



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ESTUDIO DE LA VISCOSIDAD INTRÍNSECA  
DE LA GOMA *Opuntia ficus-indica* RESPECTO  
A DIFERENTES CONDICIONES  
AMBIENTALES IMPUESTAS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

QUÍMICO DE ALIMENTOS

P R E S E N T A:

CARLOS ANTONIO CÁRDENAS RUIZ



MÉXICO, D.F. **EXAMENES PROFESIONALES**  
FACULTAD DE QUÍMICA

2002



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**Paginación**

**Discontinua**

**Jurado Asignado****Profesores**

Presidente

FELIPE DE JESUS RODRIGUEZ  
PALACIOS

Vocal

FRANCISCO JAVIER CASILLAS GOMEZ

Secretario

LUIS MEDINA TORRES

1er suplente

ALBERTO TECANTE CORONEL

2do suplente

LUIS ANTONIO PEREZ ENRIQUEZ

**Laboratorio 313, Departamento de Alimentos y Biotecnología, Conjunto "E",  
Facultad de Química, UNAM.**

Sitio donde se desarrolló el tema.

M. en C.  Luis Medina Torres.

Nombre completo y firma del asesor del tema.

Carlos Antonio Cárdenas Ruiz 

Nombre completo y firma del sustentante.

Le agradezco mucho a Dios y a la H. Facultad de Química por la oportunidad que me brindo al permitirme concluir mi carrera, ya que sin el amor de mis Padres el ejemplo profesional de mis Hermanos y el apoyo incondicional de mis Amigos, hubiera sido una meta muy difícil, por ello GRACIAS a todos.

## A mis Padres:

Benito y Lucila  
Mi orgullo y ejemplo a seguir.

## A mis hermanos:

Dulce y Enrique  
Lucila y Carlos  
Paloma.

Por su amor y ejemplo Profesional.

## A mis Amigos:

Araceli Zapata, Santiago Rugerio ,Chavita, Paola Migliaro, Mara Reyes, Mayra Rodriguez, Mauricio Alvarez, Alvaro Castillo, Dr. Luis Medina, Dr. Alfonso S. Lira, Dr. Octavio Reyes.

**A mi abuela:  
Sra. Anastacia Vargas**  
**Quién me enseñó el amor y el respeto hacia los alimentos:**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO.**

---

**FACULTAD DE QUIMICA.**

**ESTUDIO DE LA VISCOSIDAD INTRÍNSECA DE LA  
GOMA *Opuntia ficus-indica* RESPECTO A  
DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES  
IMPUESTAS.**

**T E S I S.**  
**PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**QUÍMICO DE ALIMENTOS**  
**P R E S E N T A**

**CARLOS ANTONIO CÁRDENAS RUIZ**

México 2001

# **INDICE GENERAL**

<b>INDICE GENERAL</b>	<b>I</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b>	<b>V</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>JUSTIFICACION</b>	<b>3</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>4</b>
<b>HIPÓTESIS</b>	<b>4</b>

## **I.- GENERALIDADES**

• <b>CAPITULO 1. EL NOPAL <i>Opuntia ficus-indica</i>.</b>	<b>5</b>
1.1. HIDROCOLOIDES.	
1.1.1 Representaciones de las moléculas.	<b>9</b>
1.2. EL NOPAL <i>Opuntia ficus-indica</i> .	<b>13</b>
1.2.1 Clasificación taxonómica de los nopales.	<b>14</b>
1.2.2 Nombres técnicos y vulgares de los nopales en México.	<b>15</b>
1.2.3 Morfología del <i>Opuntia ficus-indica</i> .	<b>16</b>

1.3. Mucilago de <i>Opuntia ficus-indica</i> .	17
1.3.1 Características del mucilago.	17
1.3.2 Composición Química.	18
1.3.3 Estructura del Mucilago.	21
1.3.4 Aspectos Reológicos.	23
1.3.5 Importancia de la goma de mucilago.	24
• <b>CAPITULO 2. PROPIEDADES DE TRANSPORTE.</b>	<b>26</b>
2.1. REOLOGÍA.	26
2.1.1. Areas de la reología.	28
2.1.2. Reometría.	28
2.2 FLUJO.	29
2.2.1. Caracterización de flujo de fluidos.	29
1) flujo estacionario.	30
2) flujo dinámico oscilatorio.	30
2.2.2. Fluidos newtonianos.	31
2.2.3. Fluidos no newtonianos.	31
Flujo independiente del tiempo.	33
1) Materiales fluidificados por cizalla. (pseudoplásticos)	33
2) Materiales espesados por la cizalla. (dilatantes)	33
Flujo dependiente del tiempo.	34

1 Materiales fluidificados por el tiempo. (tixotrópicos)	34
2 Materiales espesados por el tiempo. (reopécticos)	34
<b>2.3. VISCOSIDAD.</b>	<b>37</b>
2.3.1. Viscosidad Intrínseca, $[\eta]$ .	42
2.3.2. Viscosidad Relativa, $[\eta_{rel}]$ .	47
2.3.3. Viscosidad Específica, $[\eta_{sp}]$ .	48
2.3.4. Viscosidad Intrínseca de algunas gomas y macromoléculas de importancia biológica.	48

## II.- METODO EXPERIMENTAL

• <b>CAPITULO 3. ESTIMACION DE LA VISCOSIDAD INTRINSECA.</b>	<b>50</b>
3.1. MATERIALES Y METODOS.	50
3.1.1 Técnica de extracción de la goma de mucílago.	50
3.1.2 Análisis proximal de la goma de mucílago estudiado.	52
3.1.3 Preparación de las soluciones de goma de mucílago.	52
3.1.4 Estimación de la viscosidad cinemática.	52
3.1.5 Estimación de la viscosidad intrínseca.	54
Reactivos.	55
Equipos.	56

