



# UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

"CARACTERIZACION REOLOGICA DE LA GOMA DE  
MUCILAGO DEL CAFE"

TESIS PROFESIONAL

Como Requisito Parcial  
para Obtener el Título de

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

DIRECCION ACADEMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



PRESENTA:

ALVARO SOLORZA GOMEZ

CHAPINGO, MEXICO. FEBRERO DE 1997.





La presente tesis titulada caracterización reológica de la goma de mucílago del café realizada por el C. Alvaro Solorza Gómez, estuvo bajo la dirección del M. en C. Teodoro Espinosa Solares y la asesoría del M. en C. Luis Medina Torres y el Dr. Edmundo Brito De la Fuente.

Honorable Jurado:

Presidente:

M. en C. Salvador Valle Guadarrama

Secretario:

M. en C. Luis Medina Torres

Vocal:

Ing. Ignacio Covarrubias Gutiérrez

Suplente:

M. en C. Teodoro Espinosa Solares

Suplente:

Dr. Edmundo Brito De la Fuente



## DEDICATORIA

*A mis padres:*

*Alvaro Solorza Castillo*

Y

*Elvia Gómez Cabrera*

*A mis hermanos:*

*Araceli Solorza Gómez*

Y

*Wilvert Iván Solorza Gómez*



## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres y hermanos por el apoyo pleno e incondicional para la culminación de mi carrera y desde siempre.*

*Sin duda alguna, a la Sra. Inés Peña Miranda por esos consejos, orientaciones, apoyo y sobre todo, el inmenso placer de conocer a tan especial persona que en otro lugar no encontraré. Muchas gracias por todo...*

*Al M. En C. Luis Medina Torres por su orientación y compañía durante la realización de esta tesis.*

*Agradecimientos al Dr. Edmundo Brito De la Fuente por las facilidades brindadas para el desarrollo experimental en las instalaciones del laboratorio L-313 de la Facultad de Química de la UNAM.*

*Al M. En C. Teodoro Espinosa Solares por su orientación, apoyo para la realización de este trabajo y su grata compañía.*

*Así también, agradezco el apoyo financiero otorgado por el Programa de Investigación y Desarrollo en Regiones Cafetaleras (PIRD-CAFE) y al Programa de Investigación en Ingeniería en Alimentos (PUIA) de la UACH.*

*A la Universidad Autónoma Chapingo por permitir mis estudios y concluir esta carrera.*



# INDICE

Indice de cuadros .....	iii
Indice de figuras .....	iv
RESUMEN .....	v
SUMMARY .....	vi
1. INTRODUCCION .....	1
2. REVISION DE LITERATURA .....	3
2.1. Conceptos generales relacionados con la reología .....	3
2.1.1. Viscosidad .....	4
2.1.1.1. Viscosidad Newtoniana .....	5
2.1.1.2. Viscosidad No-newtoniana .....	7
2.1.1.2.1. Flujo independiente del tiempo .....	9
2.1.1.2.2. Flujo dependiente del tiempo .....	11
2.1.2. Factores que afectan la viscosidad .....	13
2.1.2.1. Efecto de la temperatura .....	13
2.1.2.2. Efecto de la concentración .....	14
2.1.3. Estimación de la viscosidad .....	15
2.2. Comportamiento reológico de algunos productos alimenticios .....	17
2.3. Generalidades del producto café .....	22
2.3.1. Importancia .....	22
2.3.2. Morfología, botánica y composición química .....	24
2.3.3. Industrialización .....	25
2.4. Generalidades del mucílago del café .....	27
2.5. El mucílago del café y su posible utilización como hidrocoloide .....	29
3. OBJETIVOS .....	35
3.1. General .....	35
3.2. Particulares .....	35



<b>4. MATERIALES Y METODOS</b> .....	<b>36</b>
4.1. Materiales, reactivos y equipo .....	36
4.1.1. Materiales .....	36
4.1.2. Reactivos .....	36
4.1.3. Equipo .....	36
4.2. Metodología .....	37
4.2.1. Localización del material .....	37
4.2.2. Sitio de experimentación .....	37
4.2.3. Obtencion del material .....	37
4.2.3.1. Preparación del material .....	37
4.2.3.2. Extracción del mucilago de café .....	38
4.2.4. Diseño experimental .....	40
4.2.5. Medición en el reómetro .....	40
4.2.6. Modelo empleado .....	41
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSION</b> .....	<b>42</b>
5.1. Comportamiento reológico .....	42
5.2. Índice de comportamiento de flujo,n .....	54
5.2.1. Efecto de la temperatura sobre n .....	54
5.2.2. Efecto de la concentración sobre n .....	57
5.3. Índice de consistencia .....	57
5.3.1. Efecto de la temperatura sobre k .....	57
5.3.2. Efecto de la concentración sobre k .....	60
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>62</b>
<b>7. SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS</b> .....	<b>63</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>65</b>
<b>ANEXO</b> .....	<b>A1</b>



## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales métodos para estimar la viscosidad .....	15
Cuadro 2. Energía de activación de flujo para algunos alimentos .....	18
Cuadro 3. Principales partes estructurales del fruto de café .....	24
Cuadro 4. Composición química del mucílago de café .....	29
Cuadro 5. Función de los polisacáridos en productos alimenticios .....	31
Cuadro 6. Matriz experimental .....	40
Cuadro 7. Parámetros reológicos de la goma de mucílago del café a diferentes temperaturas y concentraciones.....	42
Cuadro 8. Valores promedio de k y n para la goma de mucílago del café .....	51
Cuadro 9. Valores de la Energía de activación de ko de la goma de mucílago del café a diferentes concentraciones .....	60



## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1. Modelo para el flujo newtoniano .....	6
Fig. 2. Fluidos newtonianos y no-newtonianos .....	11
Fig. 3. Fluidos reopéctico y tixotrópico .....	13
Fig. 4. Diferentes tipos de viscosímetros .....	16
Fig. 5. Constantes reológicas de algunos productos alimenticios .....	21
Fig. 6. Constantes reológicas de algunas soluciones acuosas .....	21
Fig. 7. Diagrama de la técnica de extracción de la goma de mucílago del café .....	39
Fig. 8. Reograma de la goma de mucílago del café al 7% a diferentes temperaturas .....	43
Fig. 9. Reograma de la goma de mucílago del café al 10% a diferentes temperaturas .....	44
Fig. 10. Reograma de la goma de mucílago del café al 20% a diferentes temperaturas .....	45
Fig. 11. Reograma de la goma de mucílago del café al 30% a diferentes temperaturas .....	46
Fig. 12. Reograma de la goma de mucílago del café a 5°C a diferentes concentraciones .....	47
Fig. 13. Reograma de la goma de mucílago del café a 20°C a diferentes concentraciones .....	48
Fig. 14. Reograma de la goma de mucílago del café a 30°C a diferentes concentraciones .....	49
Fig. 15. Reograma de la goma de mucílago del café a 40°C a diferentes concentraciones .....	51
Fig. 16. Diagrama de comparación entre algunos productos alimenticios y el mucílago de café .....	52
Fig. 17. Diagrama de comparación entre algunas soluciones acuosas y el mucílago de café .....	53
Fig. 18. Efecto de la temperatura y la concentración sobre n .....	55
Fig. 19. Efecto de la temperatura sobre n de la goma de mucílago a diferentes concentraciones .....	56
Fig. 20. Efecto de la temperatura y la concentración sobre k .....	58
Fig. 21. Efecto de la temperatura sobre k del mucílago a diferentes concentraciones .....	59





## RESUMEN

Se presenta un estudio que incluye la extracción y caracterización reológica de la goma de mucílago del café. El mucílago utilizado provino del beneficiado mediante un desmucilagador mecánico. El comportamiento reológico de dicha goma, fue estudiado en función de la temperatura (5, 20, 30 y 40°C) y la concentración (7, 10, 20 y 30%). Las determinaciones reológicas de cizalla simple se realizaron en un rango de velocidad de deformación de 5 a 200 s<sup>-1</sup>. De acuerdo a los resultados analizados bajo el modelo de la ley de la Potencia, la goma de mucílago del café presentó un comportamiento pseudoplástico, es decir, su viscosidad de cizalla disminuye conforme incrementa la velocidad de deformación. Las soluciones evaluadas presentaron valores de k de 0.287 Pa s<sup>n</sup> a 345.857 Pa s<sup>n</sup> y el valor de n de obtenido varió 0.43 a 0.80. La concentración mostró un marcado efecto sobre las propiedades de flujo del material; el índice de consistencia, k, se vió incrementado conforme la concentración también lo hacía. En cuanto al índice de comportamiento de flujo, n, éste fue disminuyendo conforme la concentración aumentaba. El fenómeno de la pseudoplasticidad fue más evidente a mayor concentración, lo cuál es una situación típica en las soluciones poliméricas. El valor de n fue prácticamente constante en el rango de temperatura estudiado. Sin embargo, a concentraciones de 20% y 30%, n aumentó considerablemente. El índice k fue afectado fuertemente por la temperatura, cuyo valor disminuyó conforme el valor de la temperatura aumentó



## SUMMARY

Rheological properties of coffee mucilage gum is presented as a function of concentration (7, 10, 20 and 30% and temperature (5, 20, 30 and 40°C). Coffee mucilage gum was obtained by a mechanical mucilage-extractor machine. Rheological properties were evaluated at constant shear-rate in the range of 5 to 200 s<sup>-1</sup>. Power law model applied to experimental data has shown that coffee mucilage gum has a shear-thinning behaviour. Consistence index, varies from 0.287 Pa s<sup>n</sup> to 345.857 Pa s<sup>n</sup>, and behaviour index took values between 0.43 to 0.80. As it was expected consistence index, k, increases as concentration does. Behaviour index, n, was also modify by concentration, which decreases as concentration increases. Pseudoplasticity was more evident to higher concentration, which is a typical situation for polymeric solutions. With respect to temperature, the index n was practically constant on the range of temperature. However, the index n increases considerably at concentrations of 20 and 30%. The index k was affected strongly with temperature, generally decreases as temperature increases.



# 1. INTRODUCCION

El flujo de fluidos, la transferencia de calor y de masa, la concentración y la deshidratación son considerados como los fenómenos de transporte más importantes dentro del procesamiento de los alimentos (Rao y Rizvi, 1986). En la mayoría de las operaciones ingenieriles, es esencial el conocimiento de la viscosidad, función material necesaria para comprender todos los procesos de flujo. En los procesos que implican calentamiento, congelamiento, homogenización y concentración, así como procesos de fermentación industrial, la viscosidad de cizalla del fluido llega a cambiar considerablemente (Lewis, 1987).

Las propiedades de flujo de los alimentos son determinados para un número de propósitos, tales como el control de calidad, entendimiento de la estructura, correlación con la evaluación sensorial y el diseño y selección de los procesos ingenieriles (Rao y Rizvi, 1986).

Diversos alimentos, tales como la leche, jarabes, jugos clarificados y aceites vegetales, reológicamente hablando, son fluidos Newtonianos. Para estos alimentos, el conocimiento de su viscosidad en función de la temperatura y la concentración es suficiente para el diseño ingenieril. Sin embargo, una gran cantidad de alimentos fluidos son de naturaleza no-Newtoniana. La clasificación, las propiedades y la aplicabilidad de los modelos de este tipo de fluidos ha sido discutido recientemente en distintas investigaciones (Rao y Anantheswaran, 1982).

El presente proyecto surge de la necesidad de encontrar algunas alternativas del beneficiado del café con respecto al aprovechamiento de los subproductos que se generan a partir de las implementaciones tecnológicas que optimizan la transformación de este producto. El trabajo está orientado hacia el conocimiento de las propiedades reológicas del mucílago de café que como subproducto proveniente del beneficiado húmedo y como uno de los principales agentes de contaminación ambiental, pueda presentar alternativas de conversión a un producto de valor agregado con fines industriales. El avance en el conocimiento de las propiedades funcionales del material



permitirá generar parámetros que sirvan en el diseño y/o selección de equipos y así dar origen a su participación en los procesos industriales, además de marcar el comienzo de futuras investigaciones en las que se logre concretar finalmente la aplicabilidad de este material.



## **2. REVISION DE LITERATURA**

### **2.1. CONCEPTOS GENERALES RELACIONADOS CON LA REOLOGIA.**

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 el porque algunos materiales se comportan mecánicamente diferente, es la viscosidad. Esto origina a la generación de conocimientos acerca de las conductas de los materiales entorno 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 Déborah 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, 1986 y Lewis, 1987).



De « 1 : Comportamiento fluido

De = 1 : Comportamiento viscoelástico

De » 1 : Comportamiento sólido

donde De: Índice de Déborah

Débora era una profetisa del Antiguo testamento que comentaba:

*Señor, a tu salida de Seir,  
cuando caminabas por los campos de Edom,  
temblaron los cielos y las tierras  
y las nubes destilaron agua.  
las montañas, incluso el Siná, fluyeron  
delante del Señor, Dios de Israel.*

Así pues, en la escala infinita del tiempo de Dios, hasta las montañas fluyen, de ahí lo del número de Débora; pero incluso en las condiciones en que transcurre la vida cotidiana, cualquier sustancia puede exhibir todo tipo de propiedades reológicas y comportarse como un sólido y como un líquido, aunque siempre predomine uno de estos tipos de comportamiento.

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).

### **2.1.1. 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, yogurth, 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.

#### **2.1.1.1. Flujo Newtoniano.**

El comportamiento de flujo de algunos fluidos puede ser caracterizado por un solo parámetro, la viscosidad newtoniana, la cuál está definida como (Vernon et al ,1985; Rao y Rizvi, 1985):

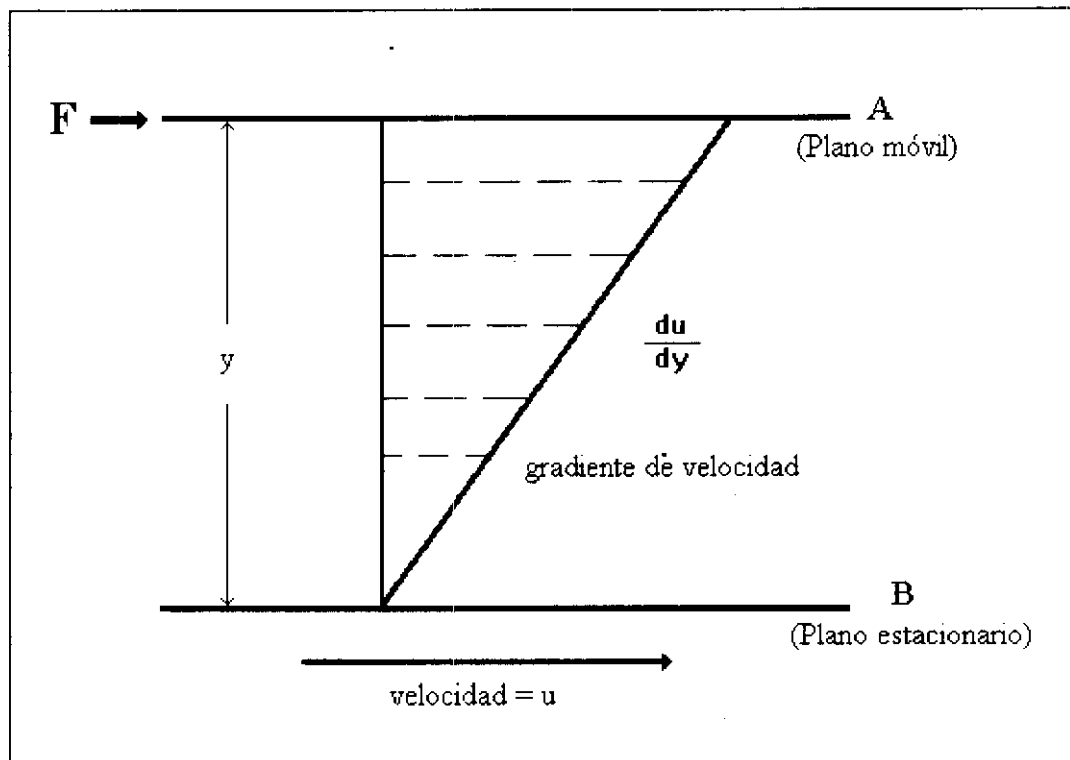
$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \dots (1)$$

donde existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante  $\tau$  y la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ .

El flujo Newtoniano de fluidos en general se puede comprender de la siguiente manera (Vernon et al ,1985; Rao y Rizvi, 1985):

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,  $\tau$ ) al plano superior, mientras que el plano inferior se mantiene estacionario, el plano superior se moverá con una velocidad constante  $v$  (ver Fig 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 dividido 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, 1985).



