

34  
21-



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

"ESTUDIO DE EXTRACCION DEL MUCILAGO  
(*Opuntia ficus-indica*) Y SU COMPORTAMIENTO  
REOLOGICO EN FLUJO DE CIZALLA SIMPLE.



**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**QUIMICA DE ALIMENTOS**  
**P R E S E N T A :**  
**MARIA ELENA RUIZ CALDERON**



MEXICO, D. F.

1997

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**Facultad de Química**

**"ESTUDIO DE EXTRACCION DEL MUCILAGO (*Opuntia ficus- indica*) Y SU  
COMPORTAMIENTO REOLOGICO EN FLUJO DE CIZALLA SIMPLE.**

**MARIA ELENA RUIZ CALDERON**

**QUIMICA DE ALIMENTOS**

**México, D.F.**

**1997**

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Prof. CARREÑO ORTIZ HUGO RUBEN.

**Vocal:** Prof. RODRIGUEZ PALACIOS FELIPE DE JESUS.

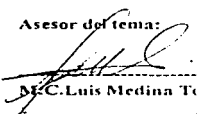
**Secretario:** Prof. MEDINA TORRES LUIS.

**1er Suplente:** Prof. RODRIGUEZ HERNANDEZ ADRIANA INES.

**2o Suplente:** Prof. CHAVARRIA HERNANDEZ NORBERTO.

**Sitio donde se desarrolló el tema :** FACULTAD DE QUIMICA EDIFICIO "E",  
LABORATORIO 313. UNAM.

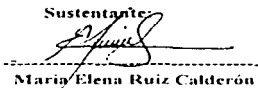
Asesor del tema:

  
M.C. Luis Medina Torres.

Supervisor Técnico:

  
Dr. Edmundo Brito de la Fuente.

Sustentante:

  
Maria Elena Ruiz Calderón

## **DEDICATORIAS**

***A la memoria de mi padre\****  
*Silvio Ruiz López.*

***A mi madre***

*María del Refugio Calderón Jaimes,  
por todo su amor y comprensión .*

***A mi Tío***

*Ernesto Calderón Jaimes,  
por toda su confianza y cariño.*

***A Luis,***

*por todo su apoyo y amor incondicional...*

***A mis hermanos***

*Jorge y Maru,  
por su apoyo y cariño en  
los momentos difíciles..*

***A mis familiares cercanos  
por todo su cariño.***

**AGRADECIMIENTOS.**

***Existen personas a las cuales no solo hay que agradecerles si no admirarlas....***

***M.en C. Luis Medina Torres,        y***

***Dr. Ernesto Calderón Jaimes.***

***Por su calidad humana y amistad desinteresada.....***

***Dr. Edmundo Brito de la Fuente.***

***Por su apoyo e interés en la realización de este trabajo....***

***Prof. Hugo Carreño Ortiz.***

***DE MANERA MUY ESPECIAL..***

***A la Universidad Nacional Autónoma de México  
por haber contribuido a mi formación profesional.***

***A todos mis compañeros y amigos.***

**GRACIAS.**

## CONTENIDO.

<b>LISTA DE TABLAS.</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.</b>	<b>4</b>
<b>RESUMEN.</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCION.</b>	<b>8</b>
<b>CAPITULO 1. GENERALIDADES</b>	<b>11</b>
1.1. Hidrocoloides	12
1.2. La cactácea del nopal <i>Opuntia ficus-indica</i> .	16
1.2.1. Taxonomía de las cactáceas	16
1.2.2. El Nopal <i>Opuntia ficus-indica</i> en Milpa Alta.	17
1.3. Proceso de Extracción	18
1.3.1. Extracción líquido-líquido	18
1.3.2. Extracción líquido sencilla	18
1.3.3. Rapidez de extracción	19
1.4. Generalidades sobre cromatografía por HPLC.	20
1.4.1. Componentes de un cromatógrafo de HPLC	20
1.5. Reología	22
1.5.1. Flujo Newtoniano	23
1.5.2. Flujo no-Newtoniano	25
1.5.3. Fluidos independientes del tiempo	26
1.5.3.1 Fluidos Pseudoplásticos	26
1.5.3.2 Fluidos Dilatantes	26
1.5.5 Fluidos dependientes del tiempo	29
1.5.5.1 Tixotropía	29
1.5.5.2 Reopexia.	29
1.5.6. Factores que afectan el comportamiento reológico.	32
1.5.6.1 Efecto de la temperatura	32
1.5.6.2 Efecto de la concentración	33
1.5.7 Geometrías de medición	33
1.5.8 Reología de biopolímeros de origen microbiano	35
1.5.9. Reología de biopolímeros de origen natural.	36
1.6 Mucilago de <i>Opuntia ficus-indica</i> .	39
1.6.1 Estructura de la goma de mucilago <i>Opuntia ficus-indica</i> .	40
1.6.2 Propiedades Reológicas de soluciones de goma de mucilago <i>Opuntia ficus-indica</i> .	43
<b>OBJETIVOS E HIPOTESIS.</b>	<b>45</b>
Objetivos	46
Hipotesis	46

<b>CAPITULO II.</b>	<b>MÉTODOS Y MATERIALES.</b>	<b>47</b>
II	Metodología	48
II 1	Materia prima	48
II 2	Experimentación	48
II 2 1	Reactivos	48
II 2 2	Equipo	48
II 3	Técnica de extracción	50
II 3 1.	Extracción de la goma de mucilago de nopal	50
II 3 2	Técnica de obtención de Pesos Moleculares por HPLC	51
II 4	Método de medición reológica	53
<b>CAPITULO III.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS REOLOGICOS .</b>	<b>54</b>
III 1	Resultados de los balances de materia para los métodos de extracción	55
III 2	Resultados de Flujo de cizalla simple.	57
III 2 1	Análisis reológicos de las muestras extraídas con Acetona	62
III 2 2	Análisis reológicos para las muestras extraídas con Isopropanol	67
III 2 3.	Análisis de resultados de Pesos Moléculares.	70
<b>CAPITULO IV.</b>	<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>71</b>
<b>APENDICE A.</b>		<b>73</b>
A 1	Geometrias de medición	73
A 1.1.	Cono y Plato	73
A 1.2.	Cilindros Concéntricos	76
A 1.3.	Placas Paralelas.	78
A 2	Posibles fuentes de error	80
<b>APENDICE B.</b>		<b>81</b>
B 1	Caracterización fisico-química del mucilago	81
B 1 1.	Características Organolépticas de la goma de mucilago.	81
B 1 2.	Composición Química del mucilago de nopal <i>Opuntia ficus-indica</i>	81
B 1 3	Absorción Atómica de muestras de goma de mucilago	83
B 1 3 1	Resultados obtenidos por Absorción Atómica	84
<b>REFERENCIAS.</b>		<b>86</b>



#### LISTA DE TABLAS.

TABLA 1.1.	Propiedades reológicas y principales aplicaciones de los Hidrocoloides naturales	15
TABLA 1.2.	Consumo en el mercado de los polisacáridos de 1988 a 1995.	30
TABLA 1.3.	Composición química de la <i>Opuntia ficus-indica</i>	41
TABLA 3.1.	Balance de materia para los diferentes procesos de extracción empleando como disolvente Acetona.	55
TABLA 3.2.	Balance de materia para los diferentes procesos de extracción empleando como disolvente Isopropanol	56
TABLA 3.3.	Resultados de los parámetros reológicos empleando el método de la Ley de la Potencia.	57
TABLA B.1.	Resultados fisico-químicos del mucilago <i>Opuntia ficus-indica</i> .	82

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA I 1. Modelo para el flujo Newtoniano	24
FIGURA I 2. Representación de curvas de flujo	28
FIGURA I 3. Fluidos reopecticos y tixotropicos	30
FIGURA I 4. Diagrama de flujo del proceso de extracción de las pectinas	37
FIGURA I 5. Principales polisacáridos presentes en el mucilago de nopal	42
FIGURA I 6. Estructura de los polisacáridos que conforman el mucilago de nopal <i>Opuntia ficus-indica</i>	44
FIGURA II 1. Equipo de medición reómetro HAAKE CV20N, y geometria PK20	49
FIGURA II 2. Proceso de extracción y purificación del mucilago <i>Opuntia ficus-indica</i> .	52
FIGURA III 1. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25°C con muestras al 5% (p/p), utilizando acetona durante la extracción del mucilago y analizando el efecto de la temperatura a un pH de 4.5	58
FIGURA III 2. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25°C con muestras al 5% (p/p), utilizando acetona durante la extracción del mucilago y analizando el efecto del pH a una temperatura de 25 °C	59
FIGURA III 3. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25°C con muestras al 5% (p/p), utilizando acetona durante la extracción del mucilago y analizando el efecto de la temperatura a un pH de 7.0	60
FIGURA III 4. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25°C con muestras al 5% (p/p), utilizando acetona durante la extracción del mucilago y analizando el efecto del pH a una temperatura de 70 °C	61
FIGURA III 5. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25°C con muestras al 5% (p/p), utilizando isopropanol durante la extracción del mucilago y analizando el efecto de la temperatura a un pH de 4.5	63

FIGURA III 6	Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25°C con muestras al 5% (p/p), utilizando isopropanol durante la extracción del mucilago y analizando el efecto de la temperatura a una temperatura de 25°C	64
FIGURA III 7	Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25°C con muestras al 5% (p/p), utilizando isopropanol durante la extracción del mucilago y analizando el efecto de la temperatura a un pH de 4.5	65
FIGURA III 8	Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25°C con muestras al 5% (p/p), utilizando acetona durante la extracción del mucilago y analizando el efecto de la temperatura a un pH de 4.5	66
FIGURA III 9	Efecto del pH sobre la viscosidad en solución acuosa al 5% (p/p) y 25 °C.	67
FIGURA III 10	Efecto del peso molecular promedio en el mucilago <i>Opuntia ficus-indica</i> con respecto a las condiciones de extracción con Acetona	68
FIGURA A.1.	Geometría de Cono y Plato	75
FIGURA A.1.	Geometría de Cilindros	77
FIGURA A.1.	Geometría de Placas Paralelas.	79

***RESUMEN.***

## RESUMEN.

La industria de alimentos se enfrenta con frecuencia ante la necesidad de desarrollar productos con características organolépticas adecuadas para el consumidor, tales como: textura y consistencia. La necesidad de mejorar las propiedades funcionales de los alimentos procesados, así como de impartir nuevos atributos de textura o de mejorar las ya existentes, ha propiciado el desarrollo de nuevos productos. Una alternativa prometedora es la extracción de polisacáridos estructurados a partir de los exudados del nopal (*Opuntia ficus-indica*)

Por esta razón, en este trabajo se presenta un estudio de un método de extracción con disolventes orgánicos de la goma de mucilago (*Opuntia ficus-indica*), variando diversas condiciones ambientales durante el proceso tales como, tipo de disolvente (acetona y/o isopropanol), temperatura y pH. Con la finalidad de obtener la goma del mucilago y que en medio acuoso presente propiedades funcionales muy particulares (por ejemplo, incrementar la viscosidad o la capacidad de gelificación) con posibles aplicaciones en formulaciones alimenticias. Los resultados reológicos presentan que la goma de mucilago en solución acuosa presenta un comportamiento pseudoplástico, con valores de índice de flujo alrededor de  $n=0.25-0.3$ , donde no se observa que varíe significativamente con las diversas condiciones de extracción analizadas en este estudio, no así su consistencia,  $k=0.4-1 \text{ Pa S}^n$ . En base a este estudio es posible, obtener de acuerdo al método de extracción, desde un material poco espesante, hasta uno viscosificante, con propiedades reológicas muy similares a la de otros hidrocoloides de uso alimenticio, por ejemplo el algarrobo.

Considerando la respuesta reológica y al rendimiento obtenido de este polisacárido extraído, se concluye que el método de extracción que mejores resultados presenta es empleando acetona como disolvente, a condiciones de extracción de temperatura de  $70^\circ\text{C}$  y a un pH de 4.5

***INTRODUCCION.***

## INTRODUCCION.

En México, el nopal ha sido utilizado desde tiempos pre-Colombinos de diferentes formas como alimento, medicamento e inclusive de manera empirica como *agente modificador de propiedades funcionales de diversos productos* (por ejemplo, en la preparación de pinturas naturales)

Actualmente su uso continua siendo prácticamente el mismo, a pesar de que en fechas recientes se han propuesto diversas alternativas particularmente en la industria farmacéutica (por ejemplo, shampoos, cremas, pildoras con nopal deshidratado, etc ) y en la industria alimentaria (por ejemplo, enlatado como verdura, mermelada , curtidos, etc) [Pimienta, 1990]

Las cactáceas presentan la particularidad de que al ser dañadas físicamente comienzan a exudar un compuesto mucilaginoso para sellar y posteriormente reparar éste daño. Este tipo de compuesto ha llamado la atención recientemente debido a la capacidad de formación de dispersiones altamente viscosas en agua, así como una alta captación de ella. Una alternativa tecnológica interesante es la obtención de este compuesto mucilaginoso e implementarlo de acuerdo a sus propiedades funcionales como un aditivo alimenticio, ya que éste es el responsable de modificar las propiedades reológicas en los medios acuosos donde interviene.

Este tipo de compuestos se caracterizan por ser sales neutras de polisacáridos ácidos, las cuales están unidas de diferentes formas dentro de la misma molécula y contienen ácido D-glucurónico. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- 1) Gomas reales, las cuales son productos de plantas que forman soluciones claras en agua, y
- 2) Mucilagos de vegetales, donde éste se hincha pero no se disuelve completamente en el agua. Estos polisacáridos forman soluciones coloidales en agua y pueden ser obtenidos por precipitación.

Tanto las gomas vegetales como, los mucilagos y las pectinas pertenecen a los ácidos poliurónicos, y se ha visto que las condiciones de extracción influyen de manera determinante en sus propiedades físico-químicas finales, en éste estudio se investiga el efecto en sus propiedades reológicas con diferentes condiciones de extracción.

La importancia de la investigación de las propiedades estructurales, mecánicas y reológicas de los polisacáridos derivadas de productos naturales (por ejemplo, la goma de mucilago de nopal) es con la finalidad de analizar las funciones estructurales que presentan estas macromoléculas, entre las que destacan gelificación, capacidad de incrementar la viscosidad, estabilización de suspensiones, emulsiones y habilidad de retener agua.

Estas propiedades impartidas por las macromoléculas presentes en los alimentos, se pueden ver afectadas al cambiar algún parámetro físico-químico o al variar la composición del sistema. Sin embargo, el grado de avance en las propiedades estructurales y reológicas de polisacáridos derivados de productos naturales [Tanaka, 1981 y Ross-Murphy, 1984] es muy limitado. En consecuencia, poco se sabe al respecto de la respuesta reológica que presenta el mucilago a diferentes condiciones del proceso de extracción. Esto tiene que ver, entre otros factores, con el hecho de que los polisacáridos de origen natural, por ejemplo el mucilago han sido poco estudiados y su empleo a sido sobre todo de manera empírica, tal como, en la formulación de pinturas naturales. Donde las propiedades reológicas son las responsables de impartir características funcionales en el medio acuoso presente en el sistema.