• <b>CAPITULO 4. RESULTADOS.</b>	<b>57</b>
4.1.1 Determinación de la concentración crítica $C^*$ , en función de la concentración del hidocoloide y la fuerza iónica.	<b>57</b>
4.1.2 Determinación de la concentración crítica $C^*$ , en función del pH.	<b>59</b>
4.1.3. Determinación de la concentración crítica $C^*$ , en función de la temperatura.	<b>61</b>
<b>4.2. ESTIMACION DE LA VISCOSIDAD INTRINSECA [ <math>\eta</math> ] USANDO LOS MODELOS DE KRAMER Y MARTIN.</b>	<b>63</b>
4.2.1 Viscosidad intrínseca de la goma en función de la concentración del hidocoloide y la fuerza iónica.	<b>63</b>
4.2.2 Viscosidad intrínseca de la goma en función del pH.	<b>69</b>
4.2.3 Viscosidad intrínseca de la goma en función de la temperatura.	<b>73</b>
<b>III.- CONCLUSIONES</b>	
• <b>CAPITULO 5. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b>	<b>81</b>
• <b>ANEXOS.</b>	<b>84</b>
i) modelo de Flory	<b>84</b>
ii) nombre común y IUPAC para la viscosidad	<b>85</b>
iii) notación	<b>86</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>87</b>

# **INDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.1.1.</b>	<b>Propiedades de algunas gomas alimentarias más comunes</b>	<b>8</b>
<b>Tabla 1.1.2.</b>	<b>Clasificación de algunos hidrocoloides por su textura.</b>	<b>8</b>
<b>Tabla 1.1.3.</b>	<b>Clasificación taxonómica de los nopales.</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 1.1.4.</b>	<b>Nombres técnicos y vulgares de los nopales en México.</b>	<b>15</b>
<b>Tabla 1.1.5.</b>	<b>Composición química del mucílago.</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 1.1.6.</b>	<b>Comparación de las propiedades funcionales de carbohidratos lineales y ramificados.</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 2.2.1.</b>	<b>Viscosidad intrínseca de macromoléculas de importancia biológica.</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 2.2.2.</b>	<b>Viscosidad intrínseca de la goma xantana en función de la fuerza iónica (I) a 25°C.</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 4.4.1</b>	<b>Valores estimados de la viscosidad intrínseca a diferente fuerza iónica de la goma de mucílago <i>Opuntia ficus-indica</i>.</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 4.4.2</b>	<b>Valores estimados de la viscosidad intrínseca a diferente pH de la goma de mucílago <i>Opuntia ficus-indica</i>.</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 4.4.3</b>	<b>Valores estimados de la viscosidad intrínseca a diferente temperatura de la goma de mucílago <i>Opuntia ficus-indica</i>.</b>	<b>74</b>

# INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.1</b>	Estructura de algunas unidades que forman a los hidrocoloides.	<b>7</b>
<b>Figura 1.1.2</b>	Representaciones de las moléculas, i)halteras y ii)halteras múltiples.	<b>10</b>
<b>Figura 1.1.2.1</b>	Representación de las moléculas rígidas y flexibles.	<b>12</b>
<b>Figura 1.2.1</b>	Azúcares constituyentes del mucllago McGarvie y Parolis (1979).	<b>19</b>
<b>Figura 1.3.1</b>	Estructura espacial del mucllago, $\alpha$ ác. Gal ( $\alpha$ ácido galacturónico), $\beta$ ramn ( $\beta$ ramnosa) y gal (galactosa).	<b>21</b>
<b>Figura 1.3.2</b>	Estructura propuesta por McGarvie y Parolis (1981) para el mucllago del <i>Opuntia ficus-indica</i>	<b>22</b>
<b>Figura 2.1.4</b>	Tipos de comportamiento reológico (Geankoplis 1988).	<b>35</b>
<b>Figura 2.1.5</b>	Esquema para explicar la definición de coeficientes de viscosidad.	<b>37</b>
<b>Figura 2.1.6</b>	Esquema de un viscosímetro Cannon Fensek No. 75	<b>39</b>

<b>Figura 2.1.7</b>	Formas de las moléculas en i) un buen disolvente ii) en un mal disolvente.	<b>47</b>
<b>Figura 2.1.8</b>	Viscosímetro experimental Cannon Fensek No.75	<b>53</b>
<b>Figura 4.1.7</b>	Variación del <i>log</i> de la viscosidad específica a temperatura ambiente, sin fuerza iónica, I=50mM y I=100mM sobre la concentración de la goma de muclago <i>Opuntia ficus-indica</i>	<b>58</b>
<b>Figura 4.2.2</b>	Variación del <i>log</i> de la viscosidad específica a temperatura ambiente, pH=4, pH=7 y pH=10, sobre la concentración de la goma de muclago <i>Opuntia ficus-indica</i>	<b>60</b>
<b>Figura 4.2.6</b>	Variación del <i>log</i> de la viscosidad específica a temperatura de 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40°C, 50 °C y 60 °C, sobre la concentración de la goma de muclago <i>Opuntia ficus-indica</i>	<b>62</b>
<b>Figura 4.1.8</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente sin fuerza iónica por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>66</b>
<b>Figura 4.1.9</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente con I=50mM por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>67</b>

<b>Figura 4.2.1</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente con $I=100\text{mM}$ por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>68</b>
<b>Figura 4.2.5</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente con $\text{pH} = 10$ por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>70</b>
<b>Figura 4.2.3</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente con $\text{pH} = 4$ por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>71</b>
<b>Figura 4.2.4</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente con $\text{pH} = 7$ por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>72</b>
<b>Figura 4.2.7</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de $10^\circ\text{C}$ por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>75</b>
<b>Figura 4.2.8</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de $20^\circ\text{C}$ por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>76</b>

<b>Figura 4.2.9</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 30°C por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>77</b>
<b>Figura 4.3.1</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 40°C por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>78</b>
<b>Figura 4.3.2</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 50°C por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>79</b>
<b>Figura 4.3.3</b>	Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 60°C por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.	<b>80</b>
<b>Figura 5.1.1</b>	Curvas de viscosidad a cizalla simple de la goma xantana (Medina 2000).	<b>83</b>

## RESUMEN

En la caracterización de las macromoléculas se presentan varios problemas, en ocasiones dichas moléculas asumen la conformación de "hebra al azar" en solución, pero en otros casos pueden existir en formaciones helicoidales o parcialmente helicoidales.

La estimación de la función material de la  $[\eta]$  es muy importante en el estudio de este tipo de moléculas, con la viscosidad intrínseca se puede determinar el peso molecular promedio y se puede inferir ciertas conclusiones cualitativas acerca de la forma y el volumen hidrodinámico que ocupa una molécula.