Toledo, 1980; Lewis, 1987

**Fig. 1. Modelo para el flujo Newtoniano.**





En un fluido newtoniano, la viscosidad del líquido  $\mu$  está dada por la relación  $\tau/\dot{\gamma}$  y ésta se mantiene constante (Vernon et al, 1985; Lever y Torreblanca, 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, Lever y Torreblanca, 1985; Lewis, 1985).

#### 2.1.1.2. Flujo no-Newtoniano.

En flujo no-Newtoniano la viscosidad varía conforme se cambia la velocidad de corte. Es decir, el esfuerzo cortante  $\tau$  y la velocidad de corte  $\dot{\gamma}$  no están relacionadas linealmente (Lever y Torreblanca, 1985). Este tipo de flujo viene descrito por la ecuación:

$$\mu = \tau \dot{\gamma} \quad \dots \quad (2)$$

lo que significa que el esfuerzo cortante  $\tau$  es igual a la velocidad de corte  $\dot{\gamma}$  multiplicada por la viscosidad  $\mu$  que está en función de la velocidad de corte.

Existen numerosos líquidos, frecuentemente empleados en la industria alimentaria donde esta relación tan simple (Ec. 2) no se cumple (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 interactuar 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  $\mu$  Newtoniano), se emplea el coeficiente de viscosidad aparente  $\mu_{app}$  que se define como la tensión tangencial dividida por la



velocidad de deformación (Muller, 1973):

$$\mu_{app} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \dots (3)$$

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 de  $\tau$  en función de  $\dot{\gamma}$  o de  $\mu_{app}$  en función de  $\dot{\gamma}$ .

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:

- a. La naturaleza de la fase continua y dispersa.
- b. La interacción partícula-partícula y la interacción partícula-solvente.
- c. 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:

A) Fluidos en los que el esfuerzo cortante es independiente del tiempo o duración de la acción cortante (tiempo-independientes) y,



B) Fluidos en los que el esfuerzo cortante depende del tiempo o duración de la acción cortante (tiempo-dependientes).

Para el caso de los primeros, la  $\mu_{app}$  dependerá solamente del índice de corte, mientras que para los últimos, también  $\mu_{app}$  dependerá de la duración de corte (Rao y Rizvi, 1986).

#### **2.1.1.2.1. Flujo independiente del tiempo.**

##### **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 rearrreglo 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 corte aumenta en proporciones más altas que el esfuerzo cortante, de manera que la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de corte (ver Fig. 2). A cada valor de  $\tau$  le corresponde otro de  $\dot{\gamma}$  y a la inversa (Muller, 1973; Rao y Rizvi, 1985). 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  $\mu_{app}$  al aumentar el esfuerzo cortante (Geankoplis, 1986). El comportamiento pseudoplástico es debido a la presencia de (Rha, 1978):

1. Compuestos de alto peso molecular o partículas grandes con suficiente concentración.
2. Alta interacción entre las partículas, causando agregación o asociación por enlazamiento secundario.
3. Alta proporción axial y asimétrica de partículas requiriendo orientación a lo largo de la línea de flujo.



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

5. La no rigidez o flexibilidad de las partículas las cuáles pueden cambiar geométrica o conformacionalmente.

### **Dilatancia.**

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  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$  están unívocamente relacionados (espesamiento en estado estacionario).  $\mu_{app}$  aumenta al aumentar  $\dot{\gamma}$ . En la Fig. 2 se muestra gráficamente el comportamiento de estos fluidos.

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 (Geankolpis, 1986).

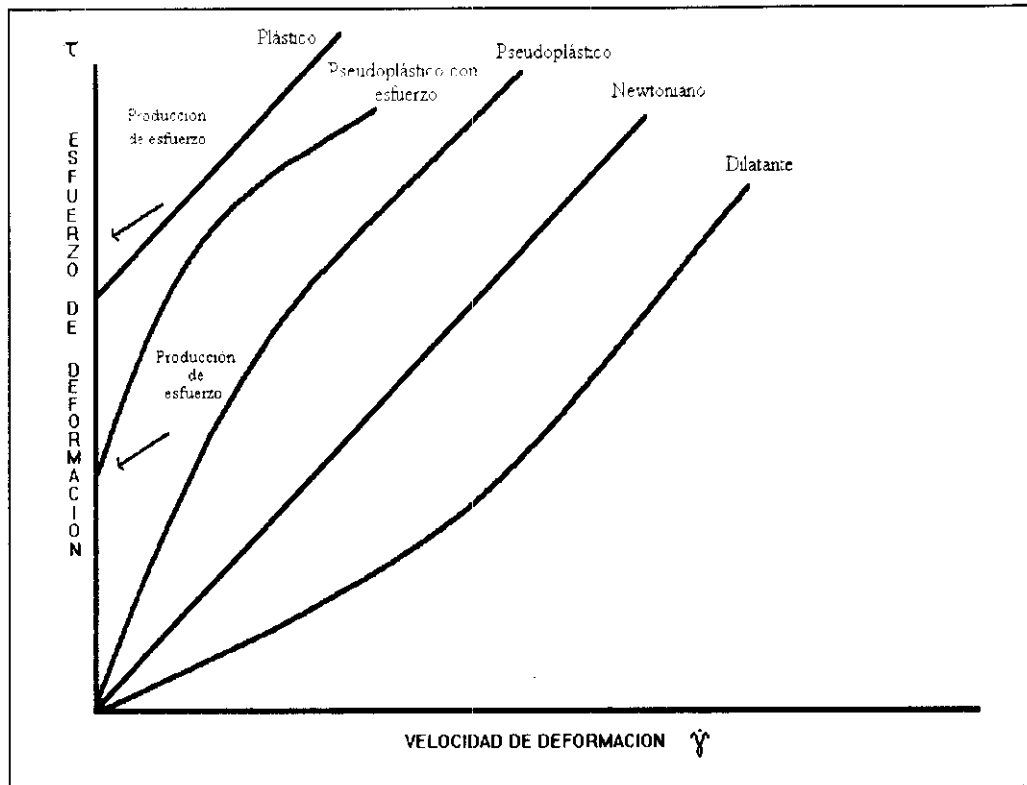
El fenómeno de dilatancia también es del resultado de los factores que interviene en un fluido pseudoplástico; sin embargo, la concentración y la variación en la forma de los materiales juega un papel crítico en esta conducta. La dilatancia puede ser visualizada como partículas de variado tamaño y forma 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 corte, 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, 1986):

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad \dots (4)$$

donde  $k$  y  $n$  son constantes,  $k$  se denomina **índice de consistencia** y  $n$  **índice de comportamiento de flujo**. Este último constituye una medida del grado de desviación del comportamiento

Newtoniano. Si  $n=1$ , el producto es Newtoniano y  $k=\mu$ ; si  $n>1$ , se produce un espesamiento y el producto es dilatante; si  $n<1$ , se produce aclaramiento y el material es pseudoplástico. Esta ley se aplicará cuando se demuestre experimentalmente que el comportamiento del producto no depende del tiempo (Muller, 1979; Vitali y Rao, 1974; Rao y Rizvi, 1985).



Muller, 1973; Lewis, 1987; Rao y Rizvi, 1985

**Fig 2. Fluidos Newtonianos y No-newtonianos**

#### 2.1.1.2.2. Flujo dependiente del tiempo.

##### **Tixotropia.**

La tixotropia 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  $\mu_{app}$  descende



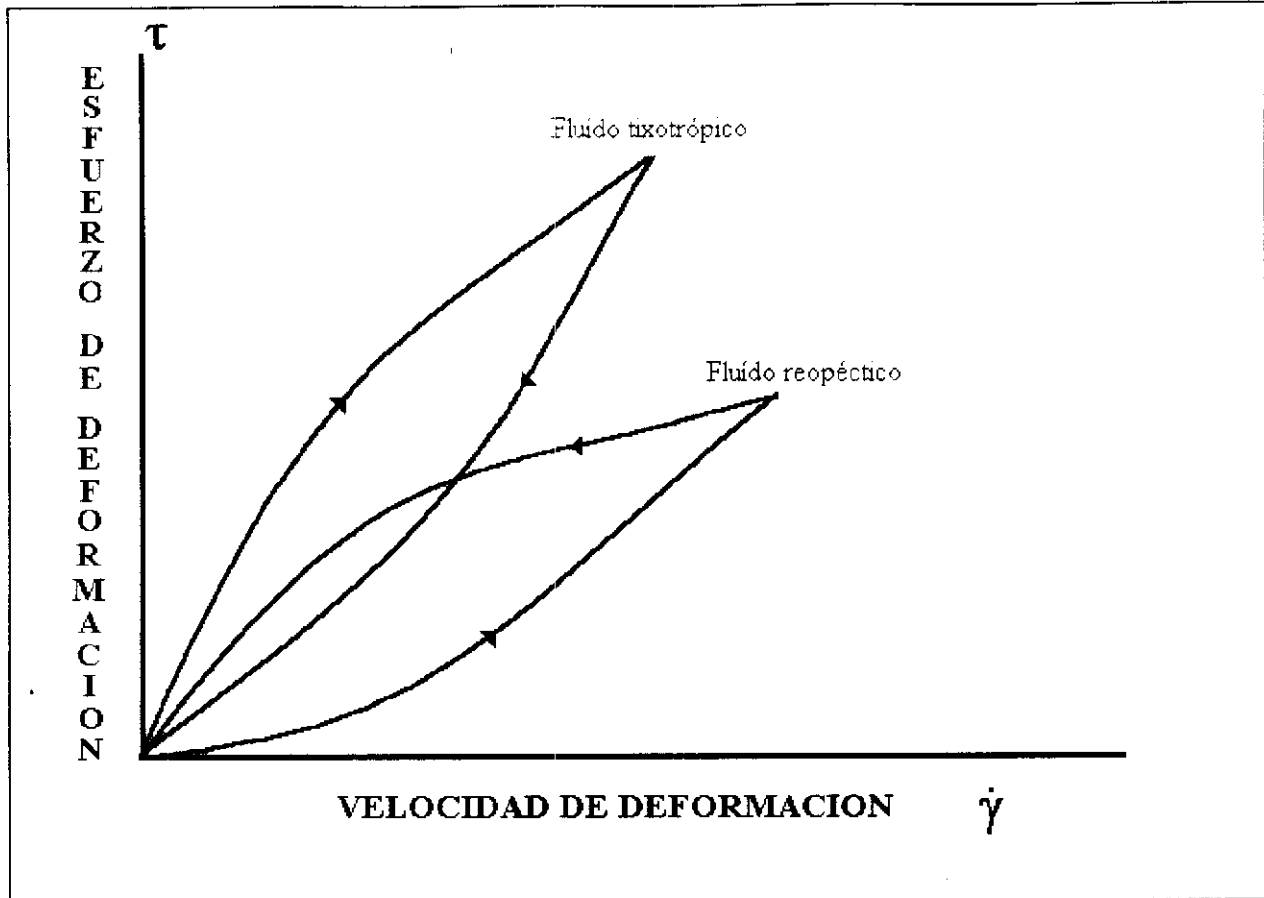
a medida que aumenta la velocidad de deformación. Difiere, sin embargo, de ella en que el descenso  $\mu_{app}$  no está relacionado exclusivamente con la velocidad de deformación, sino también con el tiempo. *Manteniendo constante la velocidad de deformación,  $\mu_{app}$  desciende con el tiempo de manera que  $\mu_{app}$  no depende sólo de la velocidad, sino también de la duración de la deformación.*

Si las representaciones de  $\tau$  en función de  $\dot{\gamma}$  son dependientes del tiempo, terminan formando un bucle, el bucle de histeresis (proceso de deformación en el que las fases de carga y descarga no coinciden (Muller, 1973; Rao y Rizvi, 1985).

### **Reopexia.**

La reopexia es un espesamiento dependiente del tiempo, en el que es curvilíneo el diagrama  $\tau$ - $\dot{\gamma}$  y en el que estos dos parámetros no están unívocamente relacionados. Existen dos valores de  $\dot{\gamma}$  para cada valor de  $\tau$  y a la inversa, si se hacen rutinariamente pruebas cíclicas. La reopexia es el fenómeno inverso de la tixotropía; es necesario un riguroso control del tiempo en las determinaciones. En la Fig. 3 se presentan gráficamente las curvas de estos fluidos (Muller, 1973; Rao y Rizvi, 1985).

Los factores que contribuyen a que se dé la tixotropía 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 rearrreglo estructural del sistema. La tixotropía indica un continuo adelgazamiento o rearrreglo de la estructura con reducida resistencia al flujo, mientras que la reopexia implica el espesamiento o rearrreglo estructural con alta resistencia al flujo (Rha, 1978).



Muller, 1973

**Fig 3. Fluidos reopéctico y tixotrópico.**

## 2.1.2. Factores que afectan la viscosidad.

### 2.1.2.1. 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, 1979; Vitali y Rao, 1974; Rao y Rizvi, 1985).



Normalmente, la ecuación que describe éste fenómeno es la llamada de Arrhenius. La misma adquiere la siguiente expresión:

$$\mu_{app} = A \exp(Ea/RT) \quad \dots (5)$$

donde  $\mu$  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 °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 et al, 1995):

$$k = k_0 \exp(Ea/RT) \quad \dots (6)$$

donde k es el índice de consistencia y  $k_0$  una constante.

#### **2.1.2.2. Efecto de la concentración.**

Otro factor que afecta la viscosidad es la concentración de sólidos, la cuál al aumentar produce un incremento de la viscosidad. Esto al igual que la temperatura, repercute en ciertas operaciones unitarias como la evaporación, ósmosis 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.*, 1974).





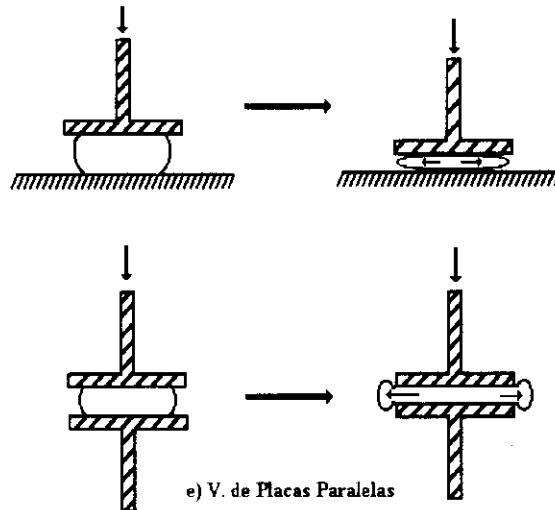
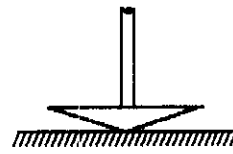
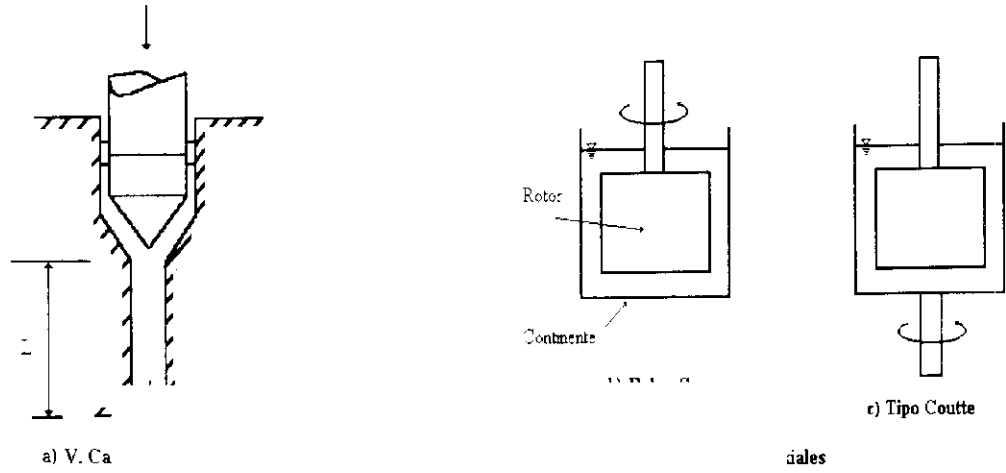
### 2.1.3. Estimación de la viscosidad.

La medición de la viscosidad es descrita de manera resumida en el cuadro que a continuación se presenta:

**Cuadro 1. Métodos para la estimación de la viscosidad.**

METODO	DESCRIPCION	VISCOSIMETRO
Fundamentales	Miden propiedades físicas definidas y que son independientes del instrumento.	Capilar (Fig. 4) Coaxial cilíndrico (fig. 4) - Coutte (Fig. 4) - Bob-Cap (Fig. 4) Cono y Plato (Fig. 4) Placas Paralelas (Fig. 4)
Empíricos	Miden parámetros menos definidos físicamente, pero que son útiles pues se correlacionan con parámetros prácticos de calidad.	Consistensiómetro Adams Consistensiómetro de Botswick
Imitativos	En casos especiales, miden propiedades reológicas bajo condiciones geométricas similares a las que se dan en la práctica.	Brabender viscograph

Barbosa y Peleg (1982).