***CAPITULO I.***  
***GENERALIDADES***

## I. GENERALIDADES.

### I.1. HIDROCOLOIDES

En las últimas décadas, el uso de biopolímeros como aditivos en alimentos se ha incrementado paulatinamente, estimulando el descubrimiento y estudio de nuevos hidrocoloides con propiedades novedosas o con ventajas de costo y producción sobre las ya existentes

El término hidrocoloide o goma ha sido aplicado durante décadas para designar a un conjunto de sustancias con propiedades comunes, tales como capacidad de retención de agua, de gelificar o incrementar su viscosidad, de estabilizar suspensiones, entre otras. En términos prácticos Whistler et al., los ha definido como moléculas hidrofóbicas o hidrofílicas de alto peso molecular, usualmente con propiedades coloidales, que en presencia de un disolvente adecuado producen geles o soluciones muy viscosas a concentraciones bajas del hidrocoloide

Las propiedades mecánicas de un gel son el resultado de un complejo equilibrio que se establece entre las fuerzas de atracción y de repulsión que se desarrollan desde la disolución del polímero hasta completar su proceso de gelificación. Los agentes gelificantes son aditivos alimentarios de naturaleza macromolecular y capaces de formar geles a concentraciones bajas

El proceso de gelificación de estos aditivos consiste en una asociación molecular que da lugar a una red tridimensional de considerable estabilidad mecánica, en cuya estructura queda atrapada, la fase líquida en la que se desarrolla el proceso. Donde los mecanismos de formación de estas redes dependen de la naturaleza química de las macromoléculas, que determinan su conformación, su flexibilidad, y el tipo y número de puntos de entrecruzamiento, y de la interacción de las mismas con el disolvente

Aunque el tipo de hidrocoloide y su concentración definen, en cierto modo, el comportamiento mecánico, existen además otros factores que condicionan su composición química, y por ende, sus propiedades mecánicas como por ejemplo la variedad botánica de la que provengan las pectinas, la familia de algas de las que se extraigan el agar o los alginatos, el grado de madurez alcanzado por la materia prima, el clima y condiciones del medio en el que se cultivó la misma, etcétera y muy especialmente el método de extracción utilizado. La investigación del método de extracción y su comportamiento mecánico de la goma de mucilago es el objeto de este trabajo

La importancia que han adquirido el desarrollo de nuevos productos en la industria alimentaria ha impulsado el perfeccionamiento de las técnicas para su purificación y modificación química, con el fin de ampliar la gama de posibles aplicaciones como modificadores de textura. Además se ha creado la necesidad, de disponer de métodos de medida que permitan evaluar con exactitud su comportamiento mecánico y conocer las modificaciones que imponen al del alimento al que se adicionan

Con éste último fin, se ha desarrollado gran cantidad de métodos, entre los cuales se puede distinguir dos grupos

- a) Los empíricos, que brindan una información parcial, pero poseen un gran valor práctico a efectos comparativos, y
- b) Los fundamentales, que emplean técnicas reológicas, cuya aplicabilidad es en muchos casos, discutible, pero permite obtener resultados de valor universal

Los polisacáridos solubles en agua presentan importantes aplicaciones industriales ( por ejemplo, como emulsificantes, agentes gelificantes, encapsulantes, floculantes, espesante, formadores de película, etc ), debido sobre todo, a sus propiedades reológicas, inherentes a cada uno de ellos o a una combinación con otros polisacáridos. De ésta manera, los hidrocoloides son moléculas de alto peso molecular que en presencia de un disolvente adecuado producen geles o soluciones muy viscosas a concentraciones muy bajas. Estos se dividen en dos grupos principalmente: proteínas y polisacáridos

Los polisacáridos más comunes se obtienen de diferentes fuentes [Glicksman, M , 1982, López Munguía, et al , 1993 ]

- 1.- Naturales, y
- 2.- Sintéticas.

1.- **Entre las naturales destacan:**

- a) Los exudados de arbustos o árboles (carácter aniónico)  
Ejem: acacia, tragacanto, karaya, ghatti
- b) Extractos de semillas (carácter no iónico)  
Ejem: algarrobo, goma guar, Psyllium, tamarindo.
- c) Los extractos de algas marinas (carácter aniónico)  
Ejem: agar, alginatos, carrageninas, furcellaranas
- d) Derivados de cereales  
Ejem: almidones nativos y modificados
- e) Derivados de frutas y vegetales  
Ejem: pectina, arabinogalactana, inulinas (alcachofas).

**Las de origen animal y microbiano:**

- a) Derivados de extractos animales  
Ejem: gretinetas, albúminas, caseinatos, quitina (conchas y caparzones de crustáceos e insectos).
- b) Derivados de origen microbiano (biosíntesis)  
Ejem: dextranas, xantana, gelana

**2.- Entre las sintéticas destacan:**

- a) Derivados de celulosa. Ejem carboximetil celulosa, metil celulosa, hidroximetil celulosa, celulosa microcristalina, etc

Un resumen de las principales aplicaciones, y propiedades reológicas de los hidrocoloides más empleados en la industria de alimentos se muestra en la Tabla 1.1

**TABLA. 1.1 PROPIEDADES REOLOGICAS Y PRINCIPALES APLICACIONES DE ALGUNOS HIDROCOLOIDES NATURALES.**

HIDROCOLOIDES	PROPIEDADES REOLOGICAS:	APLICACIONES
Alginato	La gelificación sólo se lleva a cabo con cationes divalentes o trivalentes, gelifica en frío formando geles claros que no funden con el calentamiento. Además, forman geles elásticos o quebradizos de acuerdo a la proporción de ácido galacturónico quebradizo presente.	En la formulación de análogos frutales, productos cárnicos, extrusión de proteínas.
Agar	Forma geles termorreversibles. Gelifica a concentraciones tan bajas como 0.01% (p/p). Sus geles presentan una amplia variedad de textura desde el quebradizo hasta el muy elástico.	Medios microbiológicos, gelatinas, geles de carnes sintéticas.
Ferlina	El comportamiento gelificante depende del contenido de ácido galacturónico esterificado presente.	Gelatinas, jaleas, formulaciones frutales para productos lácteos, estabilización de bebidas lácteas y jugos de frutas.
Goma arábiga	Es muy soluble comparada con otras gomas. En soluciones acuosas presentan un comportamiento Newtoniano a concentraciones inferiores al 40 % (p/p).	En la retardación de la cristalización del azúcar y en aderezos, helados, embotidos, quesos.
l Carragenina	Forma geles elásticos, no muy rígidos, sin sinéresis. La habilidad de gelificación se refuerza con iones calcio. Además, forma soluciones isotrópicas.	Flanes, pudines, rellenos para panadería, yogurt, aderezos, bebidas, fórmulas infantiles, control de sinéresis en alimentos instantáneos, etc.
k Carragenina	Forma geles quebradizos, tendencia a manifestar sinéresis, su habilidad de gelificación se refuerza con los iones potasio, interacción con las proteínas de la leche.	Pudines, rellenos para panadería, yogurt, helados, postres congelados, flanes, estabilización de bebidas de chocolate, etc.
Algarrobo	Soluble parcialmente en agua fría, no gelifica, forma soluciones muy viscosas a concentraciones cercanas a 0.5% (p/p). Manifiesta sinérgismo con k carragenina y locustana.	Postres congelados, quesos frescos, embotidos.
Goma guar	Soluble en agua fría, sus soluciones tienen viscosidades similares a las soluciones de goma de algarrobo, no gelifica. Son polisacáridos de carácter no iónico y por lo tanto insensibles a los iones y al pH.	Postres congelados, quesos frescos, embotidos.
Destrana	Polisacárido neutro, soluble tanto en agua fría como en caliente, forma soluciones claras y compatible con la mayoría de ingredientes comúnmente encontrados en alimentos.	Alimentos horneados, cerveza, emulsionante y estabilizante de sistemas acuosos.
Xantana	No forma geles, soluble tanto en agua fría como caliente, forma soluciones muy viscosas a bajas concentraciones de polisacárido, sus soluciones son estables con respecto a la temperatura, pH y sales. Manifiesta sinérgismo en sus propiedades reológicas cuando interacciona con galactomananos y con goma de algarrobo forma geles.	Nababs, aderezos, jugos, alimentos instantáneos, quesos, crema, postres congelados, jaleas, estabilizante de bebidas, embotidos, alimentos congelados y rehidratados.
Gelana	Requiere la presencia de cationes para formar geles ("m"). Forma geles claros y termorreversibles, la dureza de sus geles se mantiene estable con el pH. La naturaleza y concentración del catión afectan la temperatura de transición sol gel, así como la fuerza del gel. La formación de gel se puede llevar a concentraciones de 0.05% (p/p).	Gelatinas, mermeladas, confituras, gelatinas, postres instantáneos, helados, macedonas, yogurt, pudines.

Fuente: Whistler, R.L., 1990, Therkelsen, G.H., 1983, Stanley, N.F., 1990, Sanderson, G.R., 1990, Glickman, M., 1982, Johnston & Banks, F.A., 1990, Kang, K.S., et al 1983, Matsushashi, T., 1990, Sime, J.W., 1990, Rollin, C., et al 1990.

## 1.2. LA CACTACEA DE NOPAL. *Opuntia ficus-indica*.

El nopal es una planta perteneciente a la familia de las cactáceas, la cual es originaria del continente americano. En América de Norte se localizan 92 géneros de cactáceas, en tanto que en América de Sur se conocen 51 géneros. De las localizadas en el norte, 61 géneros existen en México.

En el país, el nopal se localiza en la mayoría de las condiciones ecológicas, ocupando cerca de 30 millones de hectáreas distribuidas en los estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Hidalgo, Chihuahua, Tamaulipas, Durango y Aguascalientes.

Este tipo de cactacea se adapta muy bien a diversas texturas y composiciones de suelos, pero se desarrolla mejor en suelos calcareos, arenosos, de profundidad media, con pH alcalino y altitudes que varían entre 800 y 2500 m, en su desarrollo se requieren temperaturas anuales preferentemente entre 18 y 25 °C [Ochoterena,] et al., 1992, Bravo-Hollins, H et al., 1987].

### 1.2.1. TAXONOMIA DE LAS CACTACEAS.

Las plantas conocidas bajo el nombre común de nopal han sido clasificadas por los taxónomos de la siguiente forma:

<b>FAMILIA</b>	Cactaceae
<b>GENERO</b>	Opuntia
<b>SUBGENERO</b>	Platyopuntia

Estas son plantas arborescentes, arbustivas o rastreras, con o sin tronco bien definido, artículos aplanados (cladodios), de forma lanceolada, elípticos, las espinas no llevan vainas, las flores son grandes, frecuentemente son amarillas, aunque a veces son de color rosa, anaranjado o rojizo. El fruto es globoso, ovoide hasta turbinado, pulpa jugosa. En este estudio se utilizó el nopal verdura cultivado en Milpa Alta del cual se detallará más en estos aspectos [Informe SARH, 1981].

**Nombre científico:** *Opuntia ficus-indica*.

**Descripción:** Es una planta alta de 3 a 5 metros o más, de tallo leñoso bien definido de 60 cm a 1.5 m de altura y 20 a 30 cm de diámetro. Sus artículos son oblongos de 30 a 60 cm de largo y 20 a 40 cm de ancho y 1.9 a 2.8 cm de grueso, color verde opaco. Espinas casi siempre ausentes, y cuando existen son escasas y pequeñas. Flores de 7 a 10 cm de diámetro y como de 6 a 8 cm de largo. Fruto oval, de 5 a 10 cm de largo y de 4 a 8 cm de diámetro, es de las más utilizadas para consumo directo.

### **1.2.2. El Nopal *Opuntia ficus-indica* en Milpa Alta.**

Milpa Alta es una de las 16 Delegaciones que conforman el Distrito Federal, esta ubicada al sur del mismo Colinda con las Delegaciones de Tlalpan, Xochimilco y Tláhuac Limita al sur con el Estado de Morelos y al este con el Estado de México La Delegación se compone de 12 poblados y ocupa un área de 27 Km<sup>2</sup>.

En este lugar el conjunto de condiciones que favorecen la producción anual de nopal en este sitio son:

<b>Latitud:</b>	18.8 °Norte.
<b>Temperatura:</b>	Promedio anual de 10-12 °C ( máx 27.5 / mín 3 °C )
<b>Altitud:</b>	Entre 2000 y 3000 m sobre el nivel del mar
<b>Precipitación pluvial:</b>	Promedio anual de 924 mm
<b>Suelo:</b>	De profundidad media, de composición arcillosa.
<b>Clima :</b>	Subhúmedo.

### **I.3. PROCESO DE EXTRACCION.**

En la industria el termino extracción, designa de una manera general a una amplia variedad de procesos de separación. Sin embargo, en el campo de la ingeniería química y de alimentos usamos este término para referirnos a dos procesos distintos: la extracción sólido-líquido y la extracción líquido-líquido.

El primer proceso se refiere a la separación, por medio de un disolvente líquido, de un componente soluble contenido en un sólido.

El segundo proceso involucra la separación de un soluto, contenido en una fase líquida, por acción de un disolvente que no es miscible con el líquido que contiene el soluto. En este trabajo se emplea la extracción líquido-líquido.

#### **I.3.1. EXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO.**

La extracción líquido-líquido, o más brevemente, la extracción líquida se refiere a la transferencia de uno o varios componentes entre dos fases líquidas. Su objeto es purificar uno o varios compuestos o efectuar una recuperación más económica de un componente que la que es posible por otros procedimientos.

El proceso en el cual un componente se separa de un disolvente poniéndolo en contacto con otro disolvente inmiscible se llama extracción líquida sencilla y es el tipo más antiguo de extracción líquida.

A nivel in-vitro, el proceso se realiza generalmente en un embudo de separación por extracciones sucesivas de la solución con porciones frescas del otro disolvente. Cabe aclarar que una sola extracción separa una parte del componente, pero queda siempre una fracción en la solución original. Por consiguiente, para extraer un porcentaje elevado del componente es necesario realizar varios de esos tratamientos. Esta técnica exige cantidades excesivas de disolvente y en las operaciones industriales se realiza generalmente empleando una técnica de contracorriente que proporciona la extracción máxima con una cantidad dada de disolvente.

#### **I.3.2. EXTRACCION LIQUIDA SENCILLA.**

En la operación unitaria de extracción líquida sencilla se transfiere un componente de una solución a otra solución. La transferencia de un compuesto a la otra solución puede presentar varias ventajas. Empezando, por ejemplo, con una solución acuosa diluida y muy impura de un compuesto menos volátil que el agua, la extracción líquido-líquido con un disolvente orgánico miscible puede conducir a una solución concentrada y pura (refinado) de un material valioso.

Las ventajas son obvias. La concentración de una solución acuosa diluida e impura directamente por evaporación es costosa, conduce a un concentrado impuro y puede ir acompañada por una destrucción considerable del producto. La concentración después de una extracción líquido-líquido con un disolvente orgánico es relativamente poco costoso, conduce a un producto refinado y evita la destrucción [Kirk, Enciclopedia de Terminología Química, 1980].



### 1.3.3. RAPIDEZ DE EXTRACCION.

Cualquiera que sea el mecanismo, de la rapidéz de extracción, la cual es una medida de la velocidad con la cual el soluto es transferido de una fase a otra, se ve afectada por varios factores de entre los cuales destacan

- 1 - El tipo de disolvente,
- 2 - La temperatura, y
- 3 - La agitación del fluido

La selección del disolvente, es importante porque de ello depende la selectividad de la extracción. Por lo cual el disolvente tiene que ser selectivo y preferentemente de baja viscosidad para evitar problemas de mezclado y separación.

La temperatura, es un factor importante porque esta directamente relacionada con la solubilidad del soluto, es de esperarse en muchos casos que la rapidéz de extracción sea mayor a altas temperaturas debido a la solubilidad y a que la difusión del soluto aumentan.

La agitación, es importante porque reduce la resistencia a la transferencia de masa en la superficie de la partícula durante la extracción. Además se promueve un mayor contacto entre las dos fases.

#### **1.4. GENERALIDADES SOBRE CROMATOGRAFIA POR HPLC.**

La cromatografía comprende un grupo de métodos de separación variado e importante que permiten separar, identificar y determinar compuestos afines en mezclas complejas que no podrían separarse de otra manera. Resulta difícil definir rigurosamente el término **Cromatografía**, debido a la variedad de sistemas y técnicas a los que se ha aplicado. En cualquier caso, todos estos métodos utilizan *una fase estacionaria y una fase móvil*. Los componentes de una mezcla son arrastrados a través de una fase estacionaria mediante el flujo de una fase móvil, las separaciones se basan en las diferencias de las velocidades de migración de los componentes de la mezcla. El nombre de cromatografía líquida de alta resolución (**HPLC**), se emplea para diferenciar estos nuevos métodos de sus antecesores

##### **1.4.1. COMPONENTES DE UN CROMATOGRAFO HPLC.**

###### **Aparatos.**

Para conseguir un flujo aceptable con rellenos de partículas de tamaños comprendidos entre 3 y 10  $\mu\text{m}$ , usados normalmente en la moderna cromatografía líquida, se necesitan presiones de bombeo de cientos de atmósferas. Como consecuencia de estas altas presiones, el equipo para cromatografía líquida de alta resolución tiende a ser más complejo y caro que los de otros tipos de cromatografía

###### **Depósito de fase móvil y sistemas de tratamiento del disolvente.**

Un instrumento moderno de HPLC, va equipado con uno o más dispositivos de vidrio o acero inoxidable, cada uno de los cuales puede contener 500 ml o más de disolvente. Con frecuencia incluyen dispositivos para eliminar de los líquidos los gases disueltos o partículas de polvo. Los primeros forman burbujas en la columna y con ello se originan ensanchamientos de banda, además tanto las burbujas como el polvo interfieren en el funcionamiento de los detectores. La desgasificación puede hacerse mediante un sistema de bombeo a vacío, un sistema de destilación, un dispositivo de agitación y calefacción o un sistema de purgado con el que los gases disueltos son eliminados de la solución mediante finísimas burbujas de un gas inerte que no es soluble en la fase móvil

La elución en la que se emplea un único disolvente de composición constante recibe el nombre de *isocrática*. Cuando se utilizan sistemas de dos o más disolventes que difieren significativamente en su polaridad se denominan *elución en gradiente*

###### **Sistemas de bombeo.**

Las condiciones que han de cumplir las bombas de cromatografía líquida son estrictas e incluyen: 1) proporcionar presiones superiores a los 6 000 psi (lb/in<sup>2</sup>), 2) salidas libres de impulsos, 3) velocidades de flujo de 0.1 a 10 ml/min, 4) reproducibilidad de flujo de 0.5 por 100 o mejores, 5) resistencia a la corrosión por diversos disolventes

### **Sistemas de inyección de la muestra.**

La inyección con jeringa a través de un septum elastomérico no es muy reproducible y en cromatografía líquida sólo se utiliza con presiones inferiores a 1 500 psi. En la inyección por flujo interrumpido el flujo del solvente se detiene momentáneamente, se retira un dispositivo de la parte superior de la columna y se inyecta la muestra directamente en el relleno mediante una jeringa.