En este trabajo se estudia el comportamiento de la viscosidad intrínseca  $[\eta]$  de la goma *Opuntia ficus-indica*, un polisacárido estructurado a fin de predecir la conformación en el espacio y el volumen hidrodinámico que ocupa a diferentes condiciones ambientales impuestas, tales como; pH, fuerza iónica, temperatura y concentración.

El conocimiento de la conformación de este polisacárido a diferentes condiciones infiere un posible arreglo molecular similar con otras gomas (sinergismo ó antagonismo) y esto permite dejar atrás ensayos de prueba y error en posibles formulaciones alimenticias.

En este estudio se evaluaron soluciones acuosas de esta goma a diferentes concentraciones, entre 50 a 800 ppm. En el efecto de la fuerza iónica se estudiaron estas mismas concentraciones pero con la adición de iones  $\text{Na}^+$  (reactivo J.T. Baker, ACS.) a concentraciones de 51.3 mM y 102.5 mM. Respecto a la temperatura se realizaron pruebas entre los 10°C hasta los 60°C para cada una de las concentraciones, y finalmente para analizar el efecto del pH se ajustaron soluciones entre pH de 4, 7 y 10.

Todas las soluciones una vez preparadas se les dio un tiempo de envejecimiento fijo por 48 horas a 13°C y finalmente la disolución de la goma fue analizada.

Las estimaciones de viscosidad específica se hicieron en un viscosímetro de capilar Cannon-Fensek Routine Viscometer No.75 a temperatura de 25°C y los datos se procesaron matemáticamente mediante el modelo de Kramer y Martín. A fin de estimar la viscosidad intrínseca  $[\eta]$  a condiciones de cizalla nula. Los datos obtenidos se analizaron respecto a los obtenidos con la curva de flujo de cizalla simple a las mismas condiciones ambientales.

Este estudio sugiere que la molécula de la goma *Opuntia ficus indica* adopta una conformación aleatoria y que se presentan cambios conformacionales en su volumen hidrodinámico con respecto a la fuerza iónica, pH y temperatura. Los anterior es de posible interés para el conocimiento científico y posibles aplicaciones alimentaria de este tipo de polisacárido.

## **JUSTIFICACIÓN**

La industria alimentaria se enfrenta con frecuencia ante la necesidad de desarrollar o implementar aditivos con propiedades funcionales muy particulares, a fin de buscar alternativas tecnológicas en la elaboración o en el manejo de sistemas alimenticios. Un ejemplo, son los hidrocoloides; los cuales son polisacáridos solubles en agua y extraídas de plantas terrestres o marinas o a través de metabolitos de microorganismos, que tienen la capacidad de contribuir en las funciones materiales de interés, tales como, la viscosidad o su capacidad de gelificar las dispersiones en las que se encuentran estas presentes.

Los hidrocoloides imparten propiedades funcionales en los alimentos, tales como; agentes viscosificantes, gelificantes. Debido a que estos polisacáridos pueden interactuar con ingredientes de los alimentos, y con otros polisacáridos, sus efectos sobre las propiedades reológicas de las mezclas, están determinadas por las composiciones químicas de los ingredientes y por las concentraciones de estos.

Estas interacciones modifican la funcionalidad del hidrocoloide mediante la alteración de sus propiedades reológicas: solubilidad y características gelificantes. La importancia de entender y definir las propiedades reológicas macro y micro estructurales es útil para el diseño de sistemas alimenticios, así como el diseño de procesos de flujo, control de calidad, almacenaje, mediciones de estabilidad del proceso e impartir una textura final a un sistema alimenticio.

## Objetivo General

El objetivo de este trabajo es el estudio macro-estructural a condiciones de cizalla nula de un polisacárido a partir de la viscosidad intrínseca  $[\eta]$  a diferentes condiciones impuestas fijas en régimen newtoniano.

Las determinaciones de viscosidad intrínseca son muy importantes en el estudio de este tipo de polisacáridos, ya que usando mediciones sencillas de viscosidad, es posible inferir la forma general que adopta la macromolécula en solución, la viscosidad intrínseca de un polímero depende en parte del tamaño de las moléculas del polímero. Este tipo de determinaciones estima el volumen hidrodinámico y la conformación de una molécula en el espacio y nos da información sobre las interacciones polímero-polímero, polímero-agua en el sistema y coadyuva en la interpretación del comportamiento reológico.

## HIPÓTESIS

Las variaciones de la temperatura, pH, fuerza iónica y concentración del polisacárido *Opuntia ficus indica* en solución, presentarán variaciones en el arreglo y volumen hidrodinámico que ocupa esta molécula y como depende de dichas condiciones.

## **I.- GENERALIDADES.**

### **CAPITULO 1**

#### **EL NOPAL *Opuntia ficus-indica*.**

##### **1.1. HIDROCOLOIDES.**

Los hidrocoloides se han definido como las sustancias de consistencia viscosa, generalmente de un carácter heteropolisacárido, que provienen de ciertas especies vegetales en forma accidental o por incisiones practicadas; sin embargo, actualmente el término se emplea para designar a un gran número de polímeros de alto peso molecular en su mayoría carbohidratos que tienen la habilidad de absorber grandes cantidades de agua cambiando las propiedades reológicas de un sistema en particular (Guzmán, 1997).

Estos polímeros pueden ser de origen vegetal que incluyen a las hojas galactomananas y granos de acacia, los exudados de planta, como son la goma arábica y la goma tragacanto y las gomas derivadas de hierbas marinas como son el agar, carrageninas y alginatos.

En los hidrocoloides de origen microbiano se encuentra la goma xantana, goma gelana y por síntesis se encuentran la carboximetilcelulosa (CMC), hidroximetilcelulosa (HPMC), celulosa microcristalina (MCC) y pectina (Barbosa.,1992). La mayoría de las gomas mencionadas producen disoluciones o dispersiones viscosas en agua caliente o fría y algunos forman geles y por su naturaleza coloidal son llamados hidrocoloides (Badui.,1996).

Los hidrocoloides tienen diversas aplicaciones funcionales en las formulaciones alimentarias como: agentes gelificantes, su capacidad de incrementar viscosidad, el estabilizar la suspensión y la emulsificación; es decir cambian las propiedades funcionales de los sistemas alimenticios donde estos intervienen.