Barbosa y Peleg, 1982

**Fig. 4. Diferentes tipos de viscosímetros**



## 2.2. COMPORTAMIENTO REOLOGICO 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 (ver cuadro 2).

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 concentrado presentan comportamiento tixotrópico, como es el puré de chabacano; así mismo en jugo de naranja concentrado (Mizrahi y Berk, 1970, consultado por Viali et al., 1974).

La caracterización reológica de los alimentos fluidos puede ser descrita por diversos modelos de flujo (Rao, 1977).

Producto	% sólidos	n	Energía de activación k (Kcal/gmol)	Referencias
Plátano (puré)	-	0.47	6	Charm y Merrill (1959)
Durazno (puré)	11.7	0.34	1.7	Saravacos (1970)
Leche (condensada y azucarada)	-	0.83(25°C)	26.0	Holdsworth (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	
	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 Merrill(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) (25°C)	12°Bx	0.28	13.7	Cervantes (1995)
	16°Bx	0.29	14.2	
	25°Bx	0.27	12.1	
	40°Bx	0.37	13.53	
	60°Bx	0.51	12.9	

Citado por Barbosa y Peleg (1982)

### Cuadro 2. Energía de activación de flujo para algunos alimentos.

Es sabido que los jugos de fruta despectinizados y purées presentan naturaleza pseudoplástica; su comportamiento reológico puede ser descrito por la ley de la potencia (Ec. 4). Ejemplos de este tipo de comportamiento son: jugo de maracuyá (Vitali *et al.*, 1974); jugo de tomate (Rao *et al.*, 1981); jugo de manzana, uva y naranja (Rao *et al.*, 1984); puré de manzana (Saravacos, 1970), pulpa concentrada de mango (Manohar, 1990). Aunque también, otros modelos se han empleado



1981); jugo de manzana, uva y naranja (Rao *et al.*, 1984); puré de manzana (Saravacos, 1970), pulpa concentrada de mango (Manohar, 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  $n$  no es afectado significativamente con la temperatura. Un comportamiento similar se observa en jugo de maracuyá (Vitali *et al.*, 1974; Cervantes, 1995).

En general, el efecto de la temperatura sobre el comportamiento de flujo de los alimentos fluidos puede ser descrito por la ecuación de Arrhenius (Ec. 6) (Rao *et al.*, 1984; Rao y Anantheswaran, 1982; 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  $n$  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 dispersibles en agua de amplia aplicación en la industria alimenticia que serán mencionados con detalle más adelante. 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,

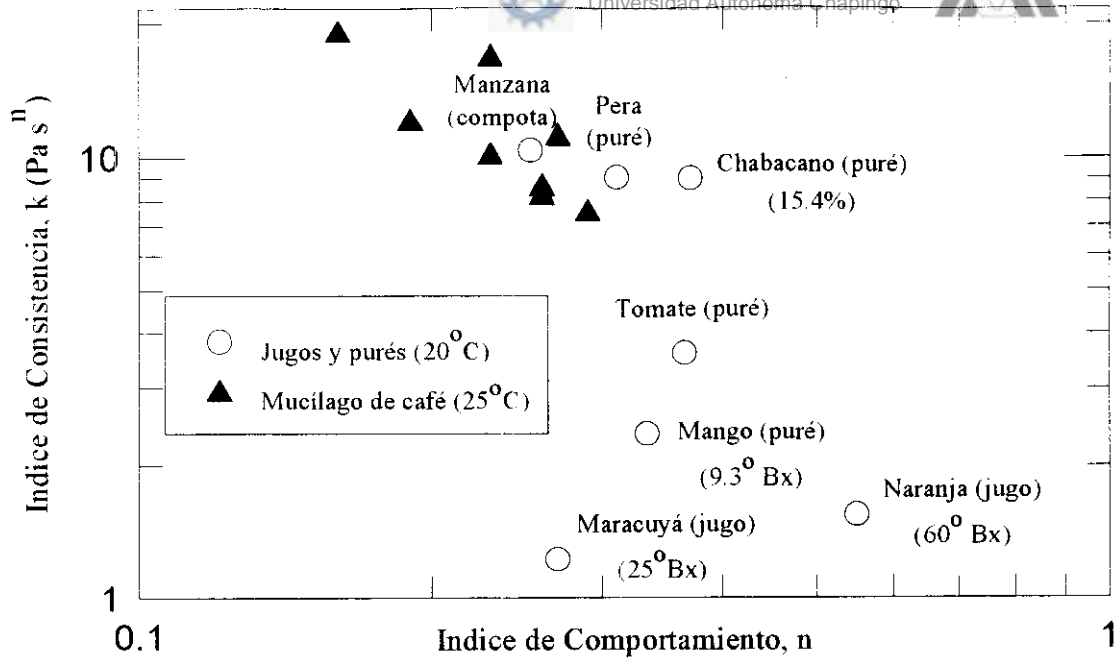
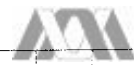


arábica, tragacanta, agar, pectinas, carragenina, celulosa y la goma de algarrobo.

Para su caracterización, del mismo modo también son empleados los modelos anteriormente mencionados y su comportamiento de flujo también es afectado por diversos factores como la temperatura, la concentración, presencia de otras sustancias (sales, azúcares y proteínas), pH del medio, etc.

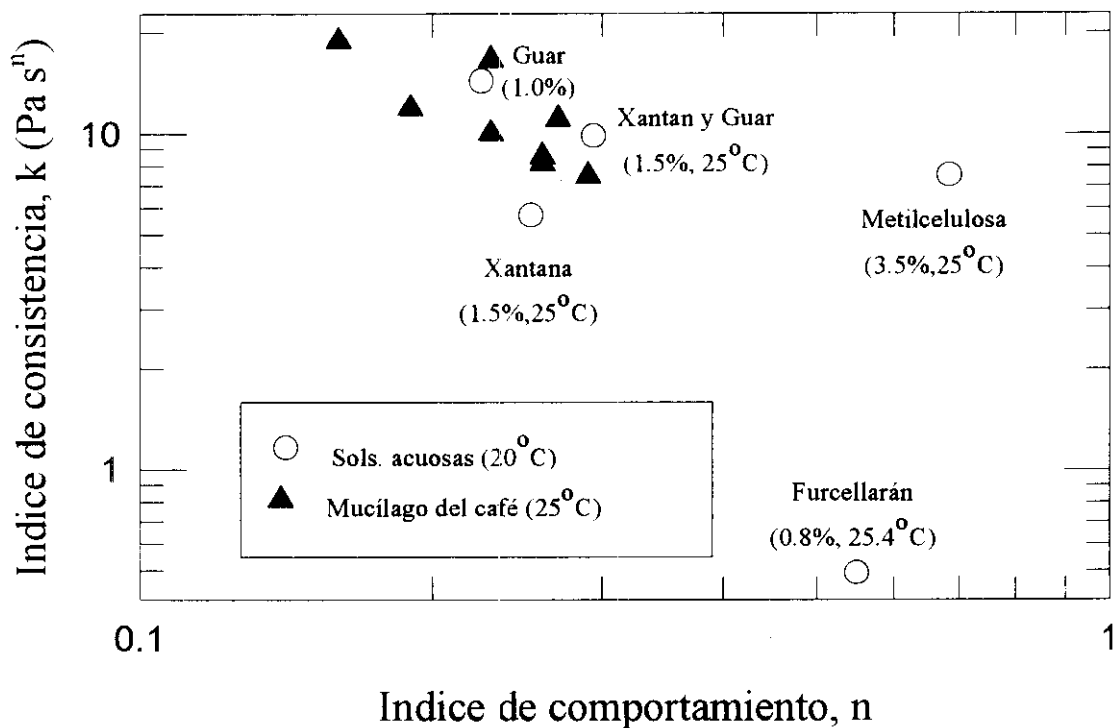
Muy pocos trabajos se han llevado a cabo acerca del comportamiento reológico del mucilago de café. Oliveros y Gunasekaran (1994; 1995) reportan este material como un fluido altamente pseudoplástico, que se explica por el efecto combinado de destrucción de estructuras, el comportamiento reológico del material es afectado significativamente por la concentración de partículas donde el índice  $k$  aumenta significativamente cuando la concentración se incrementa.

Las gráficas de las Figuras 5 y 6 nos muestran los valores de las constantes reológicas que permiten ubicar al mucilago ante diversos alimentos y soluciones acuosas.



**Fig. 5. Constantes reológicas de algunos productos alimenticios y el mucílago del café**

Barbosa y Peleg (1982); Oliveros y Gunasekaran (1994)



**Fig. 6. Constantes reológicas de algunas soluciones acuosas y del mucílago del café**

Barbosa y Peleg (1982); Oliveros y Gunasekaran (1994)



## **2.3. GENERALIDADES DEL PRODUCTO CAFÉ.**

### **2.3.1. Importancia.**

Durante el ciclo cafetalero 1994/1995, la producción obtenida a nivel nacional ascendió a un total de 5.42 millones de Qq (quintales), superior en 6% a la obtenida durante el ciclo 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 cafeticultura genera empleos productivos para mas de dos millones de mexicanos, principalmente para pobladores que habitan en zonas de orografía muy accidentada, lo que dificulta el uso de estas tierras para otro tipo de cultivos. En 1993, se encontró que cerca de 600 000 hectáreas estaban cultivadas de este fruto ubicándose principalmente en los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Nayarit, Hidalgo, Guerrero y San Luis Potosí (Podoswa y Contreras, 1993). Para el ciclo cafetalero 1994/1995, la superficie cosechada ascendió a 615 000 hectáreas, superficie que contrastó favorablemente con las cifras de la superficie cosechada en los dos ciclos anteriores, traduciéndose en un incremento del 5% (Valdés, 1995).

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 (Villaseñor, 1987). 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 C. *et al.*, 1994).





En México, 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, 1994).

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 la producción de Veracruz y Puebla, calculada en 600 mil toneladas para la cosecha 1989/1990, se están degradando 3.5 millones de metros cúbicos por año (INMECAFE, 1993). En un estudio realizado en dos beneficios se observó que el consumo de agua varía en función de la capacidad del beneficio. Así para un beneficio de 60 Qq/día (15 ton/día de café cereza), por cada kilogramo de cereza se gastan 7.87 litros de agua. En cambio en un beneficio de 300 Qq/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 (Jaquet, 1994). 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 (Funes, 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 (Penagos Hnos. & Cía. LTDA, 1994).



### 2.3.2. Morfología, botánica y composición química.

Al fruto del café se le conoce botánicamente como una drupa sincárpica bicarpelar (13), llamada comunmente "cereza". Morfológicamente es ovoidea, subglobulosa, generalmente roja si esta madura (León, 1981). Se compone de las siguientes partes como se demuestra en el cuadro 3 (Díaz, 1993):

**Cuadro 3. Principales partes estructurales del fruto de café.**

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

Díaz, C. (1993)

El pericarpio es la cubierta o película externa del fruto, conocida vulgarmente como piel, cáscara 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 carnoso o mucilaginoso ubicado entre el epicarpio. Se caracteriza por su riqueza en sustancias pécticas y azúcares. Es conocido como mucílago o haba. 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 mucilago 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).



Bioquímicamente, por la presencia de azúcares, proteínas y grasa; la pulpa y el mucilago 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 esta 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).

### **2.3.3. 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 (comunmente al sol), el morteadado, la clasificación y el ensacado. Se obtiene café "natural" de los denominados café arábicas brasileños y los robustas. La vía húmeda, es un procedimiento para la obtención de café "lavado" o "suave", comunmente usado en México y Colombia. 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 (Podoswa y Contreras, 1993; Díaz, 1993; Santoyo, 1994).

Para nuestro caso de estudio, particularmente interesa mencionar el procesamiento del café por beneficiado húmedo ya que se lleva acabo la operación de desmucilaginado cuyo objetivo es el separar la capa mucilaginoso del fruto. Debido a la reciente introducción de maquinaria y equipo a los beneficios del país con el fin de optimizar el procesamiento del café y reducir la contaminación de desechos, y estos aprovecharlos de manera directa para varios fines, es conveniente mencionar algunas descripciones acerca de como operan estos equipos:



Una de las empresas dedicadas a la venta, mantenimiento, servicio y diseño de maquinaria para el mejoramiento de la tecnología del procesamiento de café, Penagos Hnos. & Cía. Ltda., desarrolló 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: el **desmucilagador mecánico ascendente**. Este desmucilagador trabaja en conjunto con una despulpadora cónica vertical, ambos se encuentran integrados en el denominado módulo Penagos; consta de un desmucilagador 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 desmucilagado 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 desmucilagador 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/hr 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 desmucilagador. Con relación al equipo y al desempeño, se tiene las siguientes observaciones:

- El equipo presenta características muy atractivas, tales como su 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 semisurgido y bajo consumo específico de agua.

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



## 2.4. GENERALIDADES DEL MUCILAGO DE CAFÉ.

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, sin embargo, 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 mucílago es un sistema coloidal líquido, liofílico, siendo por lo tanto un hidrogel (Braham y Bressani, 1979; 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, 1979). Sin embargo, no varía en lo que respecta a la altitud en la que se desarrolla el fruto (Rolz *et al.*, 1973).

En composición química, el mucílago contiene agua, pectinas, azúcares y ácidos orgánicos (Clifford, 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, 1979). Nadal (1959) citado por Braham y Bressani (1979) 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, 1979; 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, 1979).



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 Vilanova, 1952; citado por Braham y Bressani, 1979). 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 trímero 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 pectólisis 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 ósmosis 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 péctico). Por consiguiente, las enzimas que están presentes en el mucílago pertenecen principalmente al grupo de las pectinmetilesterasas.

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, 1979). En C.



*arabica* el procesamiento manual de los granos de café maduro resulta en un pH del mucílago 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, 1979; Clifford, 1985).

## **2.5. EL MUCILAGO DE CAFÉ Y SU POSIBLE UTILIZACION COMO SOLUCION HIDROCOLOIDAL**

Los hidrocoloides, coloides hidrofílicos o comunmente conocidos como gomas se caracterizan por modificar las propiedades funcionales de los sistemas alimenticios donde son formulados (Igoe, 1982). Los hidrocoloides son usualmente clasificadas 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: 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 comunmente usados en la industria alimenticia. Tambien, 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



finés, 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 (cuadro5). 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).



**Cuadro 5. Función de los polisacáridos en productos alimenticios.**

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

Medina, 1997

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 (1985) reporta 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  $\beta$ 1-3 ligada a la cadena principal de la galactosa con 2 unidades laterales de Ara- $\beta$ 1-3-Gal-. La manosa muestra ser un polímero lineal de enlace  $\beta$ 1-4 de peso molecular relativamente y grado de sustitución de cadenas laterales bajo. La celulosa se constituye de cadenas de homoglucoza con enlace  $\beta$ 1-4 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, 1985).

La pectina es también considerada un compuesto de constitución polisacárida (35.8% de peso en el fruto) (Braham y Bressani, 1979). En el grano de café se piensa que sea una mezcla y/o combinación química de tres polisacáridos: 1)  $\beta$ 1-3 galactosa lineal; 2) arabinosa de cadena corta con unidades de arabinofuranosa, algunos con enlace  $\beta$ 1-3 y otros con  $\alpha$ 1-5 y 3) el componente mayor,



un polisacárido de alto peso molecular constituido de bloques de  $\alpha$ 1-4 galacturana unidos por dos unidades de  $\alpha$ 1-2 ramnospiranosas. 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, 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 cual esta se precede de una expansión.

De acuerdo con las investigaciones mencionadas, los polisacáridos encontrados en el café, pertenecen a los embriones o granos. Dentro del mecanismo celular, el sistema membranar del retículo endoplásmico, el cuerpo de Golgi y el plasmalema principalmente, son los responsables del transporte y la síntesis de polisacáridos, pues aquí se llevan a cabo una serie de eventos bioquímicos que conllevan a una secuencia de actividades celulares donde los materiales sintetizados son empacados, transportados y depositados en sitios y tiempos definidos dentro del objeto en el que se encuentran (Northcote, 1993). Salazar y colaboradores del CENICAFE (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 columnares afirmándose que sea el origen de la capa mucilaginosa que recubre la semilla recién cosechada.