### **Columnas para cromatografía líquida de alta resolución.**

Las columnas de cromatografía líquida se fabrican generalmente con tubos de acero inoxidable aunque a veces también emplean tubos de vidrio de paredes gruesas cuando se aplican presiones bajas (600 psi), la mayoría de las columnas tienen longitudes comprendidas entre 10 y 30 cm y diámetros internos de 4 a 10 mm. Los rellenos típicos tienen tamaño de partículas entre 5 y 10 µm. Las columnas de este tipo suelen contener 30,000 a 60,000 platos / m. Recientemente se han conseguido microcolumnas de alta resolución de 3 a 7.5 cm de longitud y de 1-4.6 mm de diámetro interno.

El tipo más común de relleno para cromatografía líquida lo constituyen partículas de sílice que se sintetizan mediante aglomeraciones de partículas de sílice submicroscópicas en condiciones que originan partículas mayores con un diámetro muy uniforme. Otros materiales de relleno pueden ser alúmina, polímeros porosos y resinas intercambiadoras de iones.

### **Detectores.**

Los detectores más utilizados en cromatografía líquida se basan en la absorción de radiaciones ultravioleta o visible, podemos encontrar tanto fotómetros como espectrofotómetros diseñados especialmente para utilizarse con columnas cromatográficas. Los primeros emplean por lo general las líneas de 254 y 280 nm de una lámpara de mercurio ya que muchos grupos funcionales orgánicos absorben en esta región. Los detectores espectrofotométricos son más versátiles que los fotómetros y su uso también está ampliamente difundido entre los instrumentos de alta resolución.

Otro detector que ha encontrado considerable aplicación es el basado en los cambios de índice de refracción del disolvente debido a las moléculas del analito, éste último es más general que selectivo y responde a la presencia de todos los solutos.

La cromatografía líquida de alta resolución, es el método más reciente dentro de las cromatografías líquidas. Es una técnica eficaz que encuentra aplicaciones principalmente para especies químicas de elevado peso molecular. Otra aplicación importante es la determinación rápida de pesos moleculares o la distribución de pesos moleculares de grandes polímeros o productos naturales. En este caso los volúmenes de elución de la muestra se comparan con los volúmenes de elución de una serie de patrones que tienen las mismas características químicas [Skoog/West, 1990].

## 1.5. REOLOGIA.

La reología ha sido definida como una ciencia dedicada al estudio de la deformación y el flujo de los materiales. La reología abarca el área de flujo de fluidos, la cual es de suma importancia para la industria del proceso de alimentos. La ventaja de usar el término reología para describir este fenómeno es que varios de los conceptos asociados con el flujo de fluidos pueden ser utilizados en la descripción de a) flujo de suspensiones, b) el flujo de productos granulares o polvos, y c) productos alimenticios sólidos.

Los alimentos, además de presentar un olor, color y sabor característico, exhiben determinado comportamiento mecánico al ser deformados. Estos pueden ser de diferente consistencia dura o blanda, correosos, gomosos o quebradizos, de textura uniforme o fibrosa, etc. En los cuales, unos fluyen fácilmente y otros con dificultad [Muller, 1973, Lewis, 1987].

Idealmente, un material puede encontrarse en cualquiera de estas dos formas: elástico y/o viscoso. Los límites ideales son el sólido perfecto de Hooke y el fluido perfecto de Pascal, ambos prácticamente inexistentes en la naturaleza, pero de gran interés para el desarrollo teórico de la reología.

Los parámetros reológicos fundamentales son elasticidad y viscosidad. Los productos alimenticios raramente exhiben estos comportamientos de manera ideal, los conceptos sirven únicamente como una base para el desarrollo de teorías más complejas. Cuando el cuerpo está bajo un esfuerzo de cizalla o presión hidrostática, los coeficientes involucrados son los módulos de cizalla y volumen.

Diferente al comportamiento elástico y plástico, varios fluidos alimenticios pueden ser descritos mediante un comportamiento ideal viscoso. Por ejemplo, suponiendo un sistema de dos placas paralelas, la respuesta de un fluido viscoso ideal cuando una fuerza es aplicada sobre el plano a una distancia ( $dy$ ) a la superficie más baja. Si la superficie superior se mueve a una velocidad ( $u + du$ ) y la superficie inferior se mueve a una velocidad ( $u$ ), la respuesta de un fluido viscoso ideal entre las dos superficies será la siguiente (Fig. 1.1)

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.1)$$

En la ecuación (1.1),  $\tau$  es el esfuerzo de corte o fuerza por unidad de área,  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad, y  $du/dy$  es el gradiente de velocidad, este existe entre las dos superficies y es equivalente a la velocidad de deformación. El comportamiento de un fluido como el descrito por la ecuación (1.1) es conocido como comportamiento Newtoniano. El agua y fluidos similares son fluidos Newtonianos. Sin embargo, varios productos alimenticios presentan algún tipo de comportamiento como una combinación de materiales elásticos y viscosos. Este tipo de materiales son caracterizados mediante la relación entre el esfuerzo de cizalla y la deformación, la cual es más compleja que el comportamiento elástico ideal o el viscoso ideal.

### 1.5.1. FLUJO NEWTONIANO.

El comportamiento de flujo de algunos fluidos puede ser caracterizado por un solo parámetro, la viscosidad Newtoniana, la cual está definida por la ecuación (1.1) [Rao y Rizvi, 1985]. 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  $h$  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  $v$  (fig. 1.1).

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 y Lewis et al., 1985].

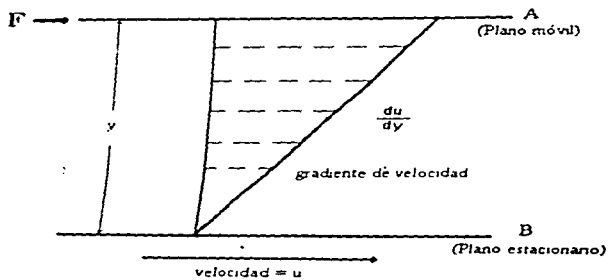


Figura. 1.1. Modelo para el flujo Newtoniano .

En un fluido, la viscosidad del líquido  $\mu$  esta dada por la relación (1.2), y ésta se mantiene constante [Vernon et al. 1985, Lever y Torreblanca, 1985, Lewis, 1987]. De esta manera, un fluido Newtoniano se define como aquel en el cual 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 [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].

### 1.5.2. 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

$$\mu = \tau \cdot \dot{\gamma} \quad (1.2)$$

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.

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 divide en dos categorías principales atendiendo al comportamiento de esfuerzo cortante / velocidad de deformación.

- 1) Fluidos en los que el esfuerzo cortante es independiente del tiempo o duración de la acción cortante (**tiempo independientes**) y,
- 2) Fluidos en los que el esfuerzo cortante depende del tiempo o duración de la acción cortante (**tiempo dependientes**)

### 1.5.3. FLUIDOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO.

Ejemplos de fluidos no-Newtonianos, donde el esfuerzo de corte es independiente del tiempo, son:

#### 1.5.3.1. Fluidos Pseudoplásticos.

A este tipo de fluidos pertenecen la mayoría de los fluidos no-Newtonianos como gomas, mucilagos, grasas, mayonesa, etc., los cuales experimentan una disminución de  $\eta$  al aumentar el esfuerzo cortante [Bird, R B ,1977, Geankoplis C J , 1978] Uno de los modelos que representa adecuadamente este comportamiento es mediante la ecuación [13], [Geankoplis C J ,1978]

La ecuación de dos parámetros (13), se transforma en la ecuación de la ley de Newton cuando el índice de comportamiento al flujo es igual a la unidad, ( $n = 1$ ). En este caso el índice de consistencia  $K$  es igual a la viscosidad, por lo que, la desviación del valor de  $n$  con respecto a la unidad es una medida del grado de desviación del comportamiento Newtoniano

#### 1.5.3.2. Fluidos Dilatantes.

Es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo, que se da a altas velocidades de corte, se trata del fenómeno opuesto al de la pseudoplasticidad. La gráfica no es lineal, pero los valores de  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$ , están unívocamente relacionados. Algunas soluciones dilatantes son las harinas de maíz y el azúcar en solución, el almidón en agua y una solución que contenga concentraciones elevadas de polvos en agua [Geankoplis 1986]

El fenómeno de dilatación también es el resultado de los factores que intervienen 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 dilatación puede ser visualizada como partículas de variado tamaño y formas encerradas, acomodadas y empaquetadas 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, contribuyendo así a originarse el fenómeno de dilatación [Rha, 1987]

Los sistemas dilatantes y pseudoplásticos son evaluados a través del modelo de la Ley de la Potencia o de Oswald de Waele, que matemáticamente viene expresada por la ecuación [Lewis, 1987, Rao y Risvi, 1986]

$$\tau = K (dv/dy)^n \quad , \quad \tau = K' \dot{\gamma}^n \quad (13)$$

Donde,  $\tau$  (Pa) es el esfuerzo cortante,  $K$  (Pa S<sup>n</sup>) es el índice de consistencia,  $(dv/dy)$ ,  $\dot{\gamma}$  (s<sup>-1</sup>) es la velocidad de deformación, y  $n$  es el índice de comportamiento de flujo



El comportamiento de los materiales al flujo se ilustra en la figura 1.2. Estas curvas ilustran el grado de desviación del comportamiento Newtoniano. Si  $n = 1$ , el producto es Newtoniano y  $K = \mu$ , si  $n > 1$ , se produce espesamiento y el producto es dilatante, si  $n < 1$ , se produce aclaramiento y el producto es pseudoplástico.

Además de considerar el comportamiento no-lineal, algunos fluidos no-Newtonianos también tienen características elásticas (como el caucho), por lo que en general, son denominados fluidos viscoelásticos. Los fluidos de esta naturaleza exhiben una recuperación elástica de las deformaciones que ocurren durante el flujo, es decir, muestran propiedades tanto viscosas como elásticas [Rao y Steffe, 1992], donde parte de la deformación se recupera al eliminar el esfuerzo.

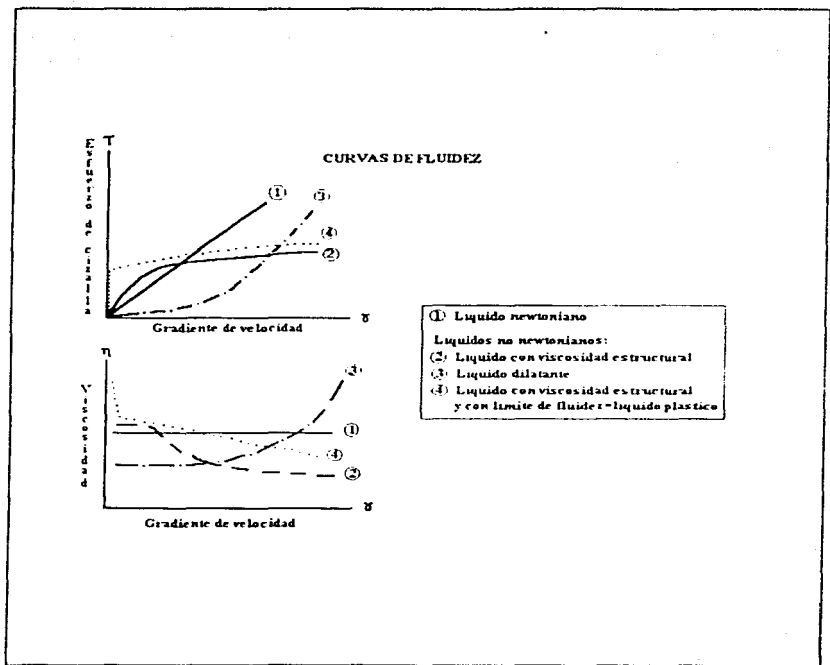


Figura.1.2. Curvas de flujo.

## **1.5.5. FLUIDOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO.**

### **1.5.5.1. Tixotropía.**

La tixotropía es un ablandamiento dependiente del tiempo. La representación gráfica que le corresponde es una curva similar a la de pseudoplasticidad (Fig 1.3), en cuanto que  $\mu$  desciende a medida que aumenta la velocidad de deformación. Difiere, sin embargo, de ella en que el descenso  $\mu$  no está relacionado exclusivamente con la velocidad de deformación, sino también con el tiempo. Manteniendo constante la velocidad de deformación,  $\mu$  desciende con el tiempo de manera que  $\mu$  no depende solo de la velocidad, sino también de la duración de la deformación.

Si las representaciones de  $\tau$  es función de  $\dot{\gamma}$  y 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]

### **1.5.5.2. Reopexia.**

La reopexia es el fenómeno inverso de la tixotropía, es necesario un riguroso control del tiempo en las determinaciones. En la figura 1.3 se representan gráficamente las curvas de estos fluidos [Muller, 1973, Rao y Rizvi, 1985]

La reopexia es un espesamiento dependiente del tiempo, en el que es curvilíneo el diagrama  $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ , y en el que estos dos parámetros no están unívocamente relacionados. Existen dos valores de  $\tau$  y para cada valor de  $\dot{\gamma}$  y a la inversa, si se hacen rutinariamente pruebas cíclicas.

Los factores que contribuyen a que se de 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 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]

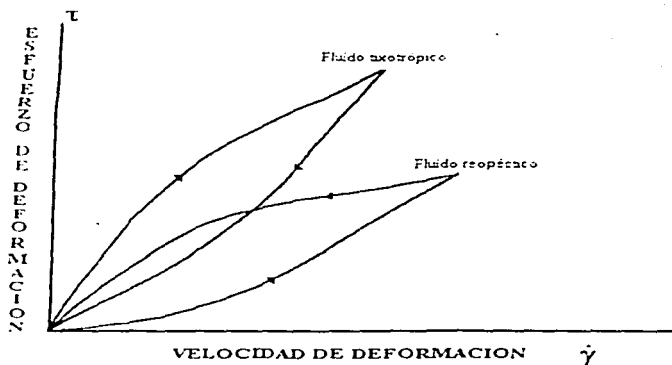


Figura 1.3. Fluidos reopéticos y tixotrópicos.

Estudiar la consistencia y textura que presentan estos materiales, involucra el área de la reología, la cual se encarga de estudiar el flujo de fluidos, importante en la industria del procesamiento de alimentos. Sin embargo, existen varios factores en los alimentos que hacen que las propiedades reológicas de estos sistemas sean más complejas.

Entre estos factores se encuentran

- a) Temperatura,
- b) Presión,
- c) Constitución físico-química de la sustancia (humedad y reacciones químicas),
- d) Gradiente de velocidad,
- e) Tiempo

De manera ideal un material puede encontrarse en cualquiera de dos formas: elástico ideal o viscoso ideal. Sin embargo, los biopolímeros raramente exhiben un comportamiento ideal. Los fluidos estructurados como es el caso de la mayoría de los polisacáridos de uso alimenticio, generalmente presentan un comportamiento reológico no Newtoniano, es decir, la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación no es lineal.