Las unidades que en su mayoría forman a los hidrocoloides de origen natural son (Glicksman.,1986):

- ácido D-galacturónico.
- ácido D-glucurónico.
- D-galactosa.
- D-glucosa.
- D-manosa

Tal como se aprecian en la Figura [1.1.1], pueden verse las unidades de los hidrocoloides que dan propiedades reológicas muy particulares en los sistemas alimenticios donde se aplican.

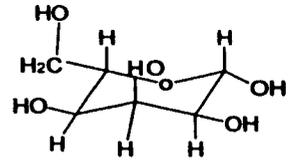
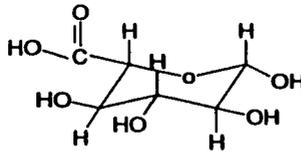
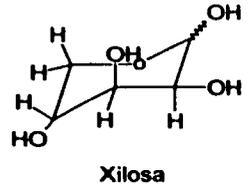
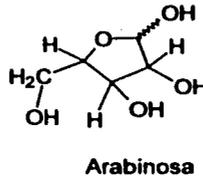
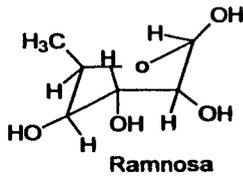


Figura 1.1.1. Estructura de algunas unidades que forman a los hidrocoloides.

La Tabla 1.1.2 nos da un resumen de la textura final de nuestro sistema al aplicar la goma, algunas de las cuales pueden tener la propiedad de ser gelificantes, espesante y estabilizante del sistema al que se aplique, mientras que otras como la goma guar solo es espesante.

**Tabla 1.1.1 Propiedades de algunas gomas alimentarias más comunes (Guzmán.,1997)..**

<b>Goma</b>	<b>Composición Química</b>	<b>Reología</b>
guar	D-manosa, D-galactosa	alta viscosidad no forma gel pseudoplástico
algarrobo	D-manosa,D-galactosa	alta viscosidad no forma gel pseudoplastico
arábiga	D-galactosa, L-arabinosa ácido D- galacturónico L-ramnosa	baja viscosidad fluido Newtoniano soluciones claras
karaya	ácido D- galacturónico D-galactosa L-ramnosa	viscosa no forma gel
agar	D-galactosa L-galactosa	fuerte termorreversible forma geles

**Tabla 1.1.2 Clasificación de algunos hidrocoloides por su textura (Guzmán.,1997).**

<b>HIDROCOLOIDE</b>	<b>GELIFICANTE</b>	<b>FUNCION ESPEANTE</b>	<b>ESTABILIZANTE</b>
Pectina (AM)	+	+	+
Pectina (BM)	+		
Carrageninas	+	+	+
Agar	+		
Alginato	+	+	+
CMC		+	+
Guar		+	
Xantana	+	+	+
Grenetina	+		
Arábica	+	+	+

El desconocimiento sobre las características de color, sabor, palatabilidad, valor nutritivo, etc., de los productos que se obtienen del nopal, así como las mejores variedades y la forma de establecer el cultivo de nopal y sus cuidados, han sido factores que limitan su uso, producción y comercialización.

El potencial de esta planta es más su uso como complemento en la dieta alimentaria de ganado bovino, caprino y lanar, o también como alimento nutritivo en nopalito (brote) y tuna (fruto) para consumo humano (Flores., 1994). En consecuencia es necesario generar información sobre esta cactacea que al igual que el maíz han sido parte fundamental en la historia alimentaria de México.

Este esfuerzo por generar información acerca de los derivados de esta ha sido investigada por Medina (1999) quien da a conocer la importancia de esta planta como probable hidrocoloide y su comportamiento reológico y estructural. Este trabajo esta dentro de esta línea de investigación y contribuye al estudio del comportamiento de la viscosidad intrínseca  $[\eta]$  de este tipo de goma *Opuntia ficus-indica*, para inferir su probable conformación en el espacio y el volumen hidrodinámico que ocupa la molécula de este hidrocoloide a condiciones impuestas.

### 1.1.1. REPRESENTACIONES DE LAS MOLÉCULAS.

Se conoce que la conformación que adoptan las moléculas pueden ser:

- 1) rígidas representadas como "halteras" o "halteras múltiples", ejemplo de esto las proteínas (hélice) o el DNA (hélice). Ver Figura [1.1.2].

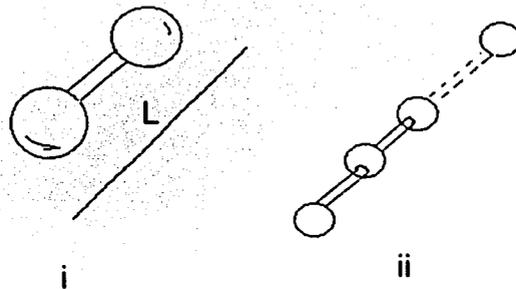


Figura 1.1.2. Representaciones de la moléculas, i) halteras y ii) halteras múltiples.

La expresión de la viscosidad sin interacción hidrodinámica es (Tecante., 1995):

$$\eta - \eta_s = n\kappa T \lambda \left[ 1 - \frac{18}{35} (\lambda \dot{\gamma})^2 + \dots \right] \quad (1.1.1)$$

∴

$$\lambda = \frac{ZL^2}{12\kappa T} \text{ Haltera} \quad (1.1.2)$$

$$\lambda_N = \frac{ZL^2 N(N+1)}{72(N-1)\kappa T} \text{ Haltera Multiple} \quad (1.1.3)$$

Donde:

$n$  : es el número de moléculas / U. de volumen.

$k$  : es la constante de Boltzman.

$Z$  : Coeficiente de fricción de las esferas (Ley de Stokes).

Pero para encontrar los parámetros  $Z$  y  $L$  experimentalmente es imposible, por lo tanto para determinar  $\lambda$  es a partir de la viscosidad intrínseca  $[\eta]$  a cizalla nula quedando:

$$\lambda = \frac{\eta_o - \eta_s}{nkT} \quad (1.1.4)$$

2) también existen las moléculas flexibles que son la mayoría de las macromoléculas.