El mucílago de café como polisacárido, pertenece al grupo de los exudados vegetales, siendo un material hidrocoloidal. Podemos 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 (*Ceratonia 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  $\alpha$ -D-manopiranosil enlazadas a las unidades 1,4- $\alpha$ -D-galactopiranosil que se encuentran en posición lateral de la cadena principal.  $\alpha$ -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.

Oliveros y Gunasekaran (1994), en un 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 desmucilagador 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  $\tau$ . Los valores más altos de  $\tau$  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  $\tau$  es importante en los estudios de desmucilagado 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 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.



### **3. OBJETIVOS:**

#### **3.1. GENERAL:**

Evaluar las propiedades reológicas del mucílago de café.

#### **3.2. PARTICULARES:**

Estudiar la respuesta reológica del material en condiciones de flujo de cizalla simple en función de la temperatura.

Estudiar la respuesta reológica del material en condiciones de flujo de cizalla simple en función de la concentración.



## **4. MATERIALES Y METODOS.**

### **4.1. MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPO.**

#### **4.1.1. Materiales.**

- Recipientes contenedores de plástico (20 L).
- Malla de plástico comercial.
- Malla filtro comercial de tela.
- Papel filtro Whatman No. 1

#### **4.1.2. Reactivos.**

- Azida de sodio marca J.T Backer.
- Acetona marca J.T. Backer.
- Alcohol iso-propílico marca J.T.Backer.

#### **4.1.3. Equipo.**

- Balanza analítica OHAUS GA200.
- Balanza analítica OHAUS I-10
- Balanza analítica METTLER BB3000
- Centrifuga BECKMAN J2-MC
- Baño maria HAAKE
- Reómetro HAAKE CV20N y sensor PK20-4°



## **4.2. METODOLOGÍA.**

### **4.2.1. Localización del material.**

Las muestras de mucílago empleadas en este trabajo provinieron del fruto del café *Coffea arabica* L., variedad caturra, obtenidas en la región de Coatepec, Ver. a una altura de 1200 m.s.n.m. aproximadamente. El material fue colectado directamente de la máquina desmucilagadora del “Beneficio Ecológico Texocolco” ubicado en la misma región. Como forma de asegurar la conservación de las muestras durante la transportación, al sitio de la experimentación y posterior manipuleo, se hizo la adición de Azida de sodio a una concentración de 200 ppm.

### **4.2.2. Sitio de experimentación.**

La caracterización reológica se desarrolló en el laboratorio L-313 del Departamento de Alimentos y Biotecnología de la Facultad de Química “E” de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la supervisión del Dr. Edmundo Brito De la Fuente y el M.C. Luis Medina Torres..

### **4.2.3. Obtencion del material.**

#### **4.2.3.1. Preparación del material.**

La materia prima en el laboratorio, se sometió a una operación térmica con el fin de provocar una desactivación enzimática y así impedir el deterioro del mucílago durante el transcurso de la experimentación. Debido a la presencia de la enzima pectinmetilesterasa que degrada la pectina del mucílago, el tratamiento térmico aplicado fue de 85<sup>0</sup>C durante un 1 min, siendo este el tratamiento adecuado para desactivar dicha enzima. Posteriormente las muestras fueron sometidas a congelacion.



El mucílago obtenido mediante el desmucilaginado mecánico no es un material puro. Además de sus constituyentes químicos (pectinas, azúcares, agua, etc.) contiene estructuras celulares provenientes del propio mesocarpio, básicamente residuos de pergamino, de la película plateada, pulpa, además de fracciones de granos. Por este motivo, se desarrolló un método de extracción para obtener mucílago libre de esos constituyentes. Consistió primeramente de un filtrado con malla comercial de plástico para separar las impurezas mayores, enseguida una segunda separación con malla de tela por filtración a vacío separando las impurezas más pequeñas (finas fibras). Posteriormente una centrifugación a 10 000 rpm durante 10 min. obteniendo de esta operación un sobrenadante conteniendo el mucílago con gran cantidad de agua y el pelet constituido de residuo de pulpa y fibrillas.

#### **4.2.3.2. Extracción de la goma de mucílago del café.**

El método empleado para la extracción del mucílago de café, una vez realizada la primera etapa de aislamiento, fue basado en una extracción mediante el empleo de solventes (Medina, 1997).

1. 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".

2. Se extrajo el mucílago del embudo y se sometió a un segundo centrifugado (10 000 rpm, 10 min.) con el objeto de aumentar la separación de las dos fases. De esta centrifugación, 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.

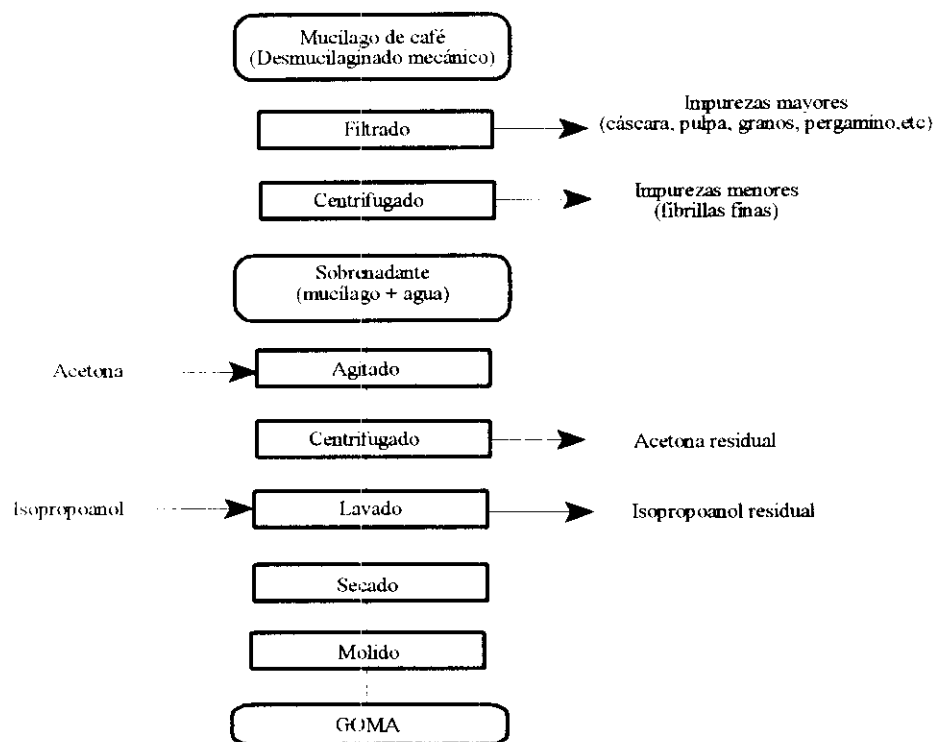
3. Posteriormente se hizo la adición de alcohol n-isopropílico en una relación de 1:1 (w/w) para la



neutralización de la goma.

4. Se dejó secar en deshidratador convencional bajo las condiciones de vacío y temperatura ambiente durante un tiempo de 36 a 48 horas. El grado de secado de las muestras se hizo verificando el peso de estas en balanza analítica.

5. Una vez secadas las muestras, se procedió a la preparación de las soluciones acuosas mediante el uso de agua destilada y agitación manual.



**Fig. 7. Diagrama de la técnica de extracción de la goma del mucílago de café (Medina, 1997)**

#### 4.2.4. Diseño experimental.

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

El siguiente cuadro presenta la matriz experimental empleada:

**Cuadro 6. Matriz experimental.**

TEMPERATURA (°C)	CONCENTRACION (%)			
	7	10	20	30
5	P <sub>1,1</sub>	P <sub>1,2</sub>	P <sub>1,3</sub>	P <sub>1,4</sub>
20	P <sub>2,1</sub>	P <sub>2,2</sub>	P <sub>2,3</sub>	P <sub>2,4</sub>
30	P <sub>3,1</sub>	P <sub>3,2</sub>	P <sub>3,3</sub>	P <sub>3,4</sub>
40	P <sub>4,1</sub>	P <sub>4,2</sub>	P <sub>4,3</sub>	P <sub>4,4</sub>

#### 4.2.5. Medición en el reómetro.

Para la medición de las propiedades de flujo del mucílago de café, se empleó el reómetro HAAKE CV20N en modo rotacional en cizalla simple usando una geometría de cono y placa (sensor PK20-4°).

Una cantidad de 0.5 ml de muestra de cada tratamiento es colocada en el plato de la geometría instalada en el reómetro. A continuación se hace descender el sensor por medio de los controles del equipo, después de haber hecho una calibración del porcentaje de esfuerzo de deformación inicial a aplicar. Enseguida se ejecuta la medición mediante un programa elaborado en el software en el cuál se declararon los parámetros de la de velocidad de deformación en un rango de 1 a 200 s<sup>-1</sup> para las concentraciones de 7 a 20% y de 1 a 50 s<sup>-1</sup> para la concentración de 30%, con 10 registros de lectura por salto. El rango de temperatura empleado fue de 5 a 40°C. Las mediciones se realizaron por



triplicado con la finalidad de obtener una buena representación de la respuesta del material.

#### **4.2.6. Modelo empleado.**

Para la descripción del comportamiento reológico del mucílago de café se emplearon los modelos de las ecuaciones 4 y 6 mediante una regresión lineal simple con la finalidad de obtener las constantes de flujo de interés,  $n$  y  $k$ .

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

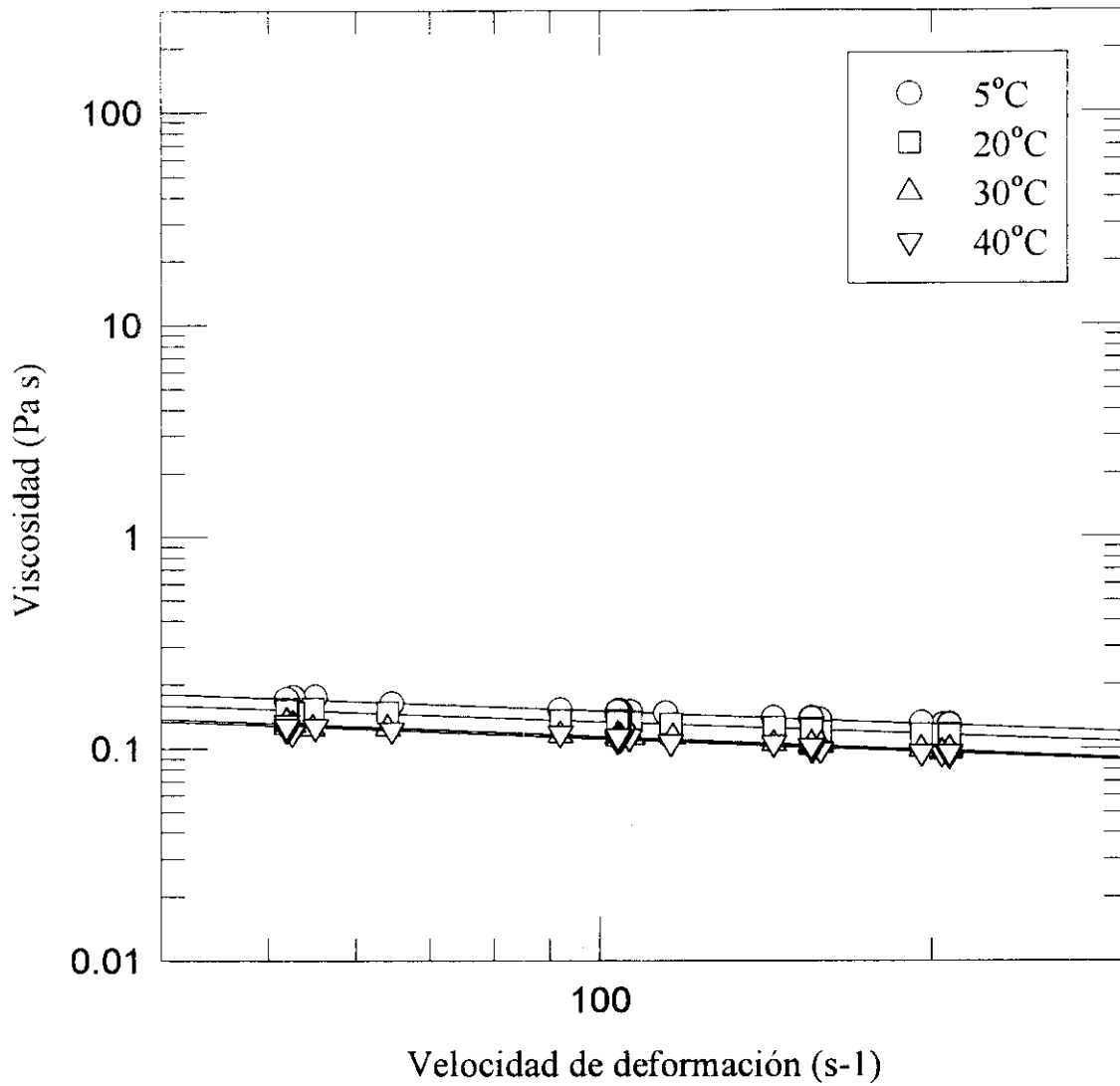
### 5.1. COMPORTAMIENTO REOLOGICO.

De acuerdo con los reogramas que se presentan en las Figuras 8 - 15, se aprecia claramente que la viscosidad de cizalla disminuye conforme se incrementa la velocidad de deformación, por lo que el comportamiento reológico que presenta el mucílago del café es pseudoplástico según el modelo de la ley de la potencia al obtener valores de  $n$  menor a 1 (ver cuadro 7).

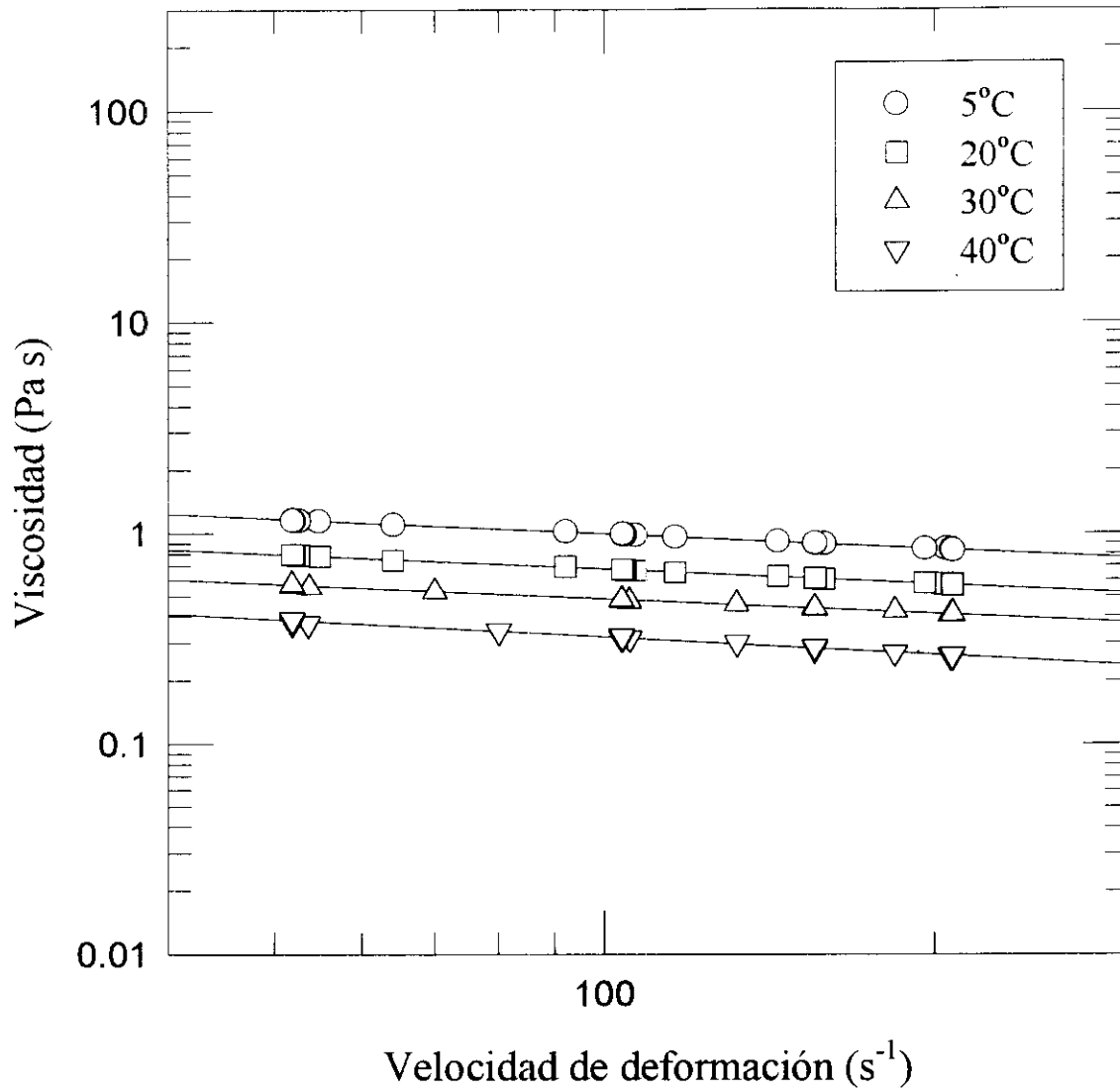
La selección del modelo mencionado fue debido a que ofrece una representación aproximada en la caracterización de este tipo de materiales y por su sencillez al aplicarse, además de considerarse un modelo para propósitos ingenieriles. Los valores de las constantes  $n$  y  $k$  fueron calculados confiablemente, lo cual es demostrado por los altos valores de correlación,  $r^2$  (0.98 - 0.99) observados en el cuadro 7. (Consultar anexo para el análisis de incertidumbre de  $n$  y  $k$ ).