### 1.5.6. FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO REOLOGICO.

La reología de los alimentos está relacionada principalmente con sus cualidades, y su aceptación. Las propiedades de flujo de un alimento tienen relación directa con las operaciones del procesamiento de los alimentos y su textura. Aun más, las interrelaciones que existen entre la reología de un alimento y otras propiedades como la densidad, estabilidad y contenido de sólidos, las mediciones reológicas pueden ser formas más objetivas o más convenientes de evaluarlas.

De esta manera la función material de la viscosidad puede ser simplemente definida como la fricción interna que actúa dentro del fluido, es decir, la resistencia a fluir [Lewis, 1987]. En el procesamiento de alimentos, es importante tomar muy en cuenta la propiedad de transporte que define el comportamiento hidrodinámico de algún fluido es decir, la viscosidad [Lewis, 1987].

La estimación de la viscosidad es muy importante para el control de calidad, particularmente en productos que se supone sean de una consistencia particular en relación a su apariencia o sensación, por ejemplo crema, yogurth, etc. [Rao y Rizvi, 1985; Lewis, 1987].

#### 1.5.6.1. 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 descende muy acaudadamente al aumentar la temperatura [Muller, 1979; Vitali y Rao, y Rizvi, 1985].

Normalmente, la ecuación que describe este fenómeno es la llamada de Arrhenius

$$\mu = A \cdot \exp(E_a / R \cdot T) \quad (14)$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad (Pa s), A es una constante (Pa s),  $E_a$  es la energía de activación (Kcal/mol), R es la constante de los gases y T la temperatura absoluta en °K

Es generalmente aceptada la aplicabilidad de esta 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].

$$k = k_0 \cdot \exp(E_a / R \cdot T) \quad (15)$$

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

### 1.5.6.2. 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 ]

### 1.5.7. GEOMETRIAS DE MEDICION.

En alimentos, es bien sabido que la viscosidad como función de la velocidad de deformación es de primordial importancia. Por lo cual, son usadas una amplia variedad de viscosímetros en laboratorios de ciencia de alimentos. Se usan instrumentos reológicos que emplean viscosimetría rotacional.

Un diseño alternativo es el imponer un esfuerzo conocido o controlado y grabar la velocidad de deformación resultante. Recientemente, varias versiones nuevas de este tipo de instrumento se han introducido. Estos instrumentos son genéricamente llamados reómetros en vez de viscosímetros, debido a que miden otras propiedades reológicas además de la viscosidad de cizalla simple tales como fuerzas normales, viscosidad extensional, módulo elástico, módulo viscosos y módulo complejo.

Adicionalmente, el desarrollo reciente en la instrumentación reológica se ha incorporado la tecnología del microcomputador el cual facilita las operaciones. Existen, como ya se mencionó, varios tipos de reómetros, esencialmente para este trabajo nos enfocaremos a los de tipo rotacional, en el cual hay diferentes geometrías de medición.

La característica mecánica distintiva de un fluido es que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. La razón a la cual un fluido se deforma esta dada por la razón de cambio en la distancia entre dos puntos próximos moviéndose con el fluido dividido por la distancia entre los puntos.

En base a lo anterior, considerando un fluido que permanece entre dos platos paralelos, en un área determinada  $A$ . Si el plato base permanece estacionario y una fuerza de corte  $F$  es aplicada al plato superior, este se mueve con una velocidad constante  $v$ , entonces se obtienen las siguientes definiciones:

$$\tau = F/A \quad (16)$$

$$\gamma = v/h \quad (17)$$

Donde,  $\tau$  es el esfuerzo cortante y  $\gamma$  es la velocidad de deformación.

Para fluidos Newtonianos, esta es una relación lineal simple entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación. Para fluidos no-Newtonianos, la proporción del esfuerzo de corte entre la velocidad de deformación es llamada "la viscosidad de cizalla simple".

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

(18)

Donde,  $\eta$  es conocida como el coeficiente de viscosidad o más comúnmente, "la viscosidad".

Existen un número de métodos experimentales diferentes que son usados para medir la viscosidad de los fluidos. Los dos más ampliamente adaptados para diseños comerciales, son los de flujo en tubo y de flujo rotacional.

En la reología de alimentos, los viscosímetros rotacionales son más comúnmente usados que los de tubo. Los viscosímetros rotacionales tienen tres ventajas importantes sobre los de tubo.

- 1) La muestra puede ser deformada como sea deseado, por lo que los cambios en el comportamiento sobre el tiempo pueden ser evaluados.
- 2) Con un diseño apropiado, puede obtenerse una velocidad de deformación aproximadamente uniforme de la muestra, en contraste con la variación de la velocidad de deformación en un tubo del centro a la pared, y
- 3) Los viscosímetros rotacionales pueden ser modificados para medir otros parámetros reológicos junto con la viscosidad.

Tales instrumentos modificados deben ser llamados reómetros rotacionales, un término más general que viscosímetro. Sin embargo, los viscosímetros de tubo tienen sus ventajas, son generalmente más baratos, más fácilmente termo ajustables en un amplio rango de temperaturas, y tienen mayor precisión que los viscosímetros rotacionales. Sin embargo, para medir la reología de alimentos, los reómetros rotacionales son generalmente más usados.

Aunque los accesorios de medición han sido hechos de diferentes geometrías, la mayoría se derivan de uno de los tres diseños fundamentales.

- 1) Cono y plato,
- 2) Cilindros concéntricos, y
- 3) Platos paralelos.

De manera más detallada se presentan las geometrías de medición en flujo viscosimétrico en el Apéndice A.



### 1.5.8. REOLOGIA DE BIOPOLIMEROS DE ORIGEN MICROBIANO.

El descubrimiento y caracterización de hidrocoloides de origen microbiológico ha sido fuente importante en la obtención de polisacáridos, todos ellos de interés científico, pero no todos de valor comercial, debido a que no ofrecen ventajas reológicas significativas sobre las ya existentes. Sin embargo, existen excepciones, tales como la gelana

La gelana es un agente gelificante multifuncional y muy eficiente en muchas aplicaciones industriales, contrariamente a otros polisacáridos la gelana es capaz de originar una gran variedad de texturas de gel cuando se mezcla con otros polisacáridos, por su compatibilidad con proteínas, por ejemplo con gelatina, se pueden formar geles que no requieren refrigeración y no funden fácilmente cuando se someten a calentamiento

Estudios reportados en la literatura científica [ R. Chandrasekaran and A. Radha, 1995 ], indican que la goma gelana muestra una buena estabilidad sobre un amplio rango de pH (3.5 a 8.0), forma geles a concentraciones de polisacárido tan bajas como 0.05 % (p/p), la fuerza del gel se puede modificar cambiando tanto la concentración de polisacárido como la de los iones que favorecen la gelificación, los geles formados con gelana pueden ser termorreversibles o se pueden mantener estables al calentamiento manejando tanto la concentración como el tipo de ión, de tal forma que no puedan fundir aún a temperaturas superiores a 100°C. Sin embargo, una limitación a su uso como espesante es su alta sensibilidad a sales

Este tipo de hidrocoloides generó la necesidad de conocer adecuadamente las propiedades reológicas de sus soluciones y geles, concretamente para el caso de gelana, debido a que los geles manifestarán características novedosas, pero ciertamente éste necesita ser mezclado con otro hidrocoloide para disminuir su rigidez y sinéresis e incrementar su elasticidad, debido a que las características sensoriales de los geles monocomponentes de gelana no resultarán muy apetecibles para el consumidor

Un comportamiento similar se observa cuando concentraciones bajas de goma xantana y goma de algarrobo se dispersan en agua fría. Como se mencionó anteriormente, muchos sistemas muestran un comportamiento tipo sólido sin llegar a ser físicamente estructuras que puedan autosostenerse (Por ejemplo, la xantana). De hecho, una solución macromolecular altamente viscosa puede, debido al alto grado de traslape entre sus moléculas, no mostrar flujo y ser muy difícil de diferenciar de un gel sobre la base de una mera observación visual. La xantana es una molécula que adopta una configuración más rígida y por lo tanto tiene una movilidad molecular más baja que otros polisacáridos [Doublier et al., 1990]. En consecuencia existe una asociación de segmentos ordenados de las cadenas que dan lugar a la formación de una red tridimensional cuya debilidad es el resultado de la aparición y desaparición con el tiempo de dicha asociación

### 1.5.9. REOLOGIA DE BIOPOLIMEROS DE ORIGEN NATURAL.

Los hidrocoloideos vegetales ocupan un lugar preponderante, más aún, cuando las tendencias mundiales indican un marcado regreso hacia la utilización de aditivos de origen natural. De lo anterior, se puede afirmar que el uso de gomas es muy extenso y dada la similitud de los polisacáridos del mucilago de nopal con otras gomas y pectinas, las posibilidades de aplicación industrial son prometedoras.

Un ejemplo de hidrocoloide de origen natural, son las sustancias pécticas, estas se usan generalmente para referirse a un grupo de polisacáridos vegetales en el cual el ácido D-galacturónico es el principal componente. Las sustancias pécticas se encuentran fundamentalmente asociadas con la hemicelulosa en las paredes celulares de las plantas y son abundantes en tejidos suaves, como la cascara de frutas cítricas, por ejemplo, manzanas, peras y otros frutos.

La pectina extraída es definida como un polisacárido ácido que contiene dentro de su estructura primaria, azúcares neutros como galactosa, glucosa, ramnosa, arabinosa y xilosa. Además, una gran cantidad de ácido galacturónico. Además, son polímeros compuestos generalmente de unidades de (1-4)  $\alpha$ -D-galacturonapiranosilo y se encuentra en las laminillas intermedias de las células vegetales. Un aspecto importante que diferencia a las pectinas entre sí es su contenido en ésteres metálicos o grado de esterificación, que disminuye al producirse la maduración de las plantas. El grado de esterificación es definido como el número de residuos de ácido D-galacturónico esterificados sobre el total de ellos.

Las pectinas presentan la habilidad que en medio acuoso tienen la capacidad de formar geles en presencia de ácidos, sales y azúcares. Se han dividido en dos grupos:

- 1) Pectinas de bajo metoxilo,
- 2) Pectinas de alto metoxilo.

Las pectinas de alto metoxilo forman geles a valores bajos de pH, donde la actividad del agua es reducida, por la adición de grandes cantidades de azúcar. Además, la pectina puede formar geles de bajo metoxilo, la gelificación es dependiente de la presencia de iones calcio, el cual, casi siempre lo provee la misma fruta.

Dentro de sus propiedades reológicas de soluciones de pectina, presentan ser muy dependientes del pH y de la presencia de iones, en particular de iones calcio o metales no alcalinos. Adicionalmente, en sistemas donde otros polímeros gelifican, la pectina no es soluble y en sistemas donde otros polímeros no gelifican, éste podría formar gel. Otro factor a considerar en sus propiedades reológicas es el grado de esterificación y el peso molecular.

Estudios reportados en la literatura [Rolin, C., et al 1992] han presentado que en soluciones diluidas de pectina (alto metoxilo) alrededor de 0.5% (p/p) son fluidos Newtonianos, y estas son poco afectadas por la presencia de iones calcio. La viscosidad de soluciones muy diluidas aumenta con el incremento del pH. Lo anterior, se ha interpretado como una expansión de las dimensiones de la molécula entre la repulsión de grupos ácidos disociados dentro de la misma molécula.

**FIGURA. 1.4. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE EXTRACCION DE LA PECTINA.**



Los hidrocoloides de origen natural de mayor consumo alimenticio, son tanto las carrageninas y pectinas tal como se muestra en la tabla 1.2. El desarrollo y la investigación de polisacáridos de origen natural, ha sido poco estudiado y por consiguiente sus usos en la industria de alimentos son limitados, una alternativa tecnológica interesante en función de sus características funcionales muy particulares en los medios acuosos donde este interviene, podría ser la goma de mucilago de nopal (*Opuntia ficus-indica*)

**TABLA 12. CONSUMO EN EL MERCADO DE LOS POLISACARIDOS DE 1988-1995.**

<b>POLISACARIDO</b>	<b>(%) DE INCREMENTO DE CONSUMO</b>
XANTANA	+ 10.7%
ALMIDONES MODIFICADOS	+ 4.6
PECTINA	+ 3.6
GOMA GUAR	+ 3.2
CARRAGENINA	+ 2.8
GRENETINA	+ 2.3
ALGINATOS	+ 1.3
LOCUST BEAN GUM	+ 0.6
GOMA KARAYA	- 2.2
AGAR	- 2.8
GOMA ARABIGA	- 3.5
TRAGACANTO	- 6.0

Fuente Norton.,1991, Gordon.,1995.

## 1.6. MUCHILAGO *Opuntia ficus-indica*.

El uso de las cactáceas como fuentes de gomas es muy reducido y comercialmente solo se conoce el uso de la goma de cholla, la cual es extraída de la planta *Opuntia fulgida*, y es usada como adhesivo [Saag, et al., 1975]. Sin embargo, las posibilidades de utilización del mucilago *Opuntia ficus-indica* son muy interesantes dada la similitud que presenta en su estructura química con algunas gomas comerciales (por ejemplo, las pectinas).

En México, la especie *Opuntia ficus-indica*, es una especie ampliamente distribuida a partir de la cual se han generado con ella muchos híbridos mundialmente distribuidos. El hecho de que esta planta presente la secreción de un compuesto mucilaginoso constituido en su mayoría por polisacáridos, ha enfocado la atención de esta investigación.

El objetivo es obtener productos que puedan utilizarse como substitutos de polímeros o mezclas con ciertos polisacáridos comercialmente importantes. El mucilago puede existir como una sustancia intracelular y muchas veces es una reserva del alimento o de agua.

El mucilago ha sido dividido en tres grupos, de acuerdo a sus características químicas.

- 1) Los polisacáridos neutros que contienen uno o más azúcares residuales, unidos a su vez a través de grupos reductores, con la formación de sustancias de alto peso molecular.
- 2) Polisacáridos que contienen residuos de ácido urónico, así como otros residuos de azúcares, y
- 3) Los mucilagos de algas, que contienen sales, ésteres y azúcares formadores de moléculas de alto peso molecular. Es común llamar a estos polisacáridos gomas, sin embargo se ha preferido llamarles de esta manera debido a que este término es sinónimo de coloide hidrofílico [Klose Glicksman 1970].

Normalmente casi todas las gomas son solubles en agua fría dando líquidos mucilaginosos. Además de acuerdo a lo reportado en la literatura científica, mucilago es una designación que se usa para definir ciertas sustancias gelatinosas que se encuentran en algunas plantas naturales (por ejemplo, *Opuntia ficus-indica*).

### 1.6.1. ESTRUCTURA DE LA GOMA DE MUCILAGO *Opuntia ficus-indica*.

Diversos estudios reportados en la literatura sobre la composición química de la *Opuntia ficus-indica* coinciden en reportar la presencia de galactosa, arabinosa, ramnosa y xilosa además de ácido galacturónico y ácido urónico, aun cuando esta presente en cantidades pequeñas comparadas con las de las pectinas [Saag et al. 1975]. La mayoría de las gomas naturales son polisacáridos complejos amomios metálicos [Klose y Glucksman 1970].

Los pocos estudios existentes en cuanto al mucilago de nopal, son referentes a la estructura físico-química secundaria principalmente. En estos estudios se ha reportado que, el mucilago es una fibra que contiene una molécula de hasta 30000 unidades de diferentes azúcares [Trachtenberg 1982, Mc Garvie y Parolis 1979].

Los azúcares más abundantes son [Mc Garvie 1979]

-	Arabinosa	(42.4%).
-	Ramnosa	(6.4%).
-	Galactosa	(18.4%).
-	Xilosa	(24.5%).

Además, el mucilago contiene una considerable cantidad de **ácido galacturónico(8.4%)**, el cual tiende a asociarse fuertemente en presencia de iones calcio. La estructura de los polisacáridos más abundantes se presenta en la figura 1.5. En donde la composición química del mucilago se presenta en la Tabla 1.3. Adicionalmente, se ha reportado que la producción de mucilago es una característica de la familia cactacea, tal como se ha descrito anteriormente. Este es un polisacárido ácido (pH 4.5-5.7) que posee una estructura ampliamente ramificada.