Donde el modelo de Rouse supone  $\Rightarrow$  Viscosidad en flujo de cizalla.

$$\eta - \eta_s = nkT \sum_{j=1}^{N-1} \lambda_j = nkT \frac{\zeta}{4H} \left[ \frac{N^2 - 1}{3} \right] \quad (1.1.4.1)$$

$\Downarrow$

Constante del resorte (Hooke)

$$\bullet \bullet \text{ si } N = \frac{M}{n}$$

$$[\eta] = \frac{\lim_{c \rightarrow 0} \eta - \eta_s}{c \eta_s} = \frac{\lim_{n \rightarrow 0} (\eta - \eta_s) \tilde{N}}{n \eta_s M} \rightarrow [\eta] = \frac{kT}{\eta_s} \frac{\zeta \tilde{N}}{12Hm^2} \bullet M \quad (1.1.4.2)$$

Por otro lado

$[\eta] \propto M$  (regla de Staudinger)  $\rightarrow$  no es realista.

$\eta \neq \eta(\dot{\gamma}) \rightarrow$  presenta ciertas limitantes.

Así mismo Zimm propone:

$[\eta] = k' M^a \rightarrow$  Acuerdo cualitativo con las experimentaciones.

$\eta \neq \eta(\dot{\gamma}) \rightarrow$  Limitaciones.

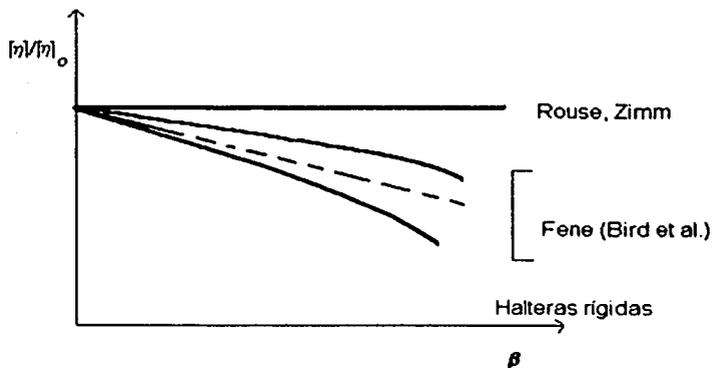


Figura 1.1.2.1 Representación de las moléculas rígidas y flexibles (Steffe, F 1996).

## 1.2. El NOPAL "*Opuntia ficus-indica*".

El uso del nopal en México se inició con las antiguas civilizaciones mesoamericanas, principalmente a través de la recolección de frutos y partes vegetativas. Se han registrado también evidencias arqueológicas que permiten afirmar que esta planta se llevó al cultivo formal por poblaciones indígenas asentadas en las zonas semiáridas de Mesoamérica (Flores., 1994).

La modalidad de explotación de las nopaleras silvestres a través de la recolección aún subsiste y es llevada a cabo por los habitantes de las zonas semiáridas de los estados de Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosí, Hidalgo, Estado de México, Durango y el Distrito Federal en la delegación Milpa Alta; también se menciona que los nopales influyeron en el asentamiento de algunas civilizaciones y culturas indígenas en México llamando a esta planta *nochtli* o *nopalli* de ahí que algunos lugares tengan nombres como Nochtictlán, Nochtepec, Tenochtitlán, etcétera, por lo que se presume que éstas fueron regiones en las que abundan las poblaciones silvestres o bien sitios de recolección (Pimienta., 1990).

### 1.2.1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LOS NOPALES.

En México, la doctora Helia Bravo ha dedicado una gran parte de su trabajo científico al estudio de las cactáceas del país y en su obra, *Las cactáceas de México*, incluye una clasificación taxonómica de los nopales tuneros. Tal como se observa en la tabla 1.1.3.

**Tabla 1.1.3. Clasificación taxonómica de los nopales.**

<b>Pertencen a la familia</b>	<i>Cactaceae</i>
<b>Sub-familia</b>	<i>Opuntioideae</i>
<b>Tribu</b>	<i>Opuntieae</i>
<b>Género</b>	<i>Opuntia</i>
<b>Subgénero</b>	<i>Opuntia</i>

El subgénero *Opuntia* incluye numerosas especies con hábitos de crecimiento arborescente, arbustivo y rastrero; con o sin tronco bien definido. Los cladodios (pencas) o tallos, son aplanados y pueden ser de forma lanceolada, elíptica abovada y hasta suborviculares se incluyen numerosas especies productoras de frutos comestibles (tunas).

Los frutos son globosos, ovoides y turbinados y llevan en el ápice la concavidad receptacular u ombligo más o menos profunda, desnuda después de la caída de los segmentos del perinato de los estambres y del estilo (Bravo, H., 1978).

## 1.2.2 NOMBRES TÉCNICOS Y VULGARES DE LOS NOPALES EN MEXICO.

El nombre de los nopales en México es variable para una misma especie y se reportan los siguientes nombres científico con su respectivo nombre vulgar y algunas de sus características, como se muestra en la Tabla [1.1.4].

**Tabla 1.1.4. Nombres técnicos y vulgares de los nopales en México**  
(Cárdenas V; 1990).

<i>Opuntia streptacantha</i>	nopal cardón	produce tunas rojas
<i>Opuntia leucotricha</i>	nopal duraznillo	cubierto de espinas muy
<i>Opuntia robusta</i>	nopal tapón o bartolona	produce una tuna verde y roja de casi 15 cm. de largo
<i>Opuntia lidheimeri</i>	nopal cacanapo	
<i>Opuntia cantabrigiensis</i>	nopal cuija	nopal forrajero
<i>Opuntia rastera</i>	nopal rastero	nopal forrajero
<i>Opuntia imbricanta</i>	nopal cardenche ó xoconostle	produce una tuna agria
<i>Opuntia macrocentra</i>	nopal chivero o San Gabriel	ideal para el cultivo de cochinilla
<i>Opuntia chysacantha</i>	nopal espina amarilla	
<i>Opuntia lucens</i>	nopal penca redonda	
<i>Opuntia azurea</i>	nopal coyotillo	nopal forrajero
<i>Opuntia amycleae</i>	nopal alfajayucan	
<i>Opuntia megacantha</i>	nopal tuna amarilla	
<i>Opuntia ficus-indica</i>	nopal memelo	nopal con muy pocas espinas
<i>Opuntia undulata</i>	nopal amarillo	

### 1.2.3. MORFOLOGÍA DEL *Opuntia ficus-indica*.

Las zonas áridas y semiáridas de México, las comprenden casi el 82% de la superficie y diferentes factores limitaron el crecimiento de las plantas, desde la falta de agua hasta los vientos fuertes y secos. Los cambios bruscos en el ambiente obligaron a las diferentes especies del subgénero *Opuntia* a desarrollar características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas que les permitieron adaptarse a tales condiciones (Pimienta B., 1990).