**Cuadro 7. Parámetros reológicos en muestras de goma de mucílago de café a diferente temperatura y concentración.**

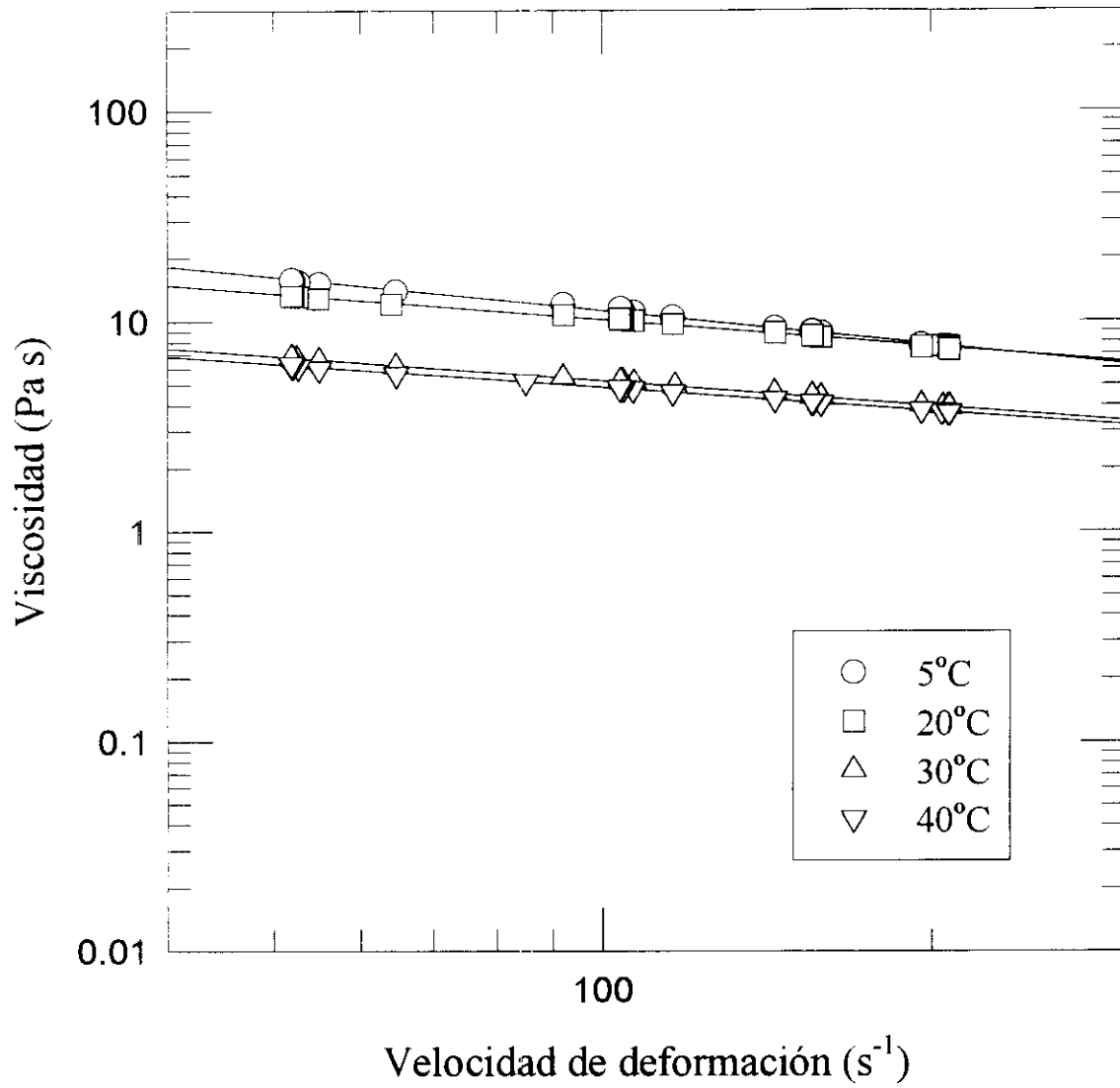
Temperatura (°C)	Concentración (%)							
	7%		10%		20%		30%	
	$n$ (adimensional)	$k$ (Pa s <sup>n</sup> )	$n$ (adimensional)	$k$ (Pa s <sup>n</sup> )	$n$ (adimensional)	$k$ (Pa s <sup>n</sup> )	$n$ (adimensional)	$k$ (Pa s <sup>n</sup> )
5	0.79 (±0.007)	0.382 (±0.013)	0.76 (±0.002)	3.011 (±0.038)	0.46 (±0.013)	130.936 (±8.570)	0.43 (±0.014)	345.857 (±18.564)
20	0.80 (±0.007)	0.326 (±0.011)	0.75 (±0.002)	2.045 (±0.024)	0.58 (±0.009)	69.93 (±3.030)	0.47 (±0.007)	274.412 (±7.152)
30	0.79 (±0.008)	0.296 (±0.012)	0.76 (±0.003)	1.426 (±0.024)	0.60 (±0.003)	32.801 (±0.515)	0.49 (±0.005)	227.409 (±4.302)
40	0.79 (±0.014)	0.287 (±0.019)	0.72 (±0.007)	1.133 (±0.039)	0.62 (±0.003)	27.79 (±0.493)	0.51 (±0.006)	210.375 (±4.7)



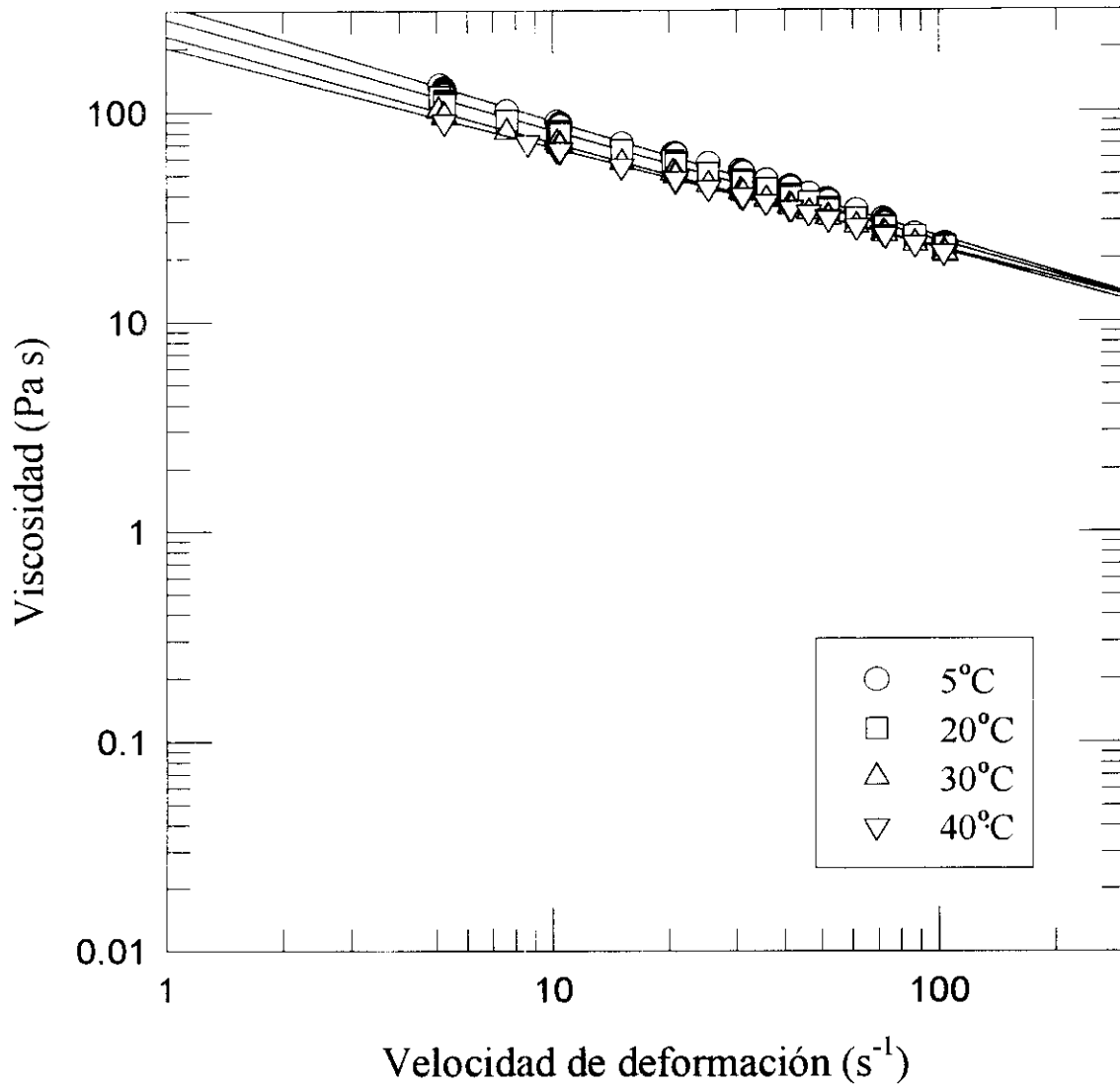
**Fig. 8. Reograma de la goma de mucílago de café a 7% y diferentes temperaturas**