**TABLA 1.3. COMPOSICION QUIMICA DE LA *Opuntia ficus-indica***

ANALISIS	CARACTERISTICA:
HUMEDAD	El agua es el principal componente de los nopales y su contenido varia con la especie, humedad del suelo, la disponibilidad del agua en este, y edad de la planta
PROTEINAS	El contenido de proteínas en pencas varia desde 5 2% hasta 23% en base seca
LIPIDOS	El contenido de ácidos grasos presentes son Palmitico, Estearico, Oleico y Linoleico
CARBOHIDRATOS	Los principales carbohidratos son monosacáridos, disacáridos y polisacáridos En los mucilagos hidrolizados se ha aislado glucosa, fructosa, arabinosa, xilosa, galactosa, y ácido galacturónico.
ACIDOS ORGANICOS	El más abundante en las cactáceas es El ácido oxálico, que se encuentra generalmente en forma de sal de calcio
VITAMINAS	La presencia de ácido ascórbico, caroteno, tiamina, riboflavina y niacina
OTROS COMPUESTOS ORGANICOS	Se encuentran, almidones, aceites, celulosa, sustancias pécticas, glucosidos, lípidos, ceras, saponinas, aceites esenciales, resinas, latex, fenoles, pigmentos, y alcaloides
PECTINAS	Pectina total 13 84% (B S), Propectina 3 56%(B S), Pectina soluble 0 28%(B S)
GOMAS	Esta formada por ácido galacturónico, L-arabinosa, D-xilosa, D-galactosa, y trazas de L-ramnosa

Fuente: Mc.Garvie.,1979, Trachtenberg.,1982.

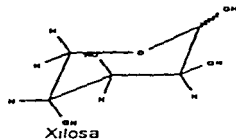
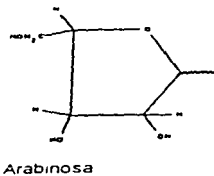
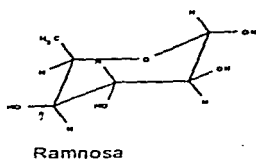
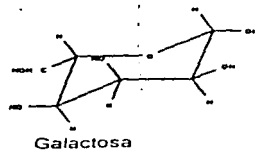
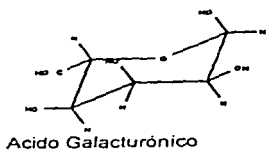


Figura. 1.5. Principales polisacáridos presentes en el mucílago de nopal *Opuntia ficus indica* [Bravo-Hollins,1987 y Mc Gravie-Parolis,1981].



## 1.6.2. PROPIEDADES REOLOGICAS DE SOLUCIONES DE GOMA DE MUCILAGO *Opuntia ficus-indica*

En éste estudio se espera obtener un hidrocoloide con características reológicas sui generis y diferentes a las de otros polisacáridos, lo cual, resultaría de utilidad en la manufactura de productos alimenticios, en donde el mucilago en solución acuosa imparta cualidades propias de este hidrocoloide (por ejemplo elástica), como gran estabilidad térmica

Los estudios reportados en la literatura presentan, que las unidades de azúcares del mucilago forman un polisacárido ramificado de ácido galacturónico y de ramnosa como unidad central. Las cadenas laterales tienen a su vez, un esqueleto formado de beta-galactosa, el cual se encuentra unido a las ramnosas del eje central y ramificaciones laterales con unidades de arabinosa, xilosa y galactosa [McGarvie et al, 1979 y 1981]. Tal como se presenta en la figura 1.6

Además, la estructura del mucilago está constituida principalmente por azúcares neutros y un azúcar ácido y el pH del medio en el que se encuentra es un pH ácido alrededor de 4.7

Los estudios existentes son referentes a su estructura química principalmente y hasta el momento no existen estudios reportados en la literatura científica en cuanto sus propiedades reológicas completas. Sin embargo, Trachtenberg y Mayer, 1982, señalaron que el mucilago purificado de *Opuntia ficus-indica* es un hetero-polisacárido de alto peso molecular con variación en el contenido de ácido úrico. El peso molecular aparente obtenido por Trachtenberg et al 1982, es inferior a través de la viscosidad intrínseca alrededor de  $4.3 \cdot 10^6$  a  $1.7 \cdot 10^6$  en la presencia de 10 y 100 mM de CaCl<sub>2</sub> a un pH 7, respectivamente, y en general, el mucilago purificado de *Opuntia ficus-indica* es un polisacárido de alto peso molecular que se comporta como un polielectrolito. La viscosidad de ésta solución es dependiente de la concentración de Ca<sup>2+</sup> y del pH, que viene a ser grande a pH alcalino



**OBJETIVOS**

**E**

**HIPOTESIS.**

## OBJETIVOS.

### OBJETIVOS GENERALES

Evaluar un proceso de extracción del mucilago de nopal (*Opuntia ficus-indica*), por medio de disolventes orgánicos y analizar su respuesta reologica en flujo de cizalla simple

### OBJETIVOS PARTICULARES.

- 1.- Desarrollar un proceso de extracción del mucilago a partir de acetona a diferentes condiciones, tales como temperatura, pH y cantidad de disolvente
- 2.- Desarrollar un proceso de extracción a partir de isopropanol para la obtención del mucilago a diferentes condiciones de extracción
- 3.- Analizar la respuesta mecánica de la solución a través de la reología en condiciones de flujo de cizalla simple, en estado estacionario

### HIPOTESIS

La respuesta reológica que presenta el material es función de las diversas condiciones de extracción

La goma de mucilago *Opuntia ficus indica* presentará en solución acuosa un comportamiento no-Newtoniano de carácter pseudoplástico, de manera similar a la de otros polisacáridos de origen natural con características similares

***CAPITULO II.  
METODOS Y MATERIALES.***

## **II. METODOLOGIA.**

### **II.1. MATERIA PRIMA.**

La materia prima para éste estudio es el nopal (*Opuntia ficus-indica*) El cual se recolectó de Milpa Alta, Edo de México. En la obtención de la materia prima se considero que fuera siempre un mismo lote y época de cosecha

El producto final fue la goma de mucilago (polvo malla 60/100) de color blanco opaco , y del cual se prepararon las dispersiones acuosas a concentraciones del 5 % (p/p) La goma de mucilago se disperso en agua desionizada a una temperatura de 25 a 35°C con agitación continua, durante 20 minutos Todas las muestras se analizaron después de haber preparado las dispersiones de la goma de mucilago

### **II.2. EXPERIMENTACION.**

La caracterización reológica y el proceso de extracción de la goma de mucilago de nopal, se desarrollaron 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 M C Luis Medina Torres

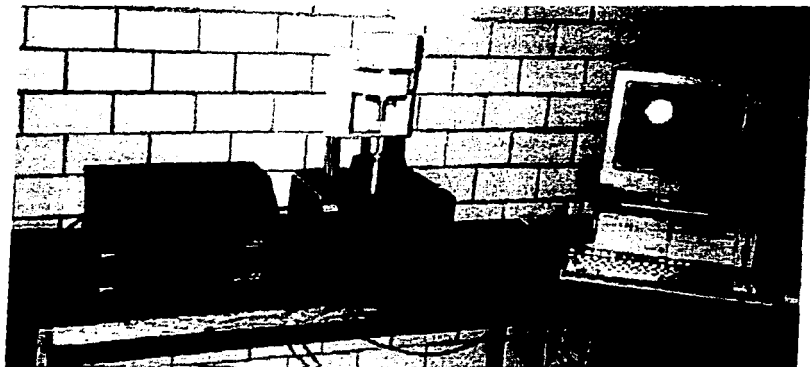
#### **II.2.1. REACTIVOS.**

Acetona marca J T Backer  
Isopropanol marca J T Backer  
Alcohol Iso-propilico marca J T Backer  
Agua desionizada  
Estándares de Dextranas

#### **II.2.2. EQUIPO.**

Balanza analítica OHAUS GA 200.  
Balanza analítica OHAUS GA 1-10  
Balanza analítica METTLER BB 3000.  
Centrifuga BECKMAN J2-MC.  
Baño maria HAAKE  
Reómetro HAAKE CV20N y sensor PK20-4º Se muestra en la figura II.1.  
Parrilla de agitación magnética con calentamiento  
Cromatógrafo de líquidos Perkin Elmer

Figura II.1 EQUIPO DE MEDICION  
RIOMETRO HXAKE CA 20N  
GEOMETRIA PK 20



### II.3. TECNICA DE EXTRACCION.

El proceso de extracción se definió, a partir de diversas técnicas de extracción reportadas en la literatura para exudados de plantas, y a través de las observaciones obtenidas durante la experimentación y considerando durante el proceso de extracción, los siguientes criterios

- 1) El tipo de disolvente, el disolvente tiene que ser muy selectivo y de baja viscosidad para evitar problemas durante la separación,
- 2) La temperatura, se fija a 25 ° C, aunque en estudios posteriores se observó que a medida que se incrementa la temperatura la rapidez de extracción del soluto es mayor, debido a que la solubilidad del extracto aumenta considerablemente (70°C)
- 3) El tiempo de agitación del disolvente con el extracto de mucilago, se fijó a 30 minutos, ya que se observó que a este tiempo la agitación favorecía un mayor contacto entre las fases

Lo anterior, se consideró ya que estos factores afectan de manera significativa el rendimiento de extracción, y posiblemente las propiedades físico-químicas y reológicas del producto final. El proceso de extracción final que se fijó en base a los criterios definidos anteriores, se muestra a en el diagrama de flujo de la figura II 2

#### II.3.1. EXTRACCION DE LA GOMA DE MUCILAGO DE NOPAL.

El método empleado para la extracción del mucilago de nopal, una vez realizada la primera etapa de aislamiento, fue basado en una extracción mediante el empleo de disolventes orgánicos

- 1.- En una relación 1:2 (v/v) de sobrenadante y acetona o isopropanol respectivamente, se procedió a separar el mucilago 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 mucilago "lavado"
- 2.- Se extrajo la goma de mucilago del embudo, de esta forma se obtiene goma de mucilago en forma precipitada, y por el otro, acetona o isopropanol residual. Se permitió ventilar a la intemperie la goma de mucilago precipitada con el fin de eliminar pequeñas cantidades de acetona o isopropanol todavía contenidas
- 3.- Posteriormente se hizo la adición de alcohol n-isopropílico en una relación 1:1 (p/p) para lavar la goma y llevar a cabo la neutralización de la goma
- 4.- Se dejó secar, en deshidratador convencional bajo las condiciones de vacío y temperatura ambiente durante un tiempo de 48 horas. El grado de secado de las muestras se hizo verificando el peso de estas en balanza analítica. El balance de materia se muestra en la Tabla III 1 y III 2
- 5.- Una vez secadas las muestras, se procedió a la preparación de dispersiones acuosas mediante el uso de agua desionizada y agitación magnética
- 6.- Adicionalmente la acetona y el isopropanol se recuperaron por medio de una destilación en un rotóevaporador obteniendo una recuperación del 80% del disolvente empleado



### **II.3.2. TECNICA DE OBTENCION DE PESOS MOLECULARES POR PERMEACION EN GEL EN UN HPLC.**

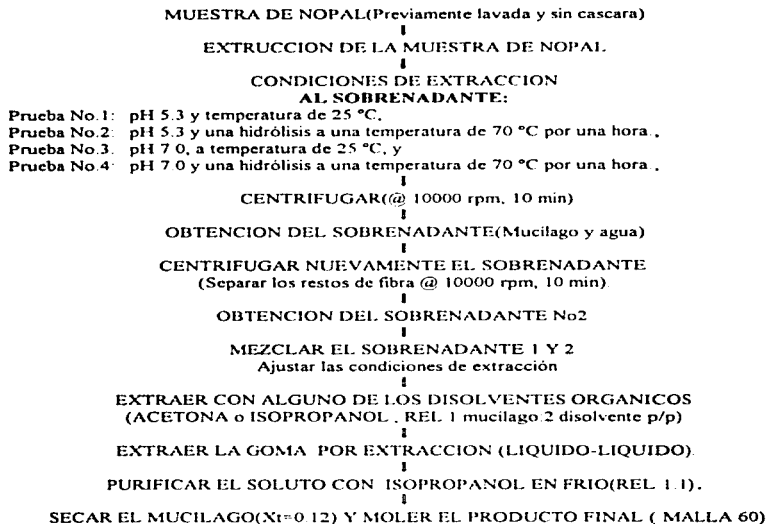
El método empleado para la obtención de pesos moleculares, fué utilizando los volúmenes de elución de las muestras de la goma de mucilago, que se comparan con los volúmenes de elución de una serie de patrones de peso molecular conocido de Dextrana. Para llevar acabo lo anterior se empleo un HPLC marca Perkin Elmer, con una columna analítica tipo TSK gel G 2000SW, Phenomena de 0.5 ml/min - 1 ml/min de flujo, con una fase móvil de solución salina al 0.5 % (p/p).

Posteriormente, se realizó una curva patrón con los estandares de peso molecular conocido de Dextranas, para poder interpolar los valores de las muestras de la goma de mucilago y determinar el peso molecular promedio. Los resultados se muestran en la sección de resultados.

Las Dextranas utilizadas para este trabajo fueron

Dextrana Sigma	5,000 000 - 40,000 000
Blue Dextrana Sigma	2,000 000
Dextrana Sigma	87,000
Dextrana Pharmacia	T 40,000
Dextrana Pharmacia	T 10,000

**FIGURA. II.2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE EXTRACCION DEL MUCILAGO *Opuntia ficus-indica*.**



#### **II.4. METODO DE MEDICION REOLOGICA.**

La caracterización reológica en flujo de cizalla simple se llevo a cabo en un Reómetro Haake (Rotovisco RV 20 CV 20N), con un sensor de medición cono y plato, PK 20/4 (diámetro=19.57 mm, ángulo=4°), a una temperatura de 25°C usando un baño con control de temperatura Haake F3. Para cada una de las muestras de la goma de mucilago analizadas

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 hizo 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 (variable cinemática)

Enseguida se efectuó la medición de esfuerzo (variable dinámica) mediante un programa elaborado en el software en el cual se declararon los parámetros de velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) controlada en un rango de de 1 a 200  $s^{-1}$  a las concentraciones al 5 % (p/p) en solución acuosa, en la cual se tomaron 20 registros de lectura por salto. El rango de temperatura empleado fué de 25°C.

Las mediciones se realizaron por triplicado con la finalidad de obtener una buena representación de la respuesta del material. Tal como se muestra en la sección de resultados.

***CAPITULO III***  
***ANALISIS DE RESULTADOS REOLOGICOS.***

### III. ANALISIS DE RESULTADOS.

#### III.1 RESULTADOS DE LOS BALANCES DE MATERIA PARA LOS METODOS DE EXTRACCION.

Los resultados de los balances de materia del proceso de extracción con las diferentes condiciones ambientales impuestas se presentan en la Tabla III 1 y III 2

**TABLA III.1.-BALANCE DE MATERIA PARA  
LOS PROCESOS DE EXTRACCION  
EMPLEANDO COMO DISOLVENTE ACETONA.**

METODO DE EXTRACCION:	1 pH=4.5, T=25°C	2 pH=4.5, T=70°C	3 pH=7, T=25°C	4 pH=7, T=70°C
<b>MATERIA PRIMA (Nopal fresco) Humedad(93 %).</b>	1005 g	1006 g	970 g	1000 g
<b>ALIMENTACION (Soluto + Agua).</b>	870 g	748 g	1540 g Ajustado el pH	1270 g Ajustado el pH
<b>DISOLVENTE (Acetona)</b>	1740 g	1496 g	3080 g	2540 g
<b>EXTRACTO (Soluto+Agua).....</b>	13 10 g	16 0 g	12 03 g	20 03 g
<b>EXTRACTO (Soluto).....</b>	6 8419 g	6 6775g	4 7065g	6 9184g
<b>Fracción de Soluto en el extracto.....</b>	0 5223	0 4170	0 3912	0 3454
<b>% de Soluto recuperado con respecto al mucilago acuoso.</b>	11 234 %	12 7531 %	4 3659 %	7 7822 %
<b>% de Soluto recuperado con respecto al nopal empleado.</b>	9 7255 %	9 4824 %	6 9315 %	9 8834 %

De estos resultados podemos apreciar que el método que mejores resultados presenta con respecto a su rendimiento es el 1 y el 2, pero en el método 2 sería necesario incrementar la temperatura al proceso(70°C, por una hr ) A diferencia del método 1, el cual además presenta una mayor fracción de soluto presente en el extracto y resultados reológicos muy similares

**TABLA III.2.-BALANCE DE MATERIA PARA  
LOS PROCESOS DE EXTRACCION  
EMPLEANDO COMO DISOLVENTE ISOPROPANOL.**

<b>METODO DE EXTRACCION:</b>	<b>1 pH=4.5, T=25°C</b>	<b>2 pH=4.5, T=70°C</b>	<b>3 pH=7, T=25°C</b>	<b>4 pH=7, T=70°C</b>
<b>MATERIA PRIMA (Nopal fresco) Humedad(93 %).</b>	1010 g	1010 g	1010 g	1000 g
<b>ALIMENTACION (Soluto + Agua).</b>	900 g	970 g	1185 g Ajustado el pH	940 g Ajustado el pH
<b>DISOLVENTE (Acetona)</b>	1800 g	1940 g	2370 g	1880 g
<b>EXTRACTO (Soluto+Agua).....</b>	10 1480 g	10 0 g	11 02g	12 88 g
<b>EXTRACTO (Soluto).....</b>	3 5396 g	2 1970g	3 8439g	4.4931g
<b>Fración de Soluto en el extracto.....</b>	0 3487	0.2197	0 3488	0 3488
<b>% de Soluto recuperado con respecto al mucilago acuoso.</b>	5 61 %	3 235%	4 6334%	6 828 %
<b>% de Soluto recuperado con respecto al nopal empleado.</b>	5 0065 %	3 1075 %	5 4369 %	6 4180 %

De estos resultados podemos apreciar que el método de extracción empleando disolvente de Isopropanol, en ningún caso presenta respecto a su rendimiento resultados comparables con los obtenidos con acetona. Además, se aprecia la misma tendencia que con un incremento en el pH, el rendimiento disminuye considerablemente, esto tal vez atribuido a las cargas de atracción y repulsión existentes entre el polisacárido y los OH<sup>-</sup> existentes en el medio.