En el nopal *Opuntia ficus indica* una modificación importante para enfrentar estas condiciones fue la reducción en el tamaño de la lámina foliar (hojas) y lo efímero de éstas. Las hojas del nopal se diferencian durante el desarrollo de los cladodios jóvenes (brotes tiernos) y después de 30 a 40 días las hojas se desprenden del cladodio y son reemplazadas por algunas espinas (Villareal et. al. 1995) que son hojas modificadas esclerificadas y es una de las especies que producen los frutos más agradables.

Otras adaptaciones importantes se localizan en la epidermis de los cladodios, que se encuentra revestida de una cutícula gruesa que la protege de la evaporación. Debajo de la epidermis de los cladodios se distingue una capa de células de color verde intenso que constituye el tejido de **clorénquima**, y que debe su color al abundante contenido de cloroplastos en sus células. En este tejido es donde se realiza la fotosíntesis (Amin., 1970).

### **1.3. MUCÍLAGO DE "*Opuntia ficus-indica*".**

En el **clorénquima** y en el **parénquima medular** es donde se encuentran las células mucilaginosas que almacenan el mucílago, vulgarmente conocida como "baba" de nopal, que es liberado al cortar la planta, como un mecanismo de reparación.

#### **1.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MUCÍLAGO.**

El mucílago es un producto patológico, es la respuesta queda la planta a una agresión, el mucílago es un polisacárido de color blanco-amarillento, que al desecar entre los dedos deja un residuo harinoso, con el lodo forma un color negruzco; no reduce el Fehling; al calcinarse desprende un fuerte olor a azúcar quemada; apenas se disuelve en agua pero es muy soluble en álcalis (Ortuño., 1951).

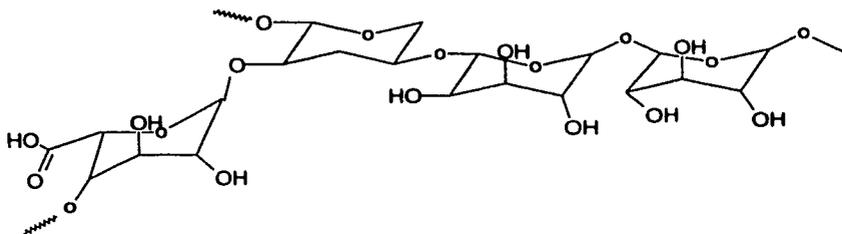
Las células mucilaginosas se encuentran también en la cáscara de los frutos, ya que automáticamente la cáscara se considera como un tallo modificado (Pimienta y Engleman., 1985).

### 1.3.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA.

El mucílago se ha descrito como un polisacárido ácido (Trachtenberg y Meyer., 1981) que posee una estructura altamente ramificada (McGarvie y Parolis., 1981). Estudios histoquímicos han demostrado que el mucílago se encuentra presente sólo en el Aparato de Golgi y es probablemente sintetizado en éste y en las vesículas que se derivan de este (Trachtenberg y Meyer., 1981).

Para Mc Garvie y Parolis (1979), el mucílago contiene residuos de D-galactosa, D-xilosa, L-arabinosa, L-ramnosa y D-ácido galacturónico, llamándolo hetero-polisacárido, el cual puede tener variaciones en los azúcares dependiendo la estación del año en la cual sean recolectados los cladiodios.

Experimentalmente, los azúcares constituyentes provenientes de una hidrólisis unido a los resultados de la oxidación con ácido crómico se encontró que el mucílago contiene  $\alpha$  - arabinofuranosil,  $\beta$  - xilopiranosil,  $\beta$  - ramnopiranosil,  $\beta$  - galactopiranosil y ácido  $\alpha$  - galactoiranosiluránico. Estos mismos resultados sugieren un centro que contiene ácido galacturónico, ramnosa, galactosa de los cuales la xilosa y arabinosa están unidas en posiciones periféricas (Figura 1.2.1).



### Azúcares Constituyentes

Figura 1.2.1 Azúcares constituyentes del mucílago Mc Garvie y Parolis, (1979).

Al hidrolizar parcialmente al mucílago da la liberación de todas las unidades de xilosa y arabinosa junto con unidades de galactosa y la producción de un polisacárido degradado compuesto de galactosa y ramnosa y ácido galacturónico.

Al favorecer la oxidación con ácido crómico se dejan azúcares libres durante la hidrólisis parcial y la rotación específica de los polisacáridos degradados indican que las unidades que están presentes son  $\beta$  - xilopiranososa,  $\beta$  - galactopiranososa,  $\beta$  - ramnopiranososa, ácido  $\alpha$  - galactopiranosilurónico y principalmente  $\alpha$  - arabinofuranosa.

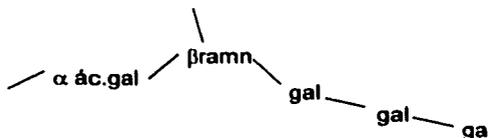
La Tabla [1.1.5] nos resume la composición química del mucílago y el método por el cuál se realizó tal determinación, como se menciona anteriormente la composición química varía con el tiempo de recolección del cladodio, además del clima que predomina durante su cultivo.

TABLA 1.1.5. COMPOSICION QUIMICA DEL MUCILAGO.