**Fig. 9. Reograma de la goma de mucílago del café a 10% y diferentes temperaturas**

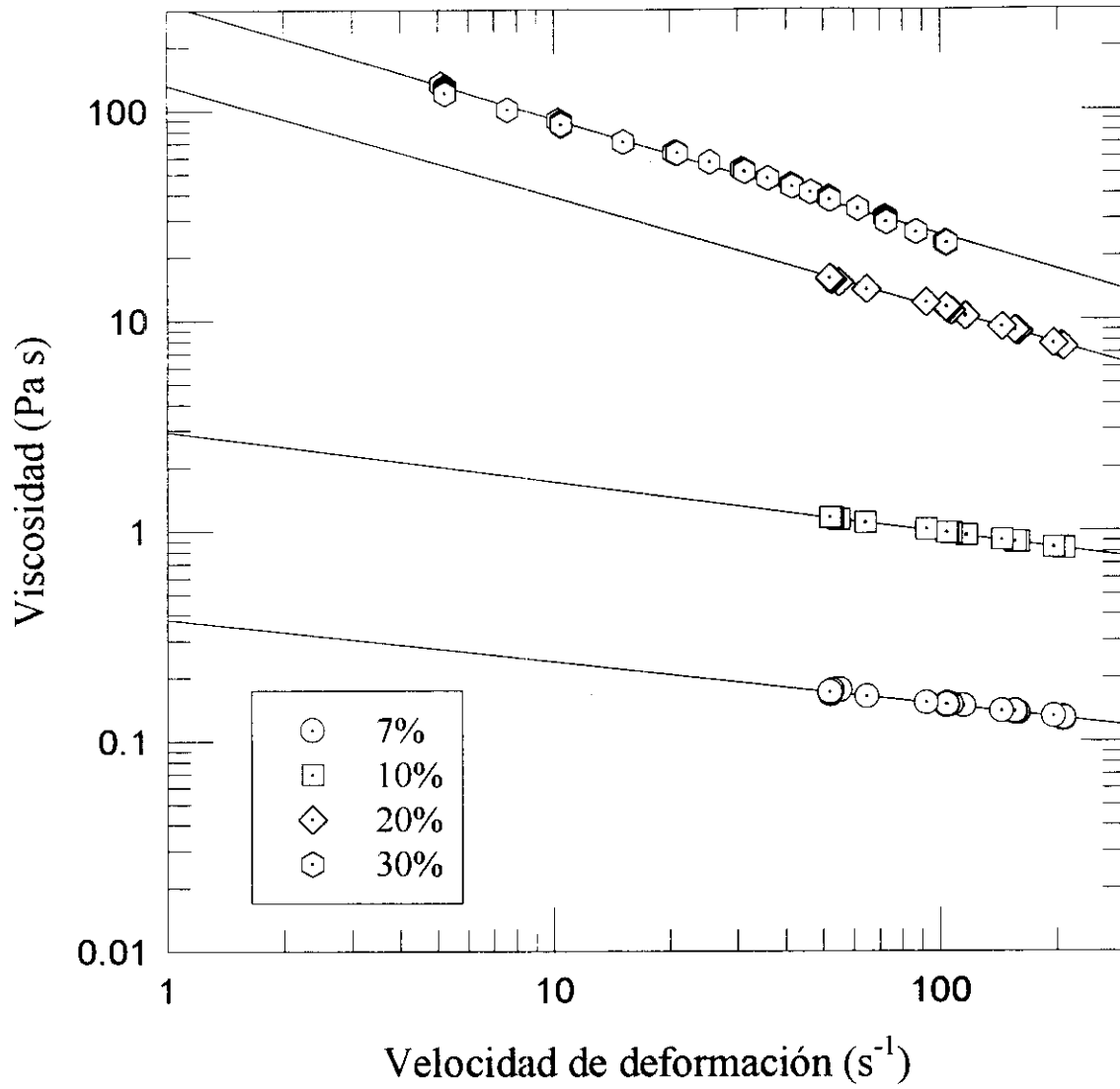


**Fig. 10. Reograma de la goma de mucílago del café a 20% y diferentes temperaturas**

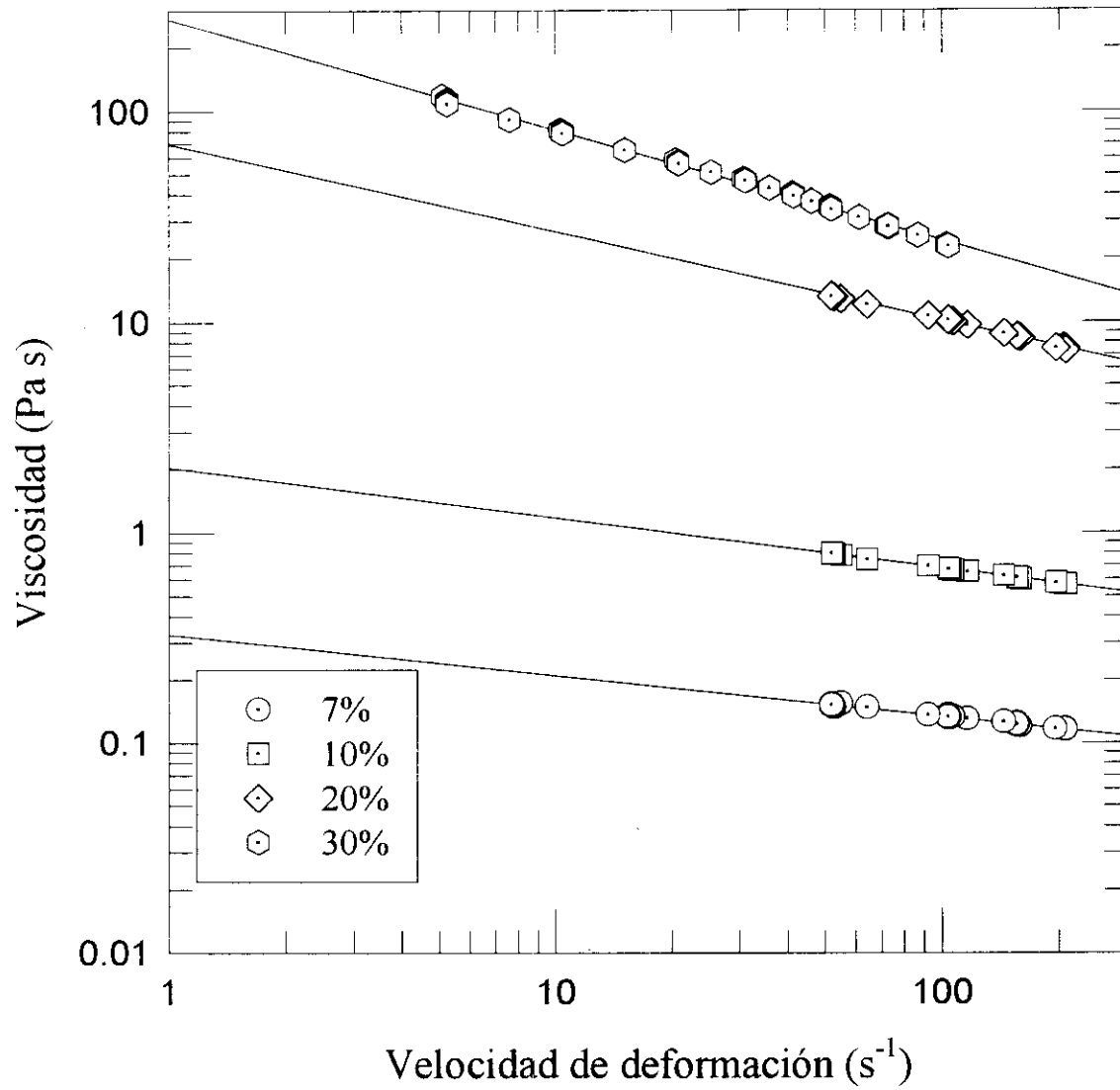


**Fig. 11. Reograma de la goma de mucílago del café a 30% y diferentes temperaturas**

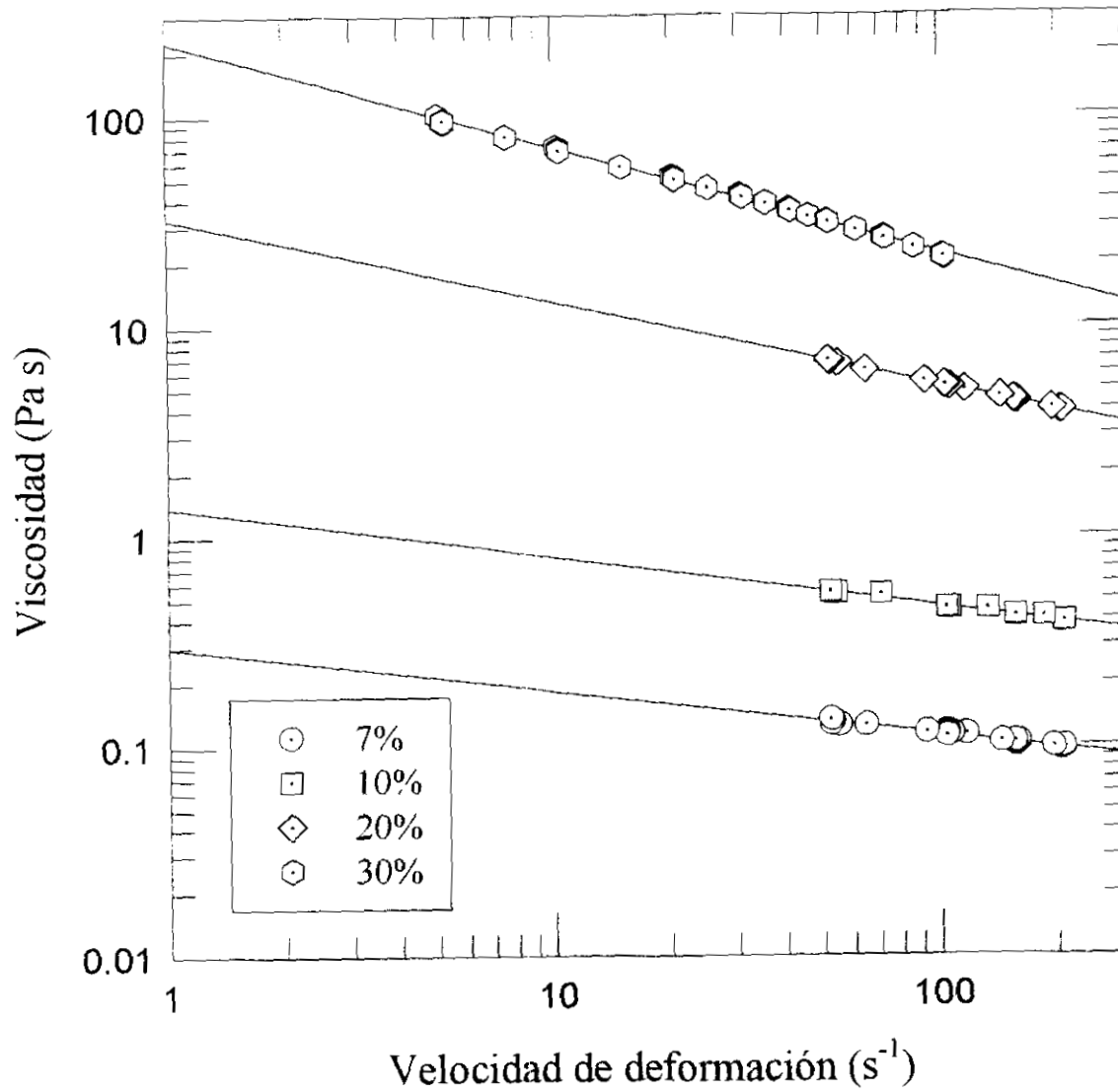




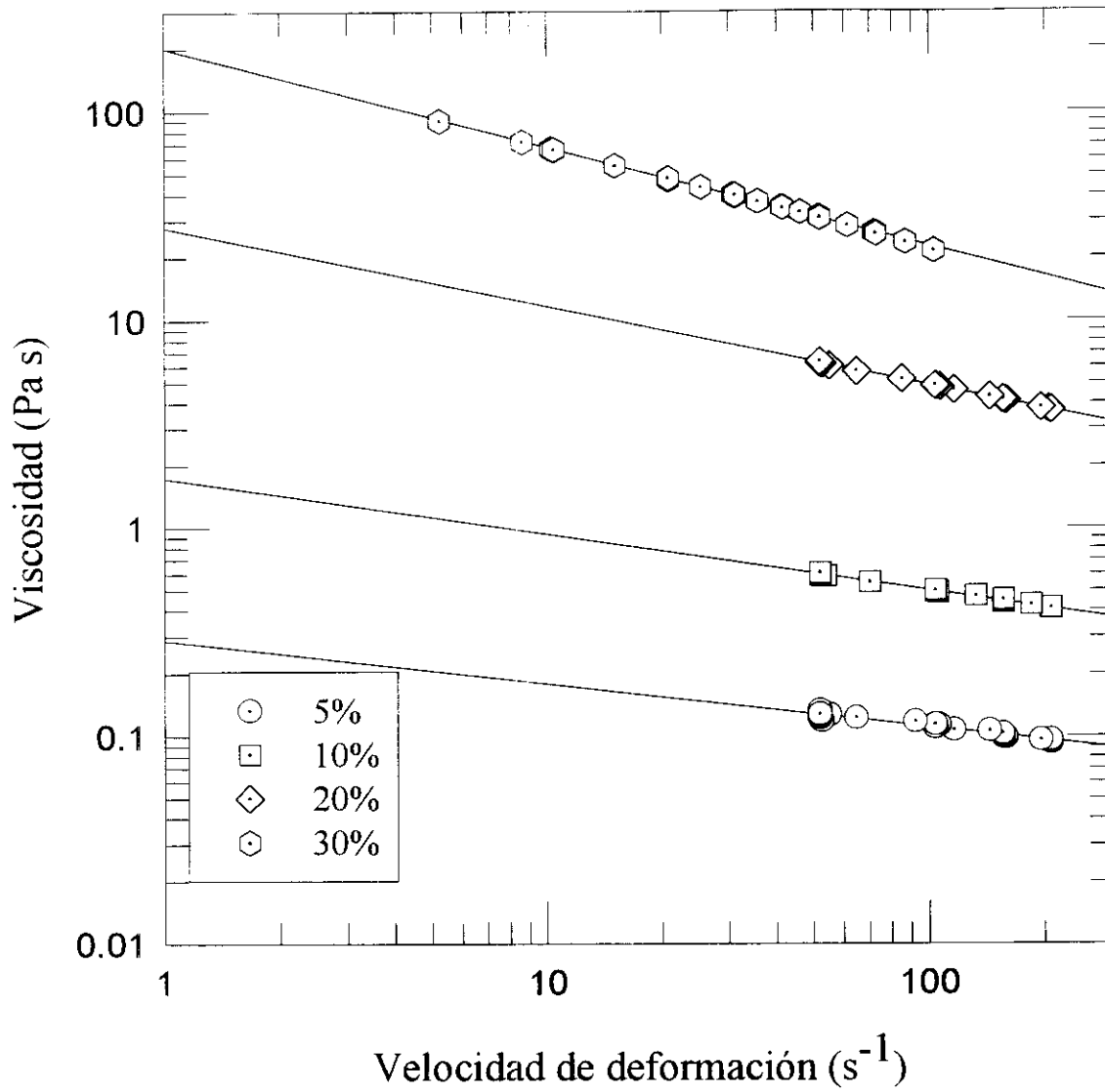
**Fig. 12. Reograma de la goma de mucílago del café a 5°C  
diferente concentración**



**Fig. 13. Reograma de la goma de mucílago del café a 20<sup>0</sup>C  
diferente concentración**



**Fig. 14. Reograma de la goma de mucílago del café a 30<sup>0</sup> C diferente concentración**



**Fig. 15. Reograma de la goma de mucílago del café a 40<sup>0</sup> C  
diferente concentración**

Oliveros y Gunasekaran (1994), reportan que este material también presenta un comportamiento pseudoplástico (Cuadro 8). En dicho estudio, el mucílago fue caracterizado en suspensiones mucílago-café en baba y mucílago café pergamino bajo la influencia del tiempo de preproceso, TTP (hr) y el contenido de cerezas maduras, CCM (%), condiciones distintas a las empleadas en este estudio, el cual se aplicó un tratamiento de extracción (ver Fig. 16 y 17).

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.

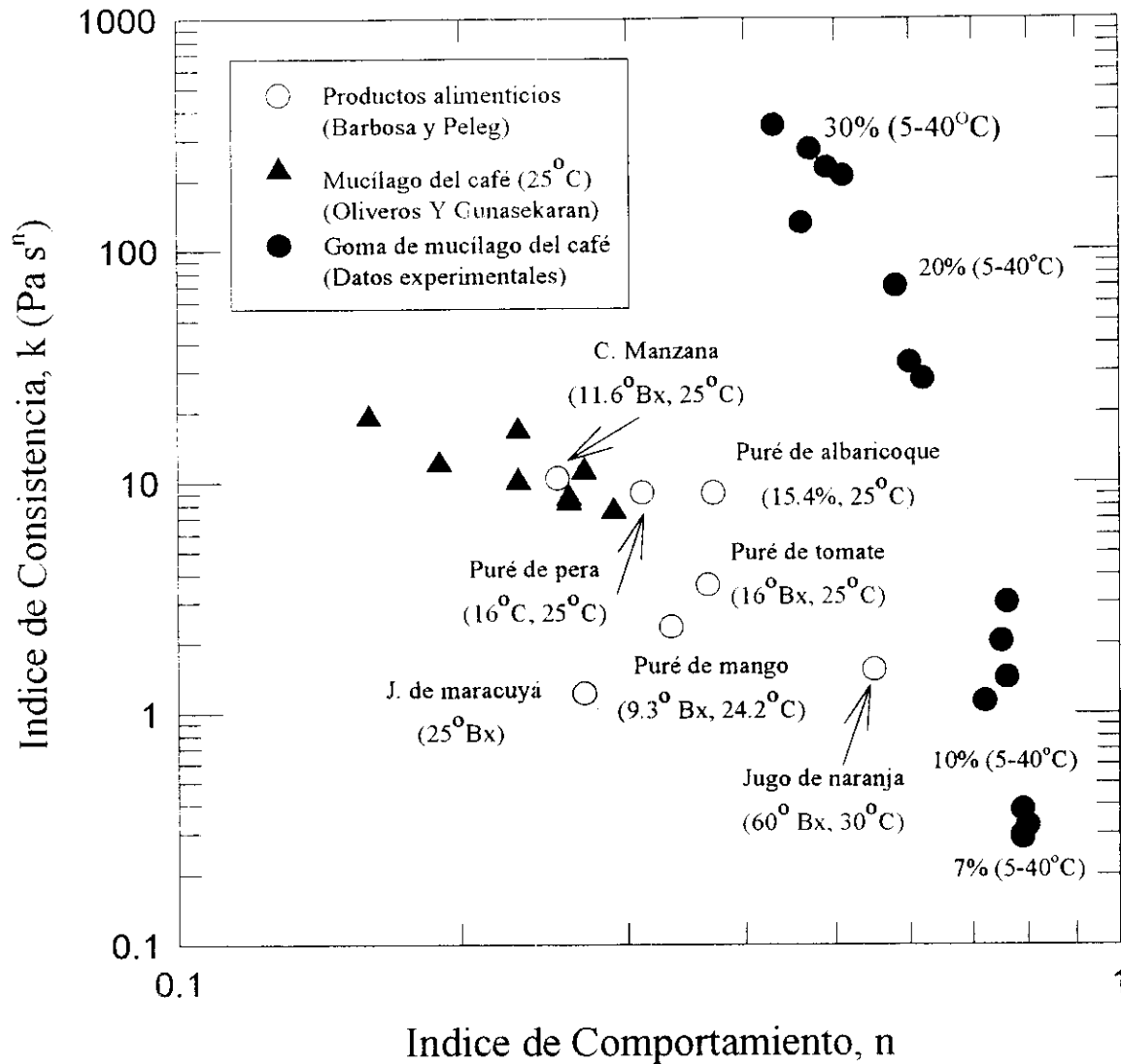
**Cuadro 8. Valores promedio de K y n para el mucílago de café.**

<b>Tratamiento (variedad-CCM-TTP)</b>	<b>n (-)</b>	<b>k (Pa s<sup>n</sup>)</b>
Caturra 100-3	0.26	8.17
Caturra 70-3	0.23	12.62
Caturra 100-6	0.19	11.96
Caturra 70-6	0.16	18.90
Colombia 100-3	0.29	7.49
Colombia 70-3	0.26	8.57
Colombia 100-6	0.23	10.04
Colombia 70-6	0.27	11.07

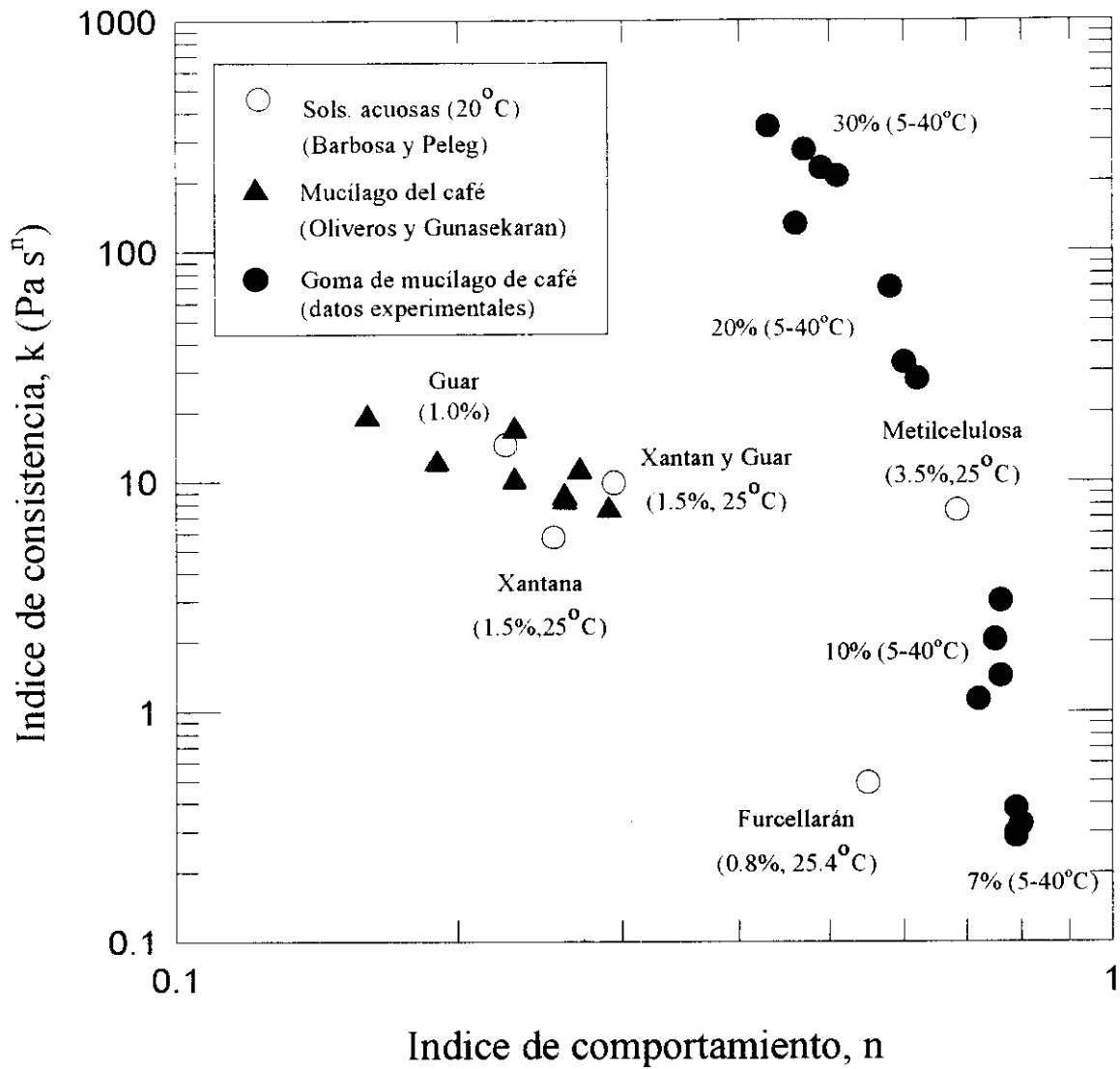
Oliveros y Gunasekaran (1994)

El modelo de la ley de la potencia aplicado a los resultados de la evaluación reológica por estos autores, permitió llegar a las conclusiones siguientes:

1. El valor de n no depende del contenido de cerezas maduras en la muestra analizada.
2. El valor de n está fuertemente influenciado por el tiempo de preproceso, disminuye cuando el tiempo de preproceso aumenta.
3. El valor de k disminuye al incrementar el contenido de cerezas maduras.
4. El valor de k aumenta con el tiempo de preproceso.
5. El valor de k depende de las variedades, siendo mayor en la variedad caturra que en la colombia.