### III.2. RESULTADOS EN FLUJO DE CIZALLA SIMPLE.

Después de haber realizado la experimentación a las diferentes condiciones de extracción con disolventes orgánicos, se procedió a la realización de las pruebas reológicas con soluciones de goma de nopal al 5% (p/p) a 25 °C en un reómetro HAAKE CV20N, con geometría de medición de cono y plato

Posteriormente, se procedió a obtener las curvas de cizallamiento simple, empleando el modelo de la ley de la potencia, donde los parámetros reológicos  $n$  y  $k$  del modelo (Oswald de Waale) son obtenidos por análisis de regresión lineal

Los resultados se presentan en la Tabla III 3. Con los parámetros reológicos (índice de flujo y consistencia) se analizaron los resultados reológicos generados en cada proceso de extracción

**Tabla III.3. RESULTADOS DE LOS PARAMETROS REOLOGICOS ( $n,k$ ), EMPLEANDO EL MODELO DE LA LEY DE LA POTENCIA**

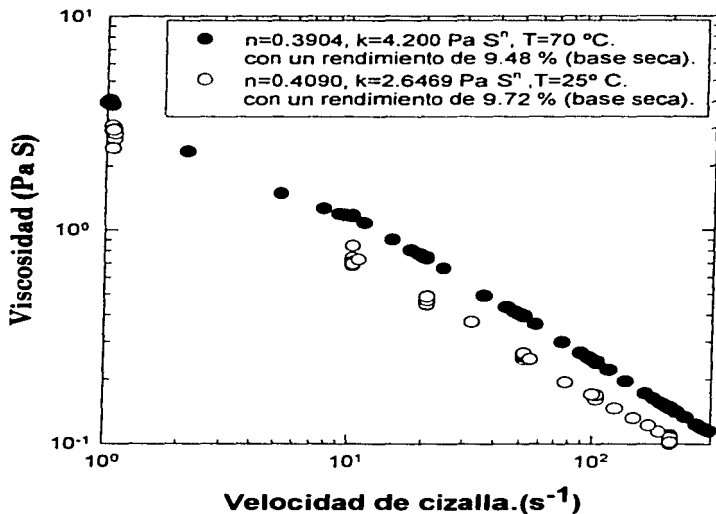
METODO DE EXTRACCION	1	2	3	4	5	6	7	8
RESPUESTA REOLOGICA:								
$n$	0.4090	0.3904	0.4878	0.4356	0.4431	0.5400	0.4099	0.4279
$k$	2.6469	4.200	1.530	3.097	3.7530	1.7420	0.8957	0.6798
$r^2$	0.99	0.99	1.00	0.99	0.98	0.99	0.98	0.96

**Donde:**

- 1 Extracción con Acetona a pH=4.5, y T=25 °C.
- 2 Extracción con Acetona a pH=4.5, y T=70 °C
- 3 Extracción con Acetona a pH=7.0, y T=25 °C
- 4 Extracción con Acetona a pH=7.0, y T=70 °C
- 5 Extracción con Isopropanol a pH=4.5, y T=25 °C
- 6 Extracción con Isopropanol a pH=4.5, y T=70 °C.
- 7 Extracción con Isopropanol a pH=7.0, y T=25 °C
- 8 Extracción con Isopropanol a pH=7.0, y T=70 °C.

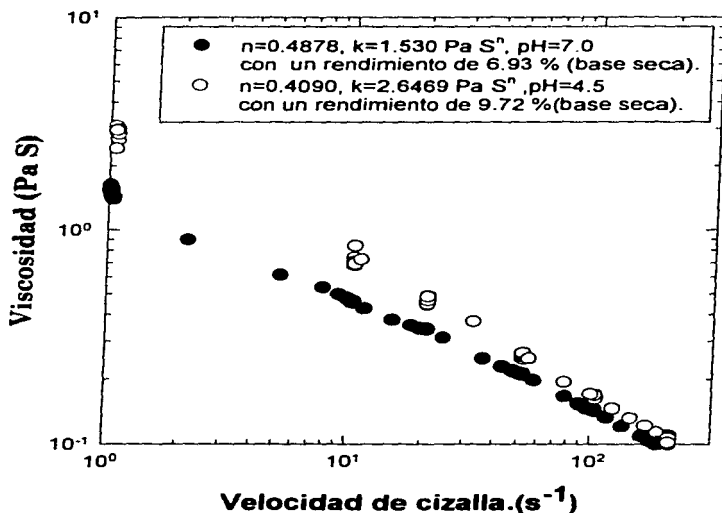
Los parámetros reológicos presentan en condiciones de flujo de cizalla simple en muestras de mucilago un comportamiento pseudoplástico, es decir, en este tipo de soluciones tiende a disminuir la viscosidad de cizalla a medida que aumenta la deformación del fluido

Adicionalmente, se aprecia el efecto que tiene el proceso de extracción sobre los parámetros reológicos, sobre todo del índice de consistencia

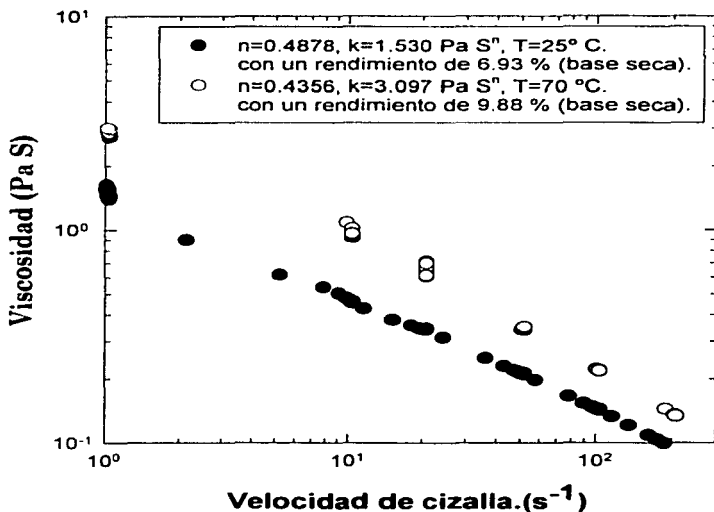


**Figura III.1.** Curvas de flujo de cizallamiento simple a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  con muestras al 5 % (p/p), utilizando acetona durante la extracción del mucilago y analizando el efecto de la temperatura a un pH de 4.5.

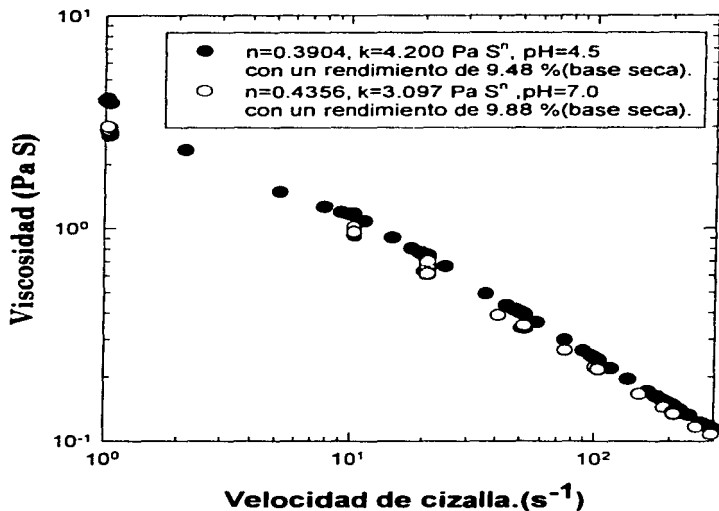




**Figura III.2. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25 °C con muestras al 5 % (p/p), utilizando acetona durante la extracción del mucilago y analizando el efecto del pH a una temperatura de 25 °C.**



**Figura III.3. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25 °C con muestras al 5 % (p/p), utilizando acetona durante la extracción del mucilago y analizando el efecto de la temperatura a un pH=7.0**

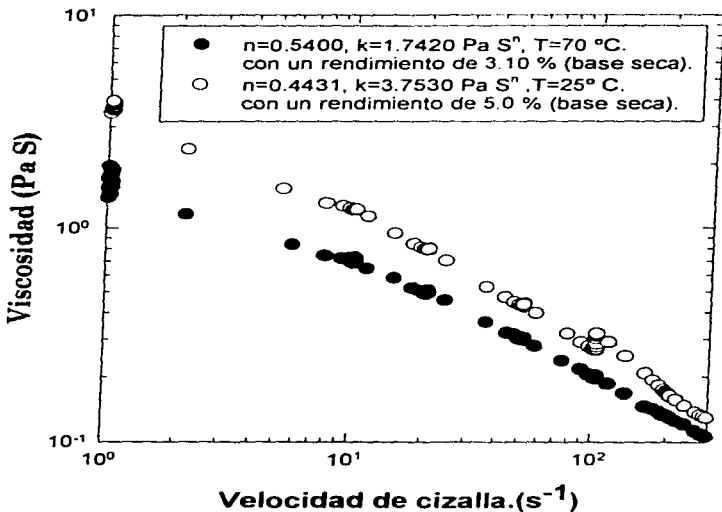


**Figura III.4. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25 °C con muestras al 5 %(p/p), utilizando acetona durante la extracción del mucilago y analizando el efecto del pH a una temperatura de 70 °C.**

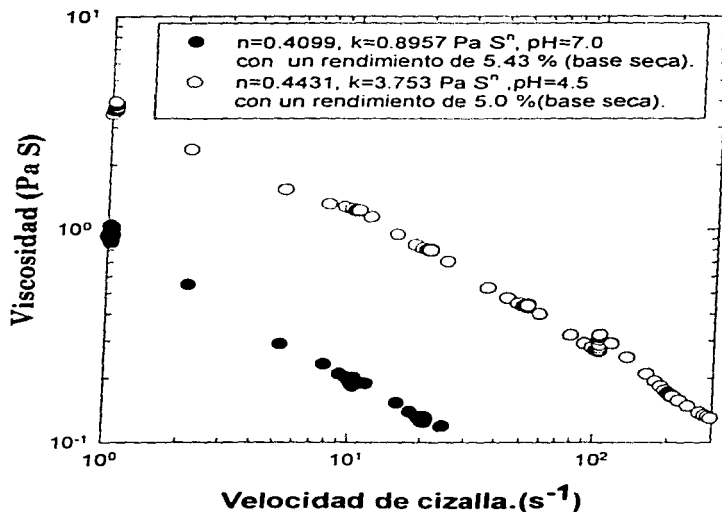
### III.2.1 ANALISIS REOLOGICO DE LAS MUESTRAS EXTRAIDAS CON ACETONA.

Los resultados obtenidos presentan a las diferentes condiciones de extracción estudiadas con respecto a su respuesta reológica, lo siguiente:

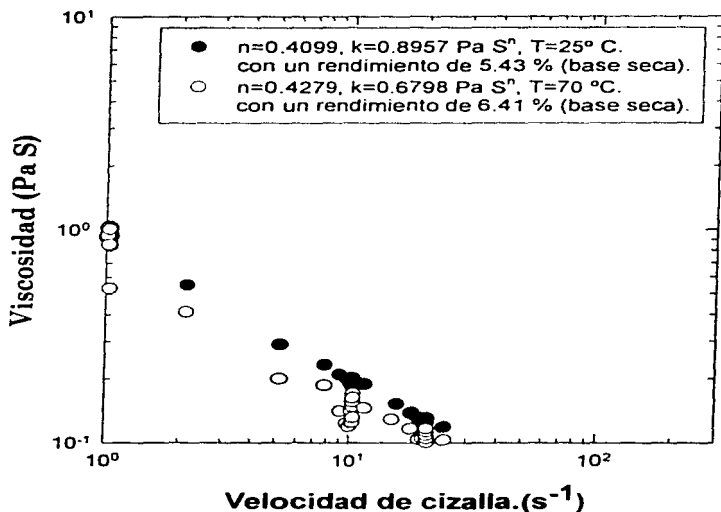
- En la figura III.1.** A las condiciones de extracción empleando acetona como disolvente de extracción y fijando la temperatura a 70 °C y un pH de 4.5, se observa un incremento en la consistencia con respecto a la prueba de extracción realizada a 25 °C con el mismo potencial de acidez, cuyos valores reológicos son  $K= 4.20$  y  $2.64 \text{ PaS}^n$ , respectivamente. Además, los índices de flujo son muy similares ( $n= 0.39-0.40$ ). Es decir presentan la misma pseudoplasticidad a pesar de las diferentes condiciones de temperatura de extracción empleadas. Por otro lado, los rendimientos para ambos procesos con respecto a la materia prima empleada fueron **9.48 y 9.72% en base seca.**
- En la figura III.2.** A las condiciones de extracción de 25 °C y a un pH de 7.0, se observa una disminución de la consistencia con respecto a la prueba realizada a 25 °C y pH de 4.5, cuyos valores reológicos son  $K= 1.530$  y  $2.6469 \text{ PaS}^n$ , respectivamente. Además, las diferencias en los rendimientos son también significativas **6.93 y 9.88 % en base seca** respectivamente.
- En la figura III.3.** A las condiciones de extracción de 70 °C y a un pH de 7.0, se observa un incremento de la consistencia con respecto a la prueba realizada a diferente temperatura 25 °C y un mismo pH 7.0, cuya respuesta reológica es  $K= 3.097$  y  $1.53 \text{ PaS}^n$ , respectivamente. Además, las diferencias en los rendimientos en ambos procesos son **9.88 y 6.93% base seca.**
- En la figura III.4.** Con respecto a las condiciones de extracción de 70 °C y a un pH de 4.5, se aprecia en la figura un incremento de la consistencia con respecto a la prueba realizada a 70 °C y pH de 7.0, cuya respuesta reológica es  $K= 4.20$  y  $3.097 \text{ PaS}^n$ , respectivamente. Además, las diferencias en los rendimientos en ambos procesos son **9.48 y 9.72% base seca.**