CONTIENE	METODO	REFERENCIA
D-galactosa D-xilosa L-arabinosa L-ramnosa D-ácido galacturónico	Cromatografía en columna	McGarvie & Parolis 1978.
a - arabinofuranosil b - xilopiranosil b - ramnopiranosil b - galactopiranosil ácido a - galactopiranosiluránico	Cambios en la rotación óptica Hidrolisis suave Oxidación con ácido crómico	McGarvie & Parolis 1978.
1,4-a-D-ácido galactopiranosilurónico 1,2-b-L-ramnopiranosil cadenas cortas de 1,6-b-D-galactopiranosil	Metilación Oxidación con periodato	McGarvie & Parolis 1980.
arabinosa 42.4(mol%) galactosa 18.4(mol%) xilosa 24.5(mol%) ramnosa 6.4(mol%) ácido galacturónico 8.4(mol%)		McGarvie & Parolis 1981.
ácido urónico 10.7%	titración 46 nmol carboxi/mg azúcar	Trachtenberg & Mayer 1981
ácido urónico 12.7%	m - hidroxifenil	Trachtenberg & Mayer 1981
ácido urónico 19.5%	Carbazol	Trachtenberg & Mayer 1981
arabinosa 24.6% galactosa 40.1% ramnosa 13.1% xilosa 22.2%	Hidrólisis ácida	Trachtenberg & Mayer 1981
arabinosa 46.68(mol%) galactosa 17.92(mol%) xilosa 23.45(mol%) ramnosa 6.76(mol%) ácido galacturónico 5.19(mol%)	HPLC	Medina 2000

### 1.3.3. ESTRUCTURA DEL MUCÍLAGO.

La estructura completa del mucílago según McGarvie y Parolis (1979), (ver Figura 1.3.2) consiste en un grupo de estructuras muy similares, que difieren principalmente en el peso molecular. La oxidación con ácido crómico del polisacárido revela que el 75, 72, 60 y 42% de la galactosa, xilosa, ramnosa y residuos de arabinosa respectivamente fueron consumidos después de 4 horas. Indicando que los residuos de ramnosa, galactosa y xilosa están unidos por enlaces  $\beta$ . El incremento de concentraciones de ramnosa y ácido galacturónico al incrementar el tiempo de hidrólisis, el aislamiento de el ácido biourónico y la falla al detectar la liberación de ramnosa o ácido galacturónico del polímero durante una hidrólisis parcial sugieren la presencia de ramnosa y ácido galacturónico en la capa externa del mucílago (Figura 1.3.1).



Estructura espacial del mucílago.

Figura 1.3.1 Estructura espacial del mucílago,  $\alpha$  ác. gal ( $\alpha$  ácido galacturónico),  $\beta$  ramn ( $\beta$  ramnosa) y gal (galactosa).

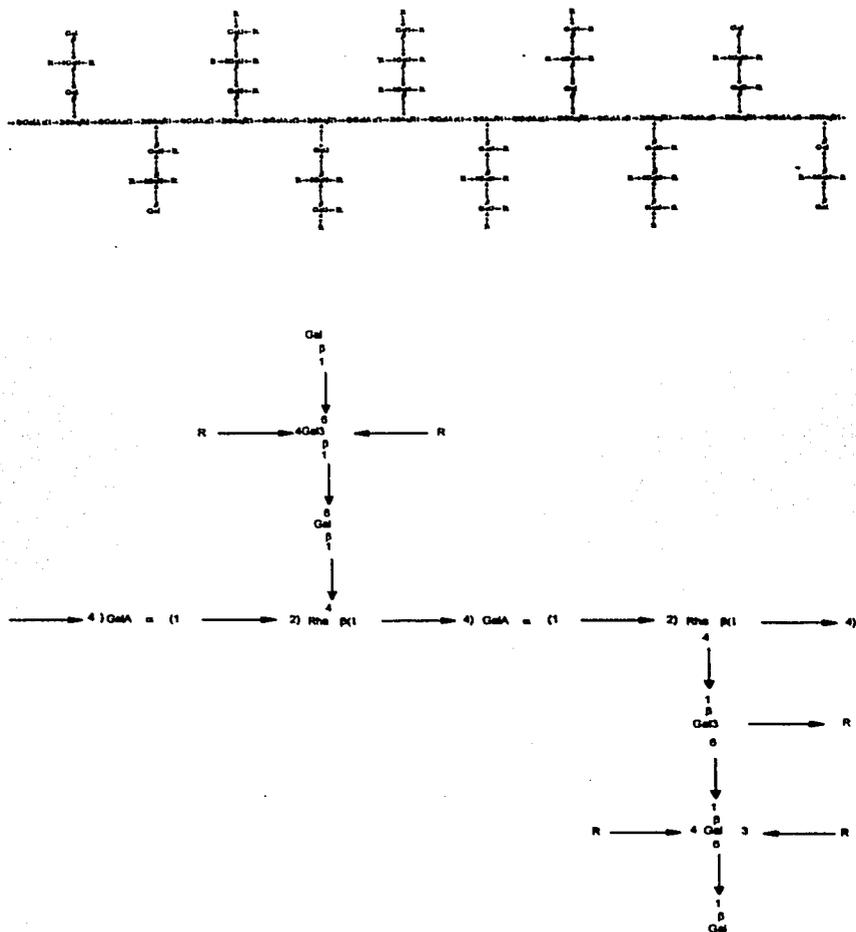


Figura 1.3.2 Estructura propuesta por McGarvie y Parolis (1981) para el mucilago del *Opuntia ficus indica*.

### 1.3.4. ASPECTOS REOLOGICOS.

La estructura propuesta para el mucilago es una cadena con ramificaciones estas confieren propiedades funcionales tales como la solubilidad, la gelificación, la retrodegradación y el descongelado (Jaekwan., 1991). La Tabla [1.1.6] da una comparación de los hidrocoloides con estructura ramificada o lineal y su diferencia en las propiedades reologicas.

**Tabla 1.1.6. Comparación de las propiedades funcionales de carbohidratos lineales y ramificados (Jaekwan., 1991).**

<b>FUNCION</b>	<b>LINEAL</b>	<b>RAMIFICADA</b>
solubilidad	<i>baja</i>	<i>alta</i>
gelatinizacion	<i>baja</i>	<i>alta</i>
gelificado	<i>alta</i>	<i>baja</i>
retrodegradacion	<i>alta</i>	<i>baja</i>
formación de película	<i>alta</i>	<i>baja</i>
estabilidad al congelado	<i>baja</i>	<i>alta</i>
viscosidad	<i>alta</i>	<i>baja</i>

El estudio y los efectos de las ramificaciones son útiles para entender la conformación molecular de cadenas entrecruzadas y las propiedades reologicas de los polímeros. Cuando las moléculas del polímero son ramificadas su comportamiento reologico varia con el número, localización y la longitud de estas ramas.

En este trabajo el comportamiento será discutido en término de los efectos de la viscosidad intrínseca y su respuesta a las curvas de flujo de cizalla simple.

