,74	1,90309	80
1,94195	87,4892	0,31091	2,046	0,74	2,20412	160
2,01367	103,197	0,31091	2,046	0,74	2,30103	200

Anexo 7. Cálculos para m y η a 10% y 40°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
0,70114	5,02504	0,15594	1,432	0,78	0,69897	5
0,93594	8,62865	0,15594	1,432	0,78	1	10
1,17075	14,8165	0,15594	1,432	0,78	1,30103	20
1,40555	25,4419	0,15594	1,432	0,78	1,60206	40
1,64035	43,6871	0,15594	1,432	0,78	1,90309	80
1,87516	75,0165	0,15594	1,432	0,78	2,20412	160
1,95075	89,2784	0,15594	1,432	0,78	2,30103	200

Anexo 8. Cálculos para m y η a 10% y 60°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
0,6045	4,02249	0,05231	1,128	0,79	0,69897	5
0,84231	695519	0,05231	1,128	0,79	1	10
1,08012	12,026	0,05231	1,128	0,79	1,30103	20
1,31794	20,7939	0,05231	1,128	0,79	1,60206	40
1,55575	35,9542	0,05231	1,128	0,79	1,90309	80
1,79356	62,1676	0,05231	1,128	0,79	2,20412	160
1,87012	74,152	0,05231	1,128	0,79	2,30103	200

Anexo 9. Cálculos para m y η a 20% y 5°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
2,45255	283,499	2,11705	130,932	0,48	0,69897	5
2,59705	395,408	2,11705	130,932	0,48	1	10
2,74154	551,493	2,11705	130,932	0,48	1,30103	20
2,88603	769,192	2,11705	130,932	0,48	1,60206	40
3,03053	1072,83	2,11705	130,932	0,48	1,90309	80
3,17502	1496,32	2,11705	130,932	0,48	2,20412	160
3,22154	1665,48	2,11705	130,932	0,48	2,30103	200

Anexo 10. Cálculos para m y η a 20% y 25°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
2,23727	172,689	1,84584	70,12	0,56	0,69897	5
2,40584	254,59	1,84584	70,12	0,56	1	10
2,57442	375,335	1,84584	70,12	0,56	1,30103	20
2,743	553,344	1,84584	70,12	0,56	1,60206	40
2,91157	815,779	1,84584	70,12	0,56	1,90309	80
3,08015	1202,68	1,84584	70,12	0,56	2,20412	160
3,13442	1362,76	1,84584	70,12	0,56	2,30103	200

Anexo 11. Cálculos para m y η a 20% y 40°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
1,96374	91,9907	1,5164	32,84	0,64	0,69897	5
2,1564	143,352	1,5164	32,84	0,64	1	10
2,34906	223,389	1,5164	32,84	0,64	1,30103	20
2,54172	348,114	1,5164	32,84	0,64	1,60206	40
2,73438	542,476	1,5164	32,84	0,64	1,90309	80
2,92704	845,357	1,5164	32,84	0,64	2,20412	160
2,98906	975,13	1,5164	32,84	0,64	2,30103	200

Anexo 12. Cálculos para m y η a 20% y 60°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
1,92431	84,0069	1,44902	28,12	0,68	0,69897	5
2,12902	134,591	1,44902	28,12	0,68	1	10
2,33372	215,633	1,44902	28,12	0,68	1,30103	20
2,53842	345,475	1,44902	28,12	0,68	1,60206	40
2,74312	553,499	1,44902	28,12	0,68	1,90309	80
2,94782	886,782	1,44902	28,12	0,68	2,20412	160
3,01372	1032,09	1,44902	28,12	0,68	2,30103	200

Anexo 13. Cálculos para m y η a 30% y 5°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
2,84764	704,111	2,54009	346,812	0,44	0,69897	5
2,98009	955,2	2,54009	346,812	0,44	1	10
3,11255	1295,83	2,54009	346,812	0,44	1,30103	20
3.245	1757,93	2,54009	346,812	0,44	1,60206	40
3,37745	2384,81	2,54009	346,812	0,44	1,90309	80
3,50991	3235,24	2,54009	346,812	0,44	2,20412	160
3,55255	3569,01	2,54009	346,812	0,44	2,30103	200

Anexo 14. Cálculos para m y η a 30% y 25°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
2,76646	584,063	2,43794	274,122	0,47	0,69897	5
2,90794	808,991	2,43794	274,122	0,47	1	10
3,04943	1120,54	2,43794	274,122	0,47	1,30103	20
3,19091	1552,07	2,43794	274,122	0,47	1,60206	40
3,3324	2149,79	2,43794	274,122	0,47	1,90309	80
3,47388	2977,7	2,43794	274,122	0,47	2,20412	160
3,51943	3306,95	2,43794	274,122	0,47	2,30103	200

Anexo 15. Cálculos para m y η a 30% y 40°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
2,69816	499,07	2,35567	226,812	0,49	0,69897	5
2,84567	700,916	2,35567	226,812	0,49	1	10
2,99317	984,398	2,35567	226,812	0,49	1,30103	20
3,14068	1382,53	2,35567	226,812	0,49	1,60206	40
3,28818	1941,69	2,35567	226,812	0,49	1,90309	80
3,43568	2727	2,35567	226,812	0,49	2,20412	160
3,48317	3042,08	2,35567	226,812	0,49	2,30103	200

Anexo 16. Cálculos para m y η a 30% y 60°C

Y		A		B	X	
Log τ	T	Log m	m	η	log (dv/dy)	dv/dy
2,68643	485,769	2,32297	210,361	0,52	0,69897	5
2,84297	696,571	2,32297	210,361	0,52	1	10
2,9995	998,851	2,32297	210,361	0,52	1,30103	20
3,15604	1432,31	2,32297	210,361	0,52	1,60206	40
3,31257	2053,87	2,32297	210,361	0,52	1,90309	80
3,46911	2945,15	2,32297	210,361	0,52	2,20412	160
3,5195	3307,51	2,32297	210,361	0,52	2,30103	200

Anexo 17. Análisis de Varianza para Coeficiente de consistencia - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	$F_{calculado}$	P_{valor}
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentración	186682.	3	62227.3	62.18	0.0000
B:Temperatura	8981.82	3	2993.94	2.99	0.0882
RESIDUOS	9006.16	9	1000.68		
TOTAL (CORREGIDO)	204670.	15			

Todas los F calculados se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 18. Análisis de Varianza para Índice de flujo - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	$F_{calculado}$	P_{valor}
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentración	0,271269	3	0,0904229	120,45	0,0000
B:Temperatura	0,0294188	3	0,00980625	13,06	0,0013
RESIDUOS	0,00675625	9	0,000750694		
TOTAL (CORREGIDO)	0,307444	15			

Todas los F calculados se basan en el cuadrado medio del error residual