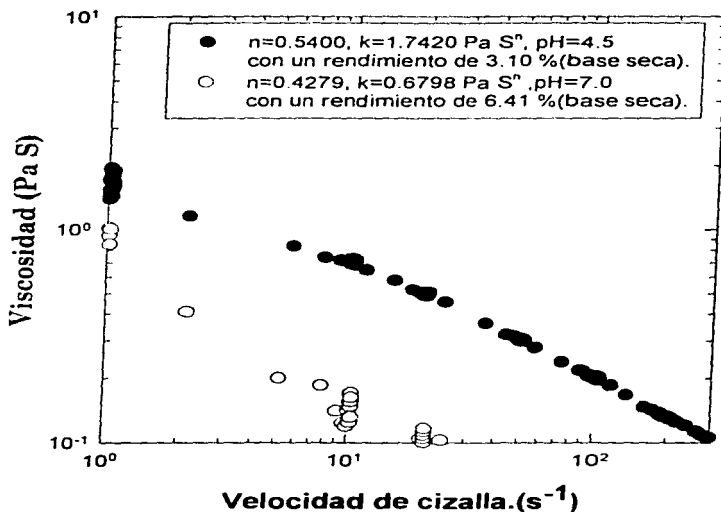
**Figura III.5. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25 °C con muestras al 5 % (p/p), utilizando *isopropanol* durante la extracción del mucílago y analizando el efecto de la temperatura a un pH de 4.5.**



**Figura III.6. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25 °C con muestras al 5 % (p/p), utilizando *isopropanol* durante la extracción del mucilago y analizando el efecto del pH a una temperatura de 25 °C.**



**Figura III.7. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25 °C con muestras al 5 % (p/p), utilizando *isopropano*, durante la extracción del mucílago y analizando el efecto de la temperatura a un pH=7.0**



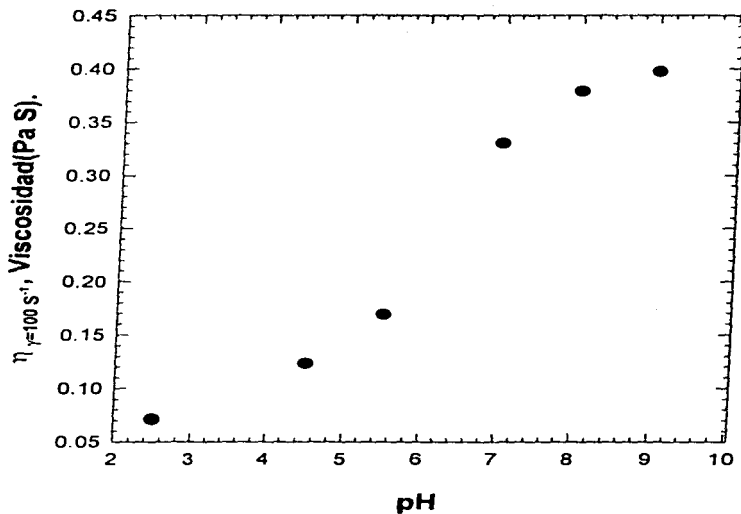
**Figura III.8. Curvas de flujo de cizallamiento simple a 25 °C con muestras al 5 %(p/p), utilizando isopropanol durante la extracción del mucilago y analizando el efecto del pH a una temperatura de 70 °C.**



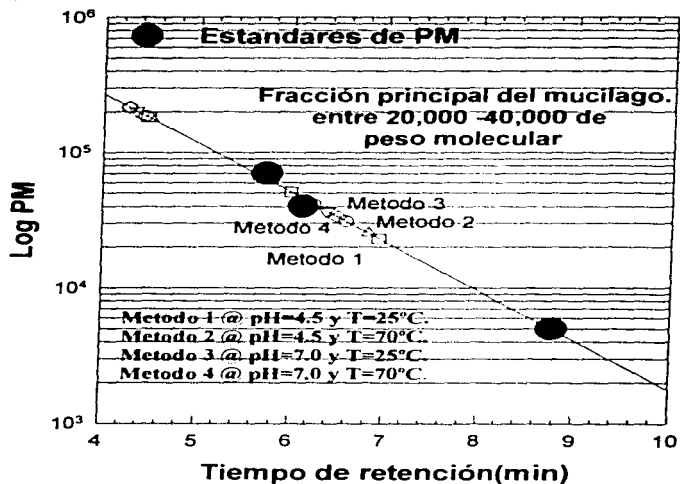
### III.2.2. ANALISIS REOLOGICO DE LAS MUESTRAS EXTRAIDAS CON ISOPROPRANOL.

Los resultados obtenidos presentan a las diferentes condiciones de extracción estudiadas con respecto a su respuesta reológica, lo siguiente:

- Figura III.5.** A las condiciones de extracción a 25°C a un pH de 4.5, se observa un incremento de la consistencia con respecto a la extracción realizada a 70°C al mismo pH,  $K = 3.75$  y  $1.742 \text{ PaS}^n$  respectivamente. Además los rendimientos para ambos procesos son 5.0 y 3.10 % en base seca respectivamente.
- Figura III.6.** A las condiciones de extracción a 25°C a un pH de 4.5, se observa un incremento de la consistencia con respecto a la extracción realizada a un pH 7.0 a la misma temperatura, cuyos parámetros reológicos obtenidos son  $K = 3.75$  y  $0.8957 \text{ PaS}^n$  respectivamente. Además los rendimientos para ambos procesos son 5.43 y 6.41% en base seca.
- Figura III.7.** A las condiciones de extracción a 70°C, se observa una disminución de la consistencia con respecto a la técnica de extracción realizada a 25°C y a un mismo pH 7.0, donde  $K = 0.6798$  y  $0.8957 \text{ PaS}^n$ , respectivamente. Además, los rendimientos para ambos procesos son 6.41 y 5.43 % base seca, respectivamente.
- Figura III.8.** A las condiciones de extracción a 70°C y un pH de 7.0, se observa una disminución de la consistencia con respecto a la técnica de extracción realizada a un pH de 4.5, donde,  $K = 0.6798$  y  $1.7420 \text{ PaS}^n$ , respectivamente. Además, los rendimientos para ambos procesos son 6.41 y 3.10% base seca, respectivamente.



**Figura III.9. Efecto del pH sobre la viscosidad @ $\eta_{\dot{\gamma}=100 \text{ S}^{-1}}$  en solución acuosa al 5 % (p/p) y 25 °C.**



**Figura III.10 Efecto del peso molecular promedio en el mucilago *Opuntia ficus-indica* con respecto a las condiciones de extracción con Acetona.**

### III.2.3. ANALISIS DE RESULTADOS DE PESOS MOLECULARES.

Los resultados de pesos moleculares para las muestras de goma de mucilago, solo se realizaron para las muestras que presentaron mejor comportamiento reológico y mejores rendimientos, por lo que son analizadas las muestras extraídas con acetona

**Figura III.9.** A las condiciones de extracción de 25 °C y empleando acetona, se preparó una solución al 5 % (p/p) en medio acuoso y se aprecia el efecto del pH, donde la viscosidad se incrementa significativamente en medio alcalino, no así en medio ácido

Se puede ver que aunque la viscosidad se incrementa agudamente en la región alcalina puede confirmar nuestra idea de puentes de hidrógeno intramoleculares, y lo reportado por Trachtenberg et al 1982, el cual supone que en el medio alcalino los OH<sup>-</sup> del medio pueden sustraer protones ácidos de la molécula, con lo que disminuyen aún más los puentes intramoleculares y la molécula incrementa su radio axial (suponiendo que, por ello la viscosidad se incrementa)

**Figura III.10** En esta curva se presenta el efecto que tiene el peso molecular con respecto a el proceso de extracción. Se puede apreciar el efecto de la hidrólisis y del pH en el peso molecular de las muestras extraídas con Acetona. El peso molecular promedio se incrementa por el efecto de pH

***CAPITULO IV.  
CONCLUSIONES.***

#### IV. CONCLUSIONES.

- Las soluciones acuosas de mucilago de nopal presentan un comportamiento altamente pseudoplástico, ( $n = 0.25 - 0.30$ ) El modelo de la Ley de la Potencia fue satisfactoriamente aplicado para la caracterización reológica de la goma de mucilago de nopal
- Los parámetros reológicos, empleando el modelo de la ley de la potencia, no presentan cambios significativos en el índice de flujo,  $n = 0.25 - 0.30$  No así, en la consistencia,  $k = 0.4 - 4.0 \text{ PaS}^n$  De tal manera, que son soluciones únicamente espesantes
- El método de extracción que mejores resultados presenta en función de los parámetros reológicos (ejemplo, la consistencia ) y su rendimiento es con **Acetona a un pH ácido y a una temperatura de 25°C o 70°C** . Además, el proceso de extracción es función directa de la respuesta del material.
- Se recomienda trabajar un proceso de recuperación de disolventes orgánicos , los cuales para en éste trabajo se llegan a recuperar hasta en un 80% del disolvente
- Se recomienda un estudio de sistemas de hidrocoloideos mezclados con esta goma, ya que es un campo muy extenso en cuanto a sus propiedades funcionales resultantes, y existen numerosas combinaciones de hidrocoloideos a diferentes condiciones ambientales fuerza iónica, concentración total y relaciones entre componentes en la mezcla, pH, temperatura, sin contar con las interacciones que se pueden dar entre otros constituyentes alimenticios, que resultarían de sumo interés para la industria de aditivos alimenticios

## APENDICE A

### A.1. GEOMETRIAS DE MEDICION.

Estos diseños tienen sus ventajas y desventajas, y la elección óptima esta dictada generalmente por las propiedades del material de la muestra

#### A.1.1. CONO Y PLATO.

Desde un punto de vista teorico, la geometria de cono y plato es la elección óptima Cuando como en la figura (A 1 ), el ángulo del cono es pequeño ( $\alpha < 3^\circ$ ), la velocidad de deformación a través del espacio anular conico puede ser considerado como una constante, la cual esta dada por

$$\gamma = \frac{\Omega}{\alpha} \quad (A 1 1)$$

Donde,  $\gamma$  es la velocidad de deformacion y  $\Omega$  es la velocidad angular (rad/sec) del cono rotatorio

La resistencia de una muestra al flujo estacionario impuesto por el cono rotatorio puede ser medida también como el torque requerido para rotar el cono como una velocidad angular constante o como el torque transmitido a través de la muestra al plato estacionario

Con el diseño más reciente, el miembro sensible puede ser hecho con gran rigidez y baja inercia. Esto permite evaluar varios tipos de mediciones dependientes del tiempo de corta duracion por ejemplo, la medición de la respuesta inicial de un fluido a un estres de corte repentino o transiente (Van Wazer et al , 1963)

El esfuerzo de corte puede ser determinado apartir del torque aplicado al plato estacionario con la siguiente ecuación

$$\tau = \frac{3T}{2\pi R^3} \quad (A 1 2)$$

Donde,  $\tau$  es el esfuerzo de deformacion,  $T$  es el torque, y  $R$  es el radio del plato

Hay ciertas ventajas prácticas en medir el torque en el cono en movimiento. Sólo un miembro necesita ser montado en soportes, por lo que el desarmado para la limpieza y la precisión del reensamblado se facilitan, el control de temperatura resulta generalmente más fácil de ajustar [Whorlow, 1980] La mayor ventaja de los accesorios de cono y plato es que la velocidad de deformación es constante por todo el espacio anular con ángulos pequeños del cono

Mediciones transientes tales como impulsos repentinos, relajación de estrés, y barridos de tensión son mejor realizadas con cono y plato. Otras ventajas incluyen tamaños de muestra pequeños y facilidad de limpieza. Sin embargo, los accesorios de cono y plato no trabajan bien con dispersiones burdas. Xu et al. (1986) encontraron que las pastas espesas de tomate no pueden ser evaluadas apropiadamente con esta geometría.

El problema con tales sistemas es el tamaño relativamente grande de las partículas dispersadas. Generalmente, las partículas más grandes deben ser 10 veces más pequeñas que el punto de estrechamiento en el espacio anular entre el cono y el plato. Normalmente, la punta del cono está truncada por lo que no toca al plato (A.1). En la investigación de Xu et al. de pastas de tomate, fue usado  $1^\circ$  del ángulo del cono, con un espacio anular truncado de  $45 \mu\text{m}$ . Los estudios en transición, con dispersiones alimenticias más finas se han realizado adecuadamente con cono y plato (Lewis y Shoemaker, 1984).



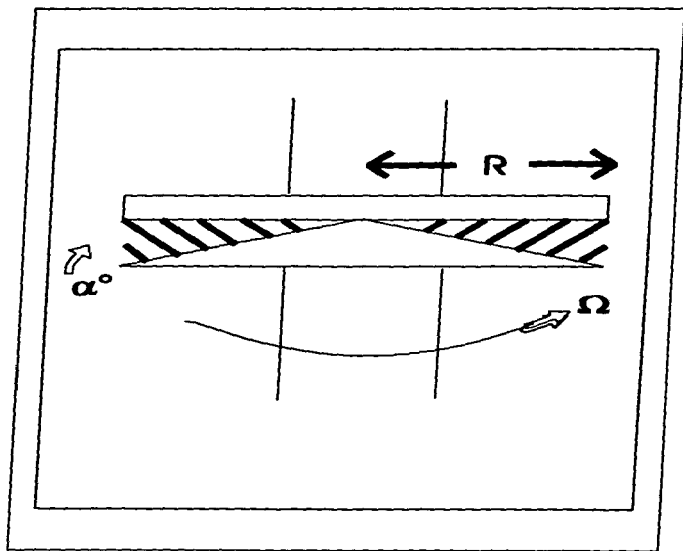


Figura A 1. Accesorios de Cono y Plato. [Shonaker et al. 1987]

### A.1.2. CILINDROS CONCENTRICOS.

Esta geometría es probablemente la más usada para mediciones típicas de flujo de baja y media viscosidad en sistemas alimenticios. Como se muestra en la figura (A.2), el material se encuentra entre los cilindros concéntricos.

Uno de los cilindros rota con una velocidad angular constante  $\Omega$ , y el otro permanece estacionario. Si el cilindro externo está rotando, entonces el esfuerzo de corte en la superficie del cilindro interno está dado por

$$\tau = \frac{T}{2\pi R_1^2 h} \quad (A 2 1)$$

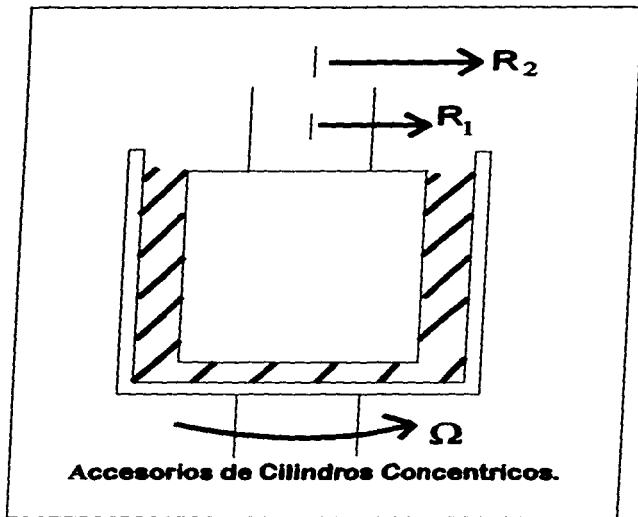
Donde,  $R_1$  es el radio y  $h$  es la altura del cilindro interno. El torque podrá igualmente ser medido del otro cilindro, y el esfuerzo de corte podrá ser determinado por sustitución del radio del otro cilindro  $R_2$  por  $R_1$  en la ecuación (A 2 1).

Debido a la diferencia de radios, el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación no son constantes a través del espacio anular. La solución práctica a este problema es el uso de pequeños espacios anulares para minimizar la variación de la velocidad de deformación.

En este caso, la velocidad de deformación será aproximadamente

$$\gamma_{max} = \frac{R_2 \Omega}{R_2 - R_1} \quad (A 2 2)$$

Donde,  $R_a$  es el promedio de  $R_1$  y  $R_2$ . Los espacios anulares pequeños son apropiados para fluidos homogéneos y suspensiones finas, pero no es apropiado para suspensiones granuladas. Otras desventajas incluyen la alta inercia y la dificultad para limpiar los accesorios.



**Figura A.2.** (Shumaker et al., 1987)

### A.1.3. PLACAS PARALELAS.

Aunque éste accesorio no es muy comunmente usado para mediciones de corte estacionario, ofrece ciertas ventajas. Esta geometria (A 3 ) se asemeja al cono y plato. Cuando una placa gira a una velocidad angular constante  $\Omega$ , la velocidad de deformacion varia apartir de cero en el centro a la máxima en la otra sección del plato

$$\gamma = \frac{R \Omega}{h} \quad (\text{A } 3 \text{ )}$$

Donde,  $h$  es la distancia entre las placas y  $R$  es el radio de las mismas

Unicamente a partir de que puede ser medido el torque total, el esfuerzo de corte y la viscosidad de un fluido requieren del conocimiento de la dependencia funcional del torque con respecto a  $\gamma_{\text{max}}$ . Esto se muestra por la siguiente ecuacion relacionando el esfuerzo de corte en el otro radio del plato  $\tau_{\text{max}}$  con el torque  $T$  y  $\gamma_{\text{max}}$ .