**Fig. 16. Comparación de constantes reológicas de algunos alimentos con la goma de mucílago del café**



**Fig. 17. Comparación de constantes reológicas de algunas soluciones acuosas con la goma de mucilago del café**

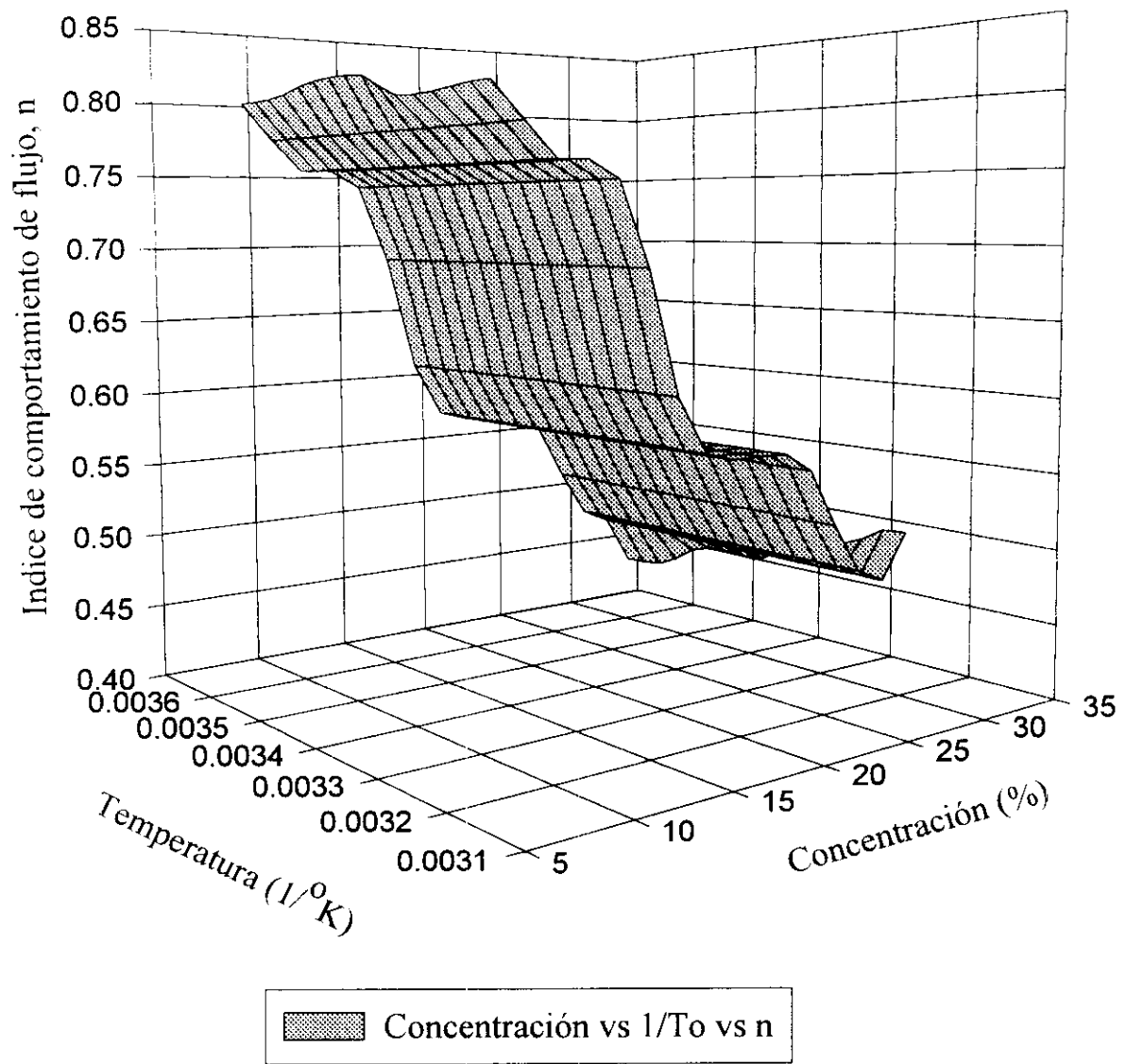


## **5.2. INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO, $n$**

### **5.2.1. Efecto de la temperatura sobre $n$ .**

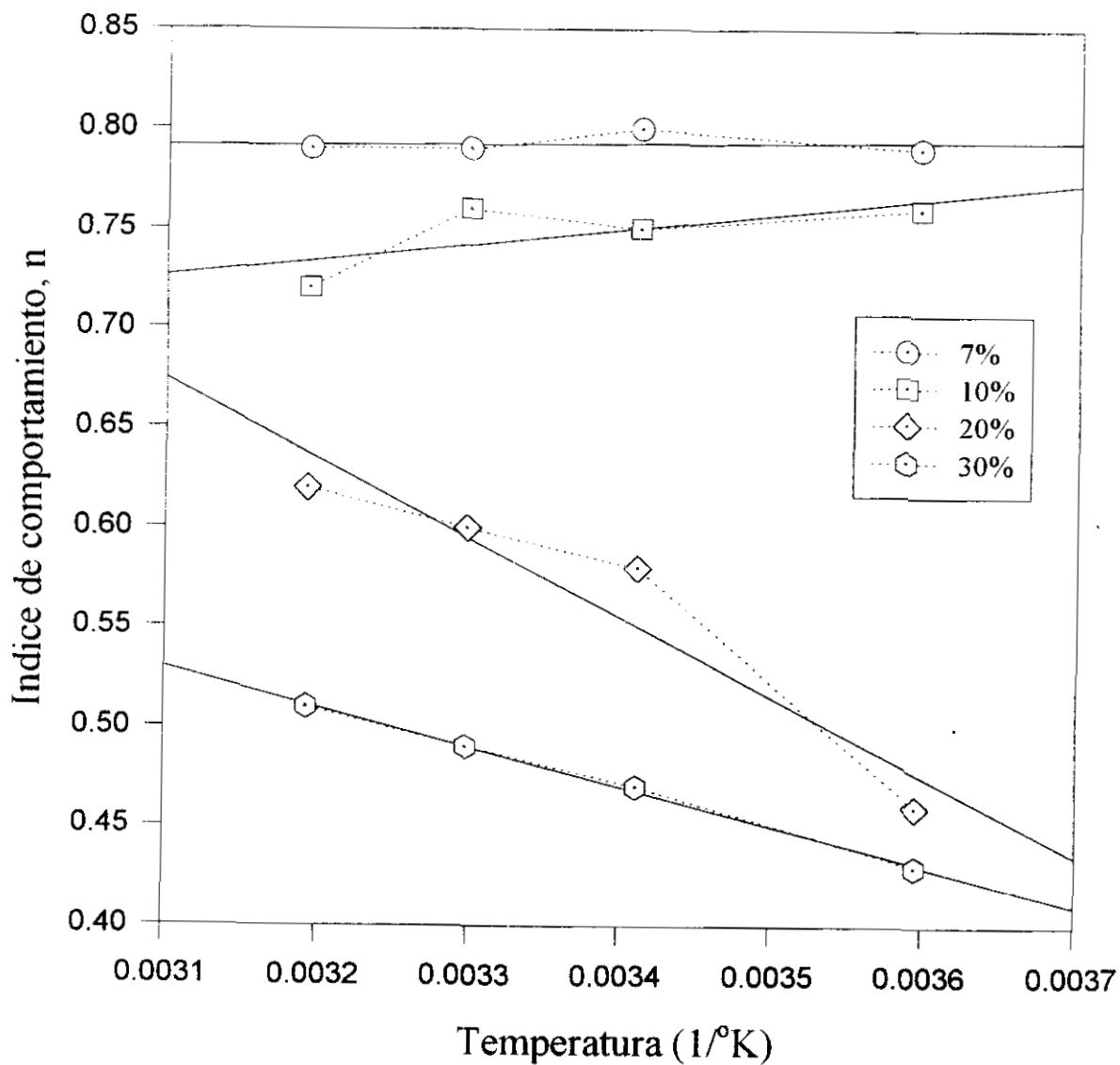
La Figura 18 nos muestra el efecto de la variación de  $n$  en función de la temperatura y la concentración. De acuerdo a la figura, el efecto de la temperatura sobre  $n$  no es significativa. Lo anterior es comparable en diversos productos alimenticios, donde  $n$  de igual manera presenta esa tendencia; 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, xantán y metilcelulosa (Barbosa y Peleg, 1982). En términos prácticos, el índice de comportamiento de flujo permanece generalmente constante; es poco afectado por la temperatura a concentración constante.





**Fig. 18. Efecto de la Temperatura y la Concentración sobre el Índice de comportamiento de flujo**

En cuanto al efecto de la concentración, se observó que en el rango de 7 a 10%, el valor de  $n$  se mantiene constante mientras la temperatura se incrementa; en cambio, a concentraciones de 20 y 30% el valor de  $n$  es afectado, generalmente aumentando mientras la temperatura se incrementa (ver fig 19).



**Fig.19. Efecto de la temperatura sobre el Índice de comportamiento  $n$  en la goma de mucilago del café a diferentes concentraciones**



### **5.2.2. Efecto de la concentración sobre $n$**

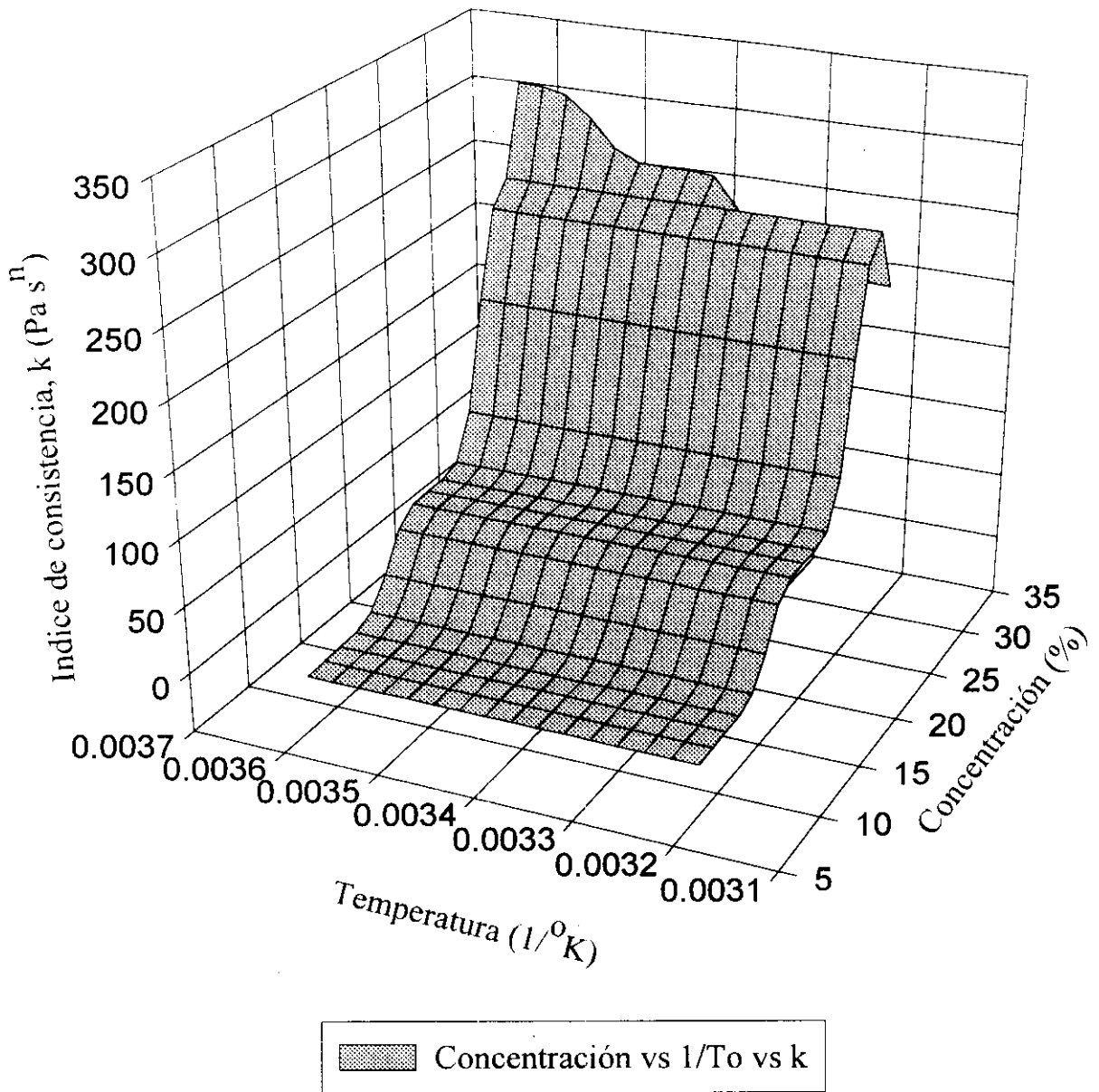
El índice de comportamiento de flujo,  $n$ , disminuye conforme la concentración incrementa (ver Fig. 18 y 19).

De acuerdo con el cuadro 7, se aprecia que el valor  $n$  sobre el rango de concentración varía generalmente 0.8 a 0.5 en cada una de las temperaturas. A su vez, se aprecian importantes variaciones de  $n$  entre una y otra concentración continua. Así, a 5<sup>o</sup>C, se aprecia que  $n$  varía de 0.75 a 0.46 al elevarse la concentración de 10 a 20% (ver Fig. 19).

## **5.3. INDICE DE CONSISTENCIA.**

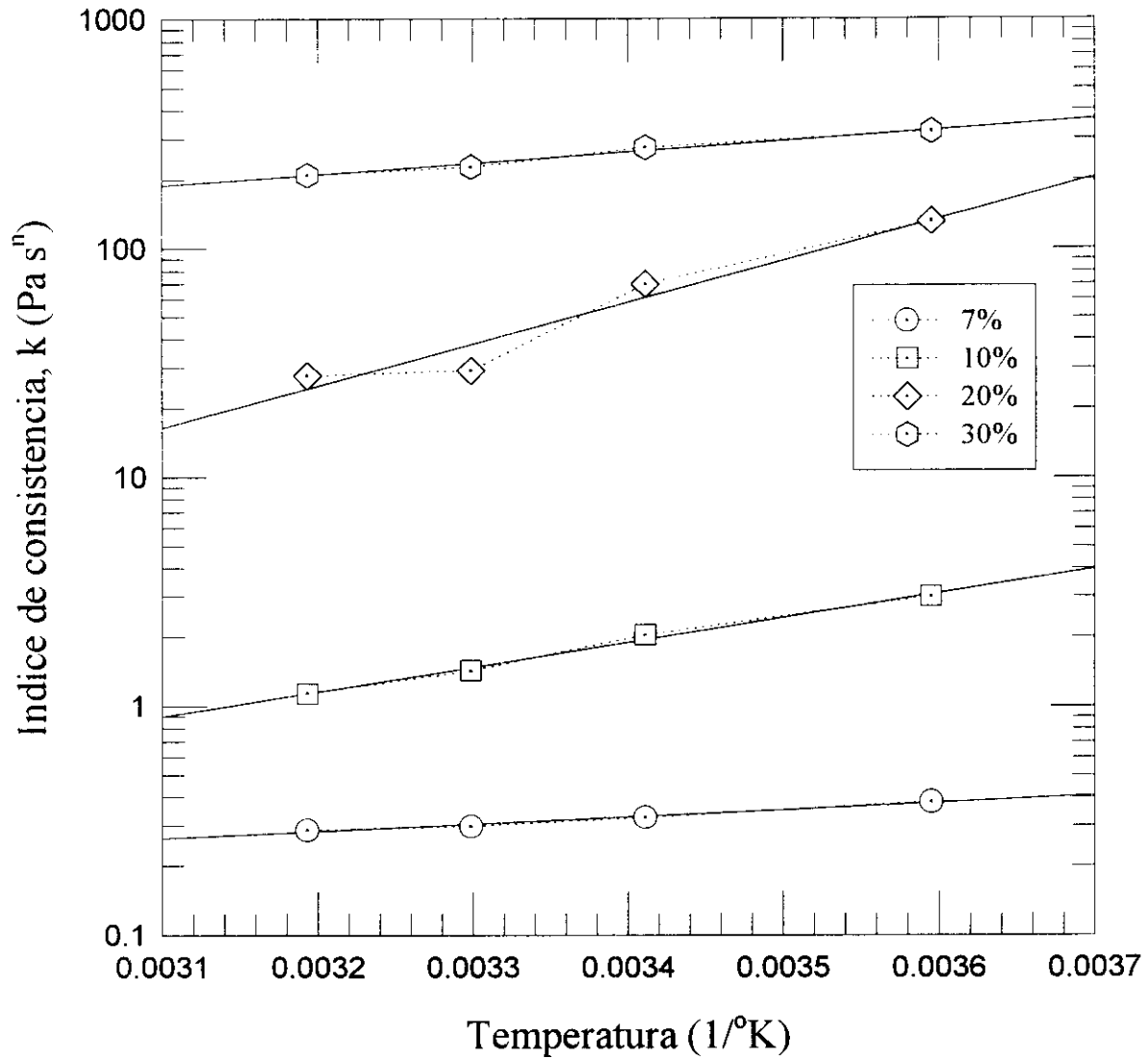
### **5.3.1. Efecto de la temperatura sobre $k$ .**

Por su parte, el índice de consistencia,  $k$ , es afectado considerablemente por la temperatura, el cuál desciende conforme la temperatura incrementa. Esto claramente es observado en la Fig. 20 y 21. Generalmente, esta es la tendencia que presentan la mayoría de los coloides hidrofílicos; la viscosidad desciende conforme aumenta la temperatura. Este efecto es reflejado a través de la variaciones que tiene  $k$ .



**Fig. 20. Efecto de la Temperatura y la Concentración sobre el Índice de consistencia**

De acuerdo con el cuadro 7, el valor de  $k$  del mucílago de café a 7%, disminuye con la temperatura, entre 0.38 y 0.28  $\text{Pa s}^n$ , es decir, un 24.8% de reducción. A 10% también disminuye, en un 62.3%. Las mayores variaciones se presentan para la concentración de 20%, con una reducción de 78.8%.



**Fig. 21. Efecto de la temperatura sobre el Índice de Consistencia ( $k$ ) en el Mucílago de Café a diferentes concentraciones**

Normalmente la ecuación que describe el efecto de la temperatura sobre las propiedades de viscosidad es la de tipo Arrhenius (Ec. 6), 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 la tabla 9 nos muestra los valores obtenidos. Como puede observarse, al pasar la concentración de 7 a 20%, el valor de  $E_a$  aumenta. Esta tendencia coincide con aquella reportada por otros autores para productos alimenticios (Barbosa y Peleg, 1982 y Vitali y Rao, 1974)

**Cuadro 9. Valores de la Energía de Activación de la goma de mucílago de café a las diferentes temperaturas.**

<b>Concentración (%)</b>	<b><math>k_0</math> (Pa s)</b>	<b>Energía de Activación (Kcal/g mol K)</b>
7	0.027	0.629
10	0.0004	2.13
20	3.63E-05	3.62
30	6.260	0.948

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

### **5.3.2. Efecto de la concentración sobre $k$ .**

La consistencia del fluido es drásticamente afectado por la concentración (Fig. 20).  $k$  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  $k$  por el efecto de la concentración es importante. Así a 5°C el incremento es del 99.8% al variar la concentración de 7 a 30%; así mismo a 40°C  $k$  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).



## 6. CONCLUSIONES.

1. La goma de mucílago de café presenta un comportamiento pseudoplástico. El modelo de la Ley de la Potencia fue satisfactoriamente aplicado para la caracterización reológica de la goma de mucílago de café. Los valores del índice de consistencia,  $k$ , variaron de  $0.287 \text{ Pa s}^n$  a  $345.857 \text{ Pa s}^n$  y los del índice de comportamiento,  $n$ , tomaron valores entre 0.43 y 0.80.
2. El índice de consistencia  $k$  es fuertemente afectado por la concentración y la temperatura: Respecto a la concentración,  $k$  asciende cuando el contenido de goma se incrementa. Por otra parte, el valor de  $k$  presenta una relación inversa con la temperatura. Este fenómeno fue explicado con el modelo de Arrhenius, obteniendo valores de energía de activación,  $E_a$ , entre  $0.629$  y  $3.620 \text{ Kcal/gmol}$ .
3. El índice de comportamiento de flujo  $n$  presentó dos comportamientos bajo el efecto de la temperatura: En las concentraciones 7 y 10%  $n$  prácticamente se mantuvo constante; mientras que en las concentraciones de 20 y 30%,  $n$  fue incrementando su valor considerablemente conforme la temperatura también lo hacía.





## **7. SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.**

A través de décadas, diversas investigaciones en relación al estudio del mucílago de café tratan de alguna manera, encontrar las vías de como y en que puede ser aprovechado y/o empleado. Hoy en día, se tiene la idea de que se trata de un material de gran valor potencial y con posibilidades de ser convertido en un producto con valor agregado. La presente investigación, tuvo como finalidad primordial, obtener los conocimientos sobre las propiedades funcionales del material y así obtener datos que nos ofrezcan referencias de uso del mucílago. Con los parámetros reportados aquí, se tiene posibilidades de dictaminar procesos, diseñar operaciones e incluso hacer una selección de equipos donde se use mucílago de café. En el transcurso de la investigación, se pudo dar cuenta de la amplitud que existe por generar más conocimientos sobre el mucílago de café con fines hacia su posible utilización. El presente trabajo permite dar pauta a que se realicen trabajos futuros de gran interés y se propone lo siguiente:

1. Debido a que es un material susceptible a la degradación microbiana y enzimática, se propone que se desarrolle una investigación sobre la cinética de degradación y su impacto en el comportamiento reológico. Esta investigación permitirá obtener una idea de como 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.
2. El método de extracción empleado en este trabajo no es solamente la vía única de extraer goma de mucílago de café. Se propone que se realice un estudio acerca del desarrollo y evaluación con otros métodos distintos. Así mismo, determinar que técnica o técnicas nos permita aislar el mucílago de café en condiciones de buena calidad, su influencia sobre el comportamiento reológico, óptimos rendimientos y menores tiempos de extracción.
3. Otra de las sugerencias es realizar un estudio sobre aplicación a sistemas alimenticios, así como su capacidad de poderse obtener sinergismos con otros tipos de gomas.



## 8. BIBLIOGRAFIA.

- Aguirre B., Francisco. 1966. La utilización industrial del grano de café y de sus productos. Investigaciones Tecnológicas del ICAITI. No. 1. Guatemala.
- Barbosa, G.V. y Peleg, M. 1982. Propiedades de Flujo de Alimentos Líquidos y Semilíquidos. Tecnología Alimentaria. 17 (2):4-28.
- Bradbury W., A. G. and Halliday D. J. 1990. Chemical Structures of Green Coffee Polysaccharides. 38: 389-392. U.S.A.
- Braham, J.E. y Bressani, R. 1972. Pulpa de café: Composición, tecnología y utilización. Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá. 152 pp.
- Brito, Edmundo. 1994. Reometría de los Alimentos. Memorias del Curso Reología y su Aplicación al Proceso de Alimentos. PUAL. U.N.A.M. México, D.F.
- Choplin, Lionel. 1994. Reología. Memorias del curso Reología y su Aplicación al Proceso de Alimentos. PUAL. U.N.A.M. México, D.F.
- Clark, R. J. And Macrae, R. 1987. Coffe: Technology. Vol. 2. Elsiever Aplied Science. N. Y. U.S.A.
- Cervantes Ramírez, 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.n. abd Willson, K.C. 1985. Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans



and Beverage. AVI Publishing Company, Inc. U.S.A. 457 pp.

Christiansen, E. B. and Graig, JR. 1962. Heat transfer to Pseudoplastic Fluids in laminar Flow. A.I.Ch. E. Journal. U.S.A.

Fennema, O.R. 1993. Química de los Alimentos. Ed. Acribia. Zaragoza, España.

García O., F. y Casas J., A. 1992. Viscosity of Locust Bean (*Ceratonia silicua*) Gum Solutions. Journal Sciencie Food Agricultural. 59:97-100. Great Britain.

Ibarz A.; Giner J.; Pagan J.; Gimeno, V. y Garza S. 1995. Rheological Behaviour of Kiwi fruit Juice Concentrates. Journal of Texture Studies. 26 . 137-145. U.S.A.

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

León M., M.T. 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.

Lópes Da S., J.A. Goncalves, M.P. and Rao, M.A. 1992. Rheological Propierties of High-Methoxyl Pectin and Locust Bean Gum Solutions in Steady Shear. Journal of Food Science. 57 (2): 443-448.

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

Manohar B.; Ramakrishna P. and Ramteke R. S. 1990. Effect of Pectin Content on Flow Propierties of mango concentrates. Journal of Texture Studies. 21 : 179-190.



- Medina Torres, Luis. 1997. Estudio reológico del mucílago del nopal *Opuntia ficus 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.F. y Rolz, C. 1973. Coffee Fermentation Technology. Instituto Central Americano de Investigación Tecnológica para la Industria (ICAITI). Guatemala.
- Muller, H.G. 1973. Introducción a la Reología de los Alimentos. Ed. Acribia. Zaragoza, España.
- Northcote, D.H. 1994. Polysaccharides of the Plant Cell during its Growth. En "Industrial Gums Polysaccharides and their Derivates". Third Edition. Whistler, R.L. y BeMiller, J.N. Academic Press Inc. U.S.A.
- Oliveros E., C, y 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. Chichiná, Colombia.
- Rao, M.A. and Anantheswaran, R.C. 1982. Food Technology. 36 (2): 116-126.
- Rao, M.A. Cooley, H.J. and Vitali, A.A. 1984. Flow Propierties of Concentrated Juices at Low Temperatures. Food Technology. 38 (3): 113-119. U.S.A.
- Rao M.A. y Rizvi S.S..1985. Engineering Properties of Foods. Marcel Dekker, Inc. U.S.A.
- Rha, Chokyun. 1978. Rheology of Fluid Foods. Food technology. Vol. 32. No. 7. Pp. 77-82. U.S.A.
- Salazar G. M. R.; Riaño H., N.M.; Arcila P., J.; 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., H. V. *et al.* 1994. Sistema Agroindustrial Café en México. Diagnóstico, problemáticas y alternativas. CIESTAAM-UACH. Chapingo, México.

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

Vernon, Carter E.J., Torre Blanca A. y Lever García C.A. 1985. Propiedades Reológicas de Emulsiones Alimenticias. *Rev. Tecnología Alimentaria*. Vol. 18, No. 1. México, D.F.

Vitali A.A., Roig S.M. y Rao M.A. 1974. Viscosity Behavior of Concentrated Passion Fruit Juice. *Rev. CONFRUCTA*, Vol. 19, No. 5. U.S.A.

Whistler, R.L. 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.

Yoo, B., Figueiredo, A.A. and Rao, M.A. 1994. Rheological Properties of Mesquite Seed Gum in Steady and Dynamic Shear. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 27. 151-157. U.S.A.



## **ANEXO**



## ANALISIS DE INCERTIDUMBRE DE LAS CONSTANTES $n$ Y $k$ MEDIANTE EL METODO DE MINIMOS CUADRADOS

El modelo empleado para obtener los valores de los índices  $n$  y  $k$  fue el de Ostwald de Waelle o ley de la Potencia que matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n$$

Con este modelo, dichas constantes son obtenidas mediante una regresión lineal simple. Como se aprecia, el índice  $n$  está expresado como valor exponencial, para simplificar la ecuación, se realiza lo siguiente:

Aplicando logaritmos.

$$\log \tau = \log k + n \log \dot{\gamma}$$

Que de otra manera adopta el modelo de la línea recta:

$$y = b + mx$$

O bien:

$$\mu_{y/x} = \beta_0 + \beta_1 X$$

donde:

$\beta_0$  = ordenada al origen =  $\log k$

$\beta_1$  = pendiente =  $n$

El modelo establece el marco conceptual del problema y expresa simbólicamente una relación lineal imperfecta entre las variables  $X$  y  $Y$ , la relación no es determinística, se tiene que encontrara una recta que mejor represente la tendencia exhibidos por los datos en cada caso, es decir, se deben encontrara los estimadores de  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  que nos permitan predecir con cierta confiabilidad el



comportamiento de  $Y$  a partir de valores  $X$ .

Para estimar adecuadamente la recta de regresión  $\mu_{xy}$ . El estimador de  $\mu_{xy}$  es  $\hat{Y}$  y tiene la siguiente forma:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X$$

El método de mínimos cuadrados se basa en el uso de este modelo y tiene como idea producir los estimadores  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  que minimicen la suma de cuadrados de las distancias entre los valores observados  $Y_i$  y los estimadores  $\hat{Y}$ , esto es, que minimicen la suma de cuadrados de las longitudes de los segmentos de las líneas verticales que unen los datos observados con la recta estimada.

Mediante la minimización de  $\Sigma(Y_i - \hat{Y}_i)^2$  se obtienen buenas representaciones de la relación entre  $X$  y  $Y$ .

Usando notación matemática, este modelo consiste en encontrar las expresiones algebraicas  $\beta_0$  y  $\beta_1$  que minimicen:

$$\Sigma(Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \Sigma(Y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 X_i)^2$$

La mínima suma de cuadrados que corresponde a los estimadores producidos por el método de mínimos cuadrados recibe el nombre de Suma de cuadrados del Error (S.C. Error), esto último debido a que en el modelo de línea recta:

$$\epsilon_i = Y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 X_i$$

Por lo tanto el estimador de  $\epsilon_i$  es:

$$\epsilon_i = Y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 X_i = Y_i - \hat{Y}_i$$

La suma de cuadrados del error es entonces:





$$S.C.E. = \sum \epsilon_i^2 = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Las expresiones para los estimadores  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  son:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2}$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X}$$

Entonces la recta de regresión estimada tiene por ecuación:

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X} + \hat{\beta}_1 X_i = \bar{Y} + \hat{\beta}_1 (X_i - \bar{X})$$

Los valores de  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  fueron calculados mediante regresión lineal en hoja de cálculo el cuál se basa en las expresiones anteriormente expuestas. El valor de k se obtuvo aplicando el antilogaritmo a la ordenada al origen  $\hat{\beta}_0$  y n con el valor de la pendiente  $\hat{\beta}_1$ . Con un intervalo de confianza de 95%, con lo que  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  se distribuían en un intervalo:

$$\hat{\beta}_0 \pm S_{\beta_0} t_{\alpha/2}(n-2)$$

$$\hat{\beta}_1 \pm S_{\beta_1} t_{\alpha/2}(n-2)$$

donde  $S_{\beta_0}$  y  $S_{\beta_1}$  son los estimadores para las varianzas de  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$ .

$S_e^2$  es el estimador de la varianza  $\sigma^2$  que tiene por ecuación:



$$S_e^2 = \frac{S.C.Error}{n-2}$$

$$S_{\beta_0}^2 = \frac{S_e^2 \sum X_i^2}{n(\sum (X_i - \bar{X})^2)}$$

$$S_{\beta_1}^2 = \frac{S_e^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2}$$

Así en el cuadro 7 se presentan los valores de n y k con sus respectivas distribuciones.