Experimentalmente, la derivada en la ecuacion A 3 2 es determinada a partir de una serie de mediciones del torque vs  $\gamma_{\text{max}}$  mediante la variacion de la velocidad angular de rotación

El valor de la derivada es tomado como la pendiente de la grafica ln-ln con la correspondiente velocidad de deformacion  $\gamma_{\text{max}}$ .

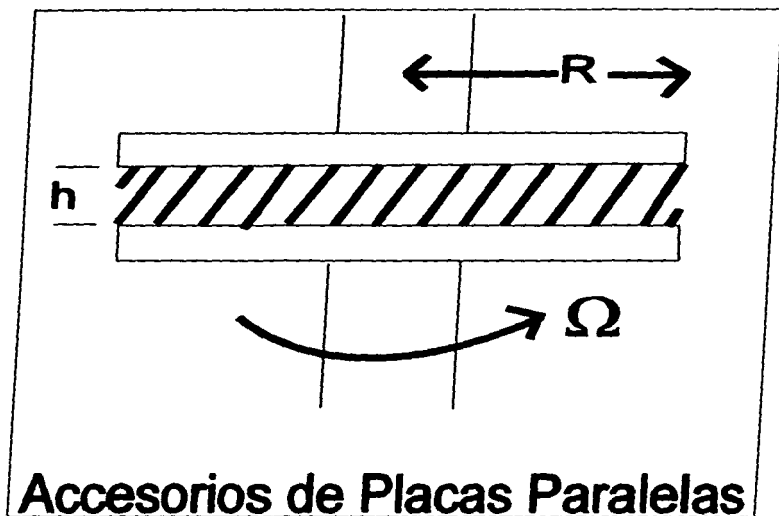
Las placas paralelas han dado ventajas. Krieger y Woods (1966), usando un viscosimetro de placas paralelas, este fue ocupado para medir el flujo de una solucion acuosa no-Newtoniana de hidroxietil-celulosa

$$\tau_{\text{max}} = \frac{3 T}{2 \pi R^3} \left( 1 + \frac{1}{3} \frac{d \ln T}{d \ln \gamma_{\text{max}}} \right) \quad (\text{A } 2 \text{ 3 )}$$

Encontraron que la geometria de placas paralelas rotacionales da resultados en completa semejanza con los viscosimetros capilar, cilindros concentricos y cono y plato. Apartir de que la separación de las placas  $h$  es una variable, esto da flexibilidad para materiales tales como dispersiones burdas las cuales resultan intolerantes para la angostura del espacio anular asociada con los viscosimetros de cono y plato o cilindros concentricos.

La separacion de las placas tambien permite extender el rango del esfuerzo de deformacion y la prueba para muestra resbaladiza

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



**Accesorios de Placas Paralelas**

## **A.2. POSIBLES FUENTES DE ERROR.**

La determinación de la viscosidad con los accesorios de geometrías ya mencionados se relacionan con la existencia de el flujo estable por todo el líquido, y se realizan numerosos ajustes para asegurar la formación y permanencia de un flujo

Han sido extensamente identificadas y analizadas (Walters, 1975, Whorlow, 1980) un número de fuentes de error. Estas incluyen los efectos terminales y de frontera (bordes) formados por el flujo simple o del desarrollo de los flujos secundarios, efectos de pared o deslizamiento, y calor viscoso

La importancia que han tenido las características sensoriales y de textura de los alimentos, así como la necesidad de cuantificar objetivamente estas características, ha impulsado el desarrollo de la reología en el área de fluidos alimenticios. Donde, los polisacáridos y proteínas son las macromoléculas responsables de la mayoría de las propiedades funcionales de muchos sistemas alimenticios, dentro de estas propiedades funcionales

Actualmente, se ha impulsado el conocimiento y manipulación de las propiedades reológicas de sistemas viscosificantes y gelificados con el propósito de impartir texturas innovadoras, tales como, los sustitutos de grasas a partir de hidrocoloides gelificados, además de tratar de mejorar las condiciones de procesamiento y almacenamiento

## APENDICE B.

### B.1. CARACTERIZACION FISICO-QUIMICA DEL MUCILAGO

Las técnicas comúnmente usadas en la caracterización de biopolímeros, son aplicadas con algunas modificaciones en la caracterización completa de este polisacárido. Los estudios físico-químicos realizados al mucilago de nopal, a fin de definir la composición del producto final, son estudios de

#### B.1.1. CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS DE LA GOMA DE MUCILAGO:

- 1) Color blanco opaco,
- 2) En presencia de agua se hincha,
- 3) Al desecar entre los dedos la goma deja un residuo harinoso

#### B.1.2. COMPOSICION QUIMICA DEL MUCILAGO DE NOPAL *Opuntia ficus-indica* :

La composición química obtenida es la siguiente

- 1) Humedad 92.21%
- 2) La determinación de azúcares se obtuvo por cromatografía líquida

ácido galacturónico,  
L-arabinosa,  
D-xilosa,  
D-galactosa, y  
L-ramnosa.

La composición de los azúcares es muy similar a los reportados en la literatura científica [Mc. Garvie et al. 1981], lo cual era de esperarse, debido a que la técnica de extracción es muy similar.

Adicionalmente, se ilustran los resultados físico-químicos complementarios de las muestras de mucilago, en la Tabla B 1, necesarios para definir la composición de dicho material.

**TABLA B.1. RESULTADOS FISICO- QUIMICOS DEL MUCILAGO *Opuntia ficus-indica*.**

<i>ANALISIS</i>	<i>RESULTADO</i>
HUMEDAD	92.21 %
CENIZAS	1.31 %
CALCIO	2.88 %
SILICIO	0.25 %
GRUPOS CARBOXILOS( CO <sub>2</sub> )	3.35 %
HIDROLISIS	ALCALINA
REACCION MOLISH(SE TRATA DE UN CARBOHIDRATO)	POSITIVA
REACCION FEHLING(EXISTENCIA DE GRUPOS CO)	POSITIVA.



### **B.1.3. ABSORCIÓN ATÓMICA DE MUESTRAS DE GOMA DE MUCILAGO.**

Además a las muestras se les efectuó un análisis de absorción atómica, a fin de determinar la concentración de iones divalentes ( $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ ) presentes en las muestras de goma de mucilago. Para lo cual, las soluciones se hidrolizaron previamente de la siguiente manera:

Se pesó 0.1 g de mucilago en un vaso de 100ml, se adicionó 30 ml de ácido clorhídrico 0.1 M, se tapó con un vidrio de reloj y se dejó calentar a ebullición durante dos horas. Una vez hidrolizada se calentó casi hasta sequedad para eliminar el exceso de ácido. Posteriormente se enfrió y se prepararon diluciones con 60 ml de agua desionizada, se transfirió a matraces volumétricos de 100 ml y se enjuagó varias veces para evitar que algo de muestra se quedara en el vaso y se procedió aforar. Por último, se tomaron 10 ml de solución con pipeta volumétrica y se transfirieron a un matraz de 100 ml y se aforó.

Finalmente, se procedió a realizar los análisis, tal como se muestra en la sección de resultados de éste apéndice, donde se presenta la concentración de iones presentes en el mucilago obtenido.

**B.I.3.1. RESULTADOS OBTENIDOS POR ABSORCIÓN ATÓMICA PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE CALCIO Y MAGNESIO EN EL MUCILAGO *Opuntia ficus indica*.**

**D) Los resultados en la determinación de *Magnesio***

***Curva patrón.***

C(ppm)	Absorbancia.	%T
0.2	0.352	0.4
0.3	0.478	0.7
0.4	0.608	0.2

Longitud de onda=258.2 nm. V=277 Volts.  
Donde, la ecuación de la curva patrón ajustada  
 $A=0.09533 + 1.28 \cdot C$ .

***Muestras de mucilago en solución:***

No. Lecturas.	Absorbancia.	C(ppm)	%T
1	0.558	0.358	0.7
2	0.556	0.356	0.3
3	0.560	0.360	0.5

***Concentración de magnesio de mucilago en solución:***

No. Muestras.	mg de Mg/g.	mmol/g
1	3.58	0.147
2	3.56	0.146
3	3.60	0.148

**Valor promedio de Mg. en mmol/g.=0.147**

**2) Los resultados en la determinación de Calcio en el mucilago.**

Curva patrón.

C(ppm)	Absorbancia.	%T
0 06	0 029	0 6
0 12	0 045	0 4
0 18	0 069	0 1

Longitud de onda=422.7 nm, V=257 Volts.

Donde, la ecuación de la curva patrón ajustada  
 $A=7.6666 \cdot 10^{-3} + 0.3333 \cdot C$ .

*Muestras de mucilago en solución:*

No. Lecturas.	Absorbancia.	C(ppm)	%T
1	0 148	0 048	1 3
2	0 143	0 046	0 8
3	0 140	0 045	0 1

*Concentración de magnesio de mucilago en solución:*

No. Muestras.	mg de Mg/g.	mmol/g
1	0.48	0 0119
2	0.46	0 0115
3	0.45	0 0112

*Valor promedio de Ca. en mmol/g.=0.0115*

## **BIBLIOGRAFIA.**

- Bird, R.B., Armstrong, R.C., Hassager, O., " *Dynamic of Polymeric Liquids*", Fluid Mechanics, Ed. John Wiley and Sons, N.Y., Vol. 1(1977)
- Bravo-Hollins, H., *Las cactáceas de México*. Universidad nacional Autónoma de México, Vol 1, pag 1-19, 62-83, 166-170, 320-322 (1978)
- Chandrasekaran, R., Radha, A., " *Molecular architectures and functional properties of gellan gum and related polysaccharides*" Trends in Food Science & Technology, 6, 143-48, (1995)
- Chandrasekaran, R., Millane, R.P., Arnott, S., Atkins, E.D.T. *Carbohydr. Res* 175, 1-15 (1988)
- Doublier, J.L., Launay, B. and Cuvelier, G. " *Viscoelastic properties of food* ", in Viscoelastic properties of food gels, Rao, M.A. and Steffe, J.F. (eds), Elsevier Plied Sci., N.Y., pp 371-434 (1992)
- Geankoplis, C.J., " *Non-Newtonian Fluids*", Transport Process and Unit Operations", Allyn and Bacon Inc, Boston (1978, 1986)
- Glicksman, M., " *Food Applications of gums in Food Carbohydrates*", Lineback D.R., Inglett G.E. (eds), 1st Basic Symposium Series, AVI Publishing Company, Inc. (1982)
- Gordon I.R., " *Food Applications of Hydrocolloids in Western Europe in the 90's*", Girat Johnston-Banks, F.A., " *Gelatin in Food Gels*" , Harris P. (Ed), pp 233-290, Elsevier Applied Science, New York (1990)
- Kang, K.S., Pettitt, D.J., " *Xanthan, Gellan, Welan and Rhamsan in industrial Gums*", Whistler R.L., BeMiller J.N. (eds) pp 1-19, 3a Edición, Academic Press Inc. (1983)
- Kirc, Enciclopedia de Terminologia Química 1980 Vol 7
- Klöse R. y Glicksman M., "Gums handbook of food aditives", General Foods Corporation Technical Center, New York (1970)
- Lewis M.J., " *Physical properties of foods and processing system*" , Ed. Ellis Horwood Ltd Chichester, England pp 465 (1987)
- Lopez, Munguia-C, A., Brito, E. y Galindo, E., *Cap. 13-Biopolimeros*, en Biotecnología alimentaria, Garcia, M., Quintero, R. y Lopez, A., ed. LIMUSA, México, D.F., (1993)

- Matsubashi, T., "*Agar in Food Gels*", Harris P (Ed ), pp 1-52, Elsevier Applied Science, New York (1990)
- Mc Garvie and Parolis H., "*The Mucilage Of Opuntia ficus-indica*", Carbohydrate Research, ed Elsevier Sci Pub 69, pp 171-179(1979)
- Mc Garvie and Parolis H., "*The Mucilage Of Opuntia ficus-indica Part 2*" Carbohydrate Research, ed Elsevier Sci, pp 1464-1466(1981)
- Muller, A G, "*Introducción a la reología de los alimentos*", Ed Acribia , Zaragoza, España (1973)
- Norton I T and Lillford P J, "*Food Hydrocolloids: an end user's viewpoint*" ,Gums and Stabilisers for the Food Industry, Phillips G O, Wedlock D J and Willms P A , ed Elsevier Applied Sci Publishers 3, pp 3-15(1991)
- Ochoterena, I, Las Cactaceas de México 1992 Mexico D F ed Cultura pp 53-54
- Pimienta Barrios Eulogio, "*El nopal tunero*, Primera Edición Departamento de Investigación Científica y Superación Académica, Universidad de Guadalajara, México(1990)
- Rao, M A , Cooley H J and Vitali A A , "*Flow properties of concentrated juices at low temperatures*" Food technology , 38, 113-119 (1984)
- Rao, M A y Rizvi, S S 1985 Engineering Properties of Food Marcel Dekker INC USA
- Rao, V N M "*Classification, description and measurement of viscoelastic properties of solid foods*", in Viscoelastic Properties of Foods , Rao M A and Steffe, J F eds, pp 3-47, Elsevier Applied ci, N Y (1992)
- Rao M A , y Steff, 1992 Viscoelastic Properties of Foods Ed British Library Catalogin in Publication Data Gran Bretaña, Londres
- Rha, Chokyun, 1978, Rheology of Fluid Food Technology Vol 32 No 7, pp 77-82
- Rolin, C , De Vries, J , "*Pectin in Food Gels*" , Harris P (Ed ), pp 401-434, Elsevier Applied Science, New York (1990)
- Ross-Murphy, S B "*Rheological methods, in "Critical Reports on Applied Chemistry., Biophysical Methods in Food Research"*, Chan, H W S Vol 5, pp 138-199, Blackwell Scientific Publications, Great Britain(1984)
- Saag I M K , Sanderson G , Moyna p Y ramos G , "*Cactacea mucilage composition*" , Journal Science Food agriculture , Vol 26, pp 993-1000 (1975)

- Sanderson, G R, "*Gellan Gum in food Gels*" , Harris P. (Ed ), pp 201-232, Elsevier Applied Science, New York (1990)
- SARH ,Informe Técnico 1981
- Shomaker, C F Lewis, D I Tamera, M S 1978 Instrumentation for Rheological Mesurments of Foods Journal of Food Technology March 1987, pp 80-84
- Sime, J W , "*Alginate in food gels*" , Harris P (Ed ), pp 53-78, Elsevier Applied Science, New York (1990)
- Skoog West Química Analítica, ed McGraw-Hill , Latinoamerica España, 1990, pp 527-570
- Stanley, N F, "*Carrageenan in food gels*" , Harris P (Ed ), pp 79-119, Elsevier Applied Science, New York (1990)
- Tanaka, T *Gels. Sci. American* , 244, 1, pp 124-138 (1981)
- Therkelsen, G H , "*Carrageenan in Industrial Gums*", 3a. Edición, Academic Press Inc (1983)
- Trachtenberg S and Mayer A M, "*Biophysical Properties of Opuntia ficus-indica Mucilage*" , Phytochemistry, 21, 12, pp 2835-2843 (1982)
- Vernon, Carter E J , Torre Blanca A y Lever Garcia C A 1985 Propiedades Reológicas de Emulsiones Alimenticias Rev. Tecnología Alimentaria Vol 18, No 1 México D F
- Vitali A A , and rao M A , "*Flow properties of low -pulp concentrated orange juice: Effect of temperature and concentration*" , Journal of food science 49 (3) 882-888 (1984b)
- Vitali A A , Roig S M y Rao M A 1974 Viscosity Behavior of Concentrated Passion Fruit Juice Rev CONSTRUCTURA, Vol 19, No 5 USA
- Whistler, R L , "*Functions of Polysaccharides in Foods*" , Food Additives, Branen A L , Davidson P M , Salminer S (Eds), pp 395-423, Marcel Dekker Inc , N York (1990)
- Whistler, R L , "*Introduction to Industrial gums*" , Industrial Gums, Whistler R L , BeMiller J N (eds) pp 1-19, 3a. Edición, Academic Press Inc (1983)