### 1.3.5. IMPORTANCIA DE LA GOMA DE MUCILAGO.

En México diferentes comunidades le han dado un uso muy particular al mucilago, por ejemplo en el sureste se utiliza como fijador del peinado en los días de fiesta , también se mezcla con la lechada de cal para pintar casas dando una mejor adhesión a la "pintura". En el centro del país se utiliza como impermeabilizante tanto de techo como de paredes (Cárdenas V.,1998.)

Como hidrocoloide Medina et. al. 2000, establece que la adición de goma de mucilago incrementa la elasticidad característica propia de este polisacárido. También propone que la goma de mucilago es una molécula polielectrolítica, donde la viscosidad depende de la fuerza iónica del medio, la viscosidad disminuye al incrementarse la fuerza iónica y aumenta al bajar la concentración de iones.

Por otra parte, Tratchenberg y Mayer (1981), describen al mucilago purificado como un polisacárido de alto peso molecular que se comporta como un polielectrolito, debido a que la viscosidad depende fuertemente de la concentración de cationes, en especial  $\text{Ca}^{++}$  ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  , en este sentido Medina (2000) reporta que la viscosidad es más dependiente de los iones divalentes que de los monovalentes como son el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ .

Estos resultados sugieren que la molécula de mucílago esta cargada negativamente. A una fuerza ionica cero las cargas negativas producen fuertes repulsiones intramoleculares dando una mayor expansión de la molécula, esto explica la alta viscosidad del mucílago en agua desionizada.

McGarvie y Parolis (1978), nos reportan que la viscosidad del mucílago en solución es dependiente del pH, la cual es mayor a pH alcalino que a pH ácido, este argumento es similar al descrito por Trachtenberg y Mayer (1982), quienes reportan que la viscosidad es estable entre los valores de pH 5 y 7.

## **PROPIEDADES DE TRANSPORTE.**

La investigación de propiedades que determinan el comportamiento mecánico ha sido una parte importante de la ciencia y la tecnología de la mayoría de los materiales, pero fue sólo en la década de 1920 que estos estudios empezaron a ser considerados como una disciplina aparte. Este reconocimiento dio origen en 1929 a la adopción de la palabra REOLOGIA (del griego Rheon=fluir) para designar este nuevo campo (García-Rejón., 1981).

Con la creciente importancia de los agentes gelificantes en la industria alimentaria se ha impulsado durante los últimos años, el desarrollo de nuevos métodos de medida de sus características mecánicas y la investigación de las bases químicas y estructurales que la definen. Por ello la reología es particularmente importante en la industria de los alimentos, ya que el comportamiento reológico de los productos está íntimamente asociado con su integridad estructural y con sus propiedades sensoriales.

### **2.1 REOLOGÍA.**

Bingham (1878-1945, considerado como el padre de la reología moderna) la define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia cuando se somete a un esfuerzo; incluye las propiedades mecánicas de gases, líquidos y sólidos (Jaekwan., 1991).

Desde el punto de vista fundamental o básico los objetivos de la reología son: por un lado, desarrollar técnicas que permitan establecer experimentalmente las relaciones de comportamiento de un material y por el otro, el establecer las relaciones entre esfuerzo y deformación, capaces de explicar el comportamiento de materiales complejos. Estas relaciones reciben el nombre de ecuaciones constitutivas (García-Rejón., 1981).

Las ecuaciones constitutivas son una relación matemática, bien definida, entre el esfuerzo y la velocidad de deformación creadas al hacer fluir un determinado material en geometrías específicas. Las geometrías clásicas que permiten establecer un flujo viscosimétrico son: cono y plato y placas paralelas (Glicksman., 1986).

Todo material muestra un comportamiento reológico entre dos extremos: el de un sólido ideal cuyo parámetro característico es la elasticidad (ley de Hooke) y el de un fluido que es la viscosidad (ley de Newton); a los materiales que presentan un comportamiento intermedio se les denomina viscoelásticos (Tecante C., 1995).

La materia se deforma, o comienza a fluir, solo cuando se encuentra actuando una fuerza. Esta fuerza le puede ser aplicada en forma controlada (como en un sistema de medición) ó en forma intrínseca (como la gravedad). Si al aplicar la fuerza cambiamos el tamaño o la forma del cuerpo, entonces habremos provocado una deformación. La relación esfuerzo - deformación es el cociente de la deformación de un material entre el esfuerzo que se le aplica (Glicksman.,1986).

La materia es denominada fluido si al sufrir una deformación continua cuando se le somete a una fuerza por unidad de área. La resistencia que ofrece un fluido a una deformación se conoce como su consistencia (Tecante C., 1995).

La reología por si misma no proporciona información sobre la estructura, por lo que es indispensable el uso de otras técnicas como : espectroscopia, UV, IR, NMR, rayos X, dispersión de la luz, "viscosidad intrínseca", para poder establecer la estructura, conformación y sus cambios al modificar las condiciones del entorno.

### 2.1.1 AREAS DE LA REOLOGIA.

**Reología fenomenológica.** Se dan mediciones microscópicas, mecánicas del medio continuo, fenómenos de transporte (clásica).

**Reometría.** Mide propiedades reológicas para caracterizar un material (medición de flujo).

**Reología molecular.** Estudia las propiedades microscópicas y los detalles estructurales (mecánica estadística).

### 2.1.2. REOMETRÍA.

La medición de las propiedades reológicas es conocida como reometría. Existen dos tipos de mediciones: absolutas y relativas. Las mediciones absolutas proporcionan funciones la respuesta del material bajo condiciones geométricas y de deformación rigurosamente controladas. Lo anterior hace que la respuesta del material sólo sea eso una respuesta que sólo depende de la naturaleza del material y no de las condiciones de prueba, ni del equipo. Este tipo de mediciones permite, entre otras cosas, efectuar comparaciones establecer estándares y desarrollar aspectos teóricos de la reología (Salazar., 1993).

Para el caso de las mediciones relativas, la respuesta del material depende, además de la naturaleza, de las condiciones de la prueba. Estas mediciones no pueden servir fácilmente como estándares de comparación a menos de especificar todas las condiciones de la prueba. Por lo tanto, los resultados obtenidos no son en función de los materiales, el valor de estas mediciones radica en que pueden ser utilizadas como referencia interna en una fábrica o laboratorio para control de calidad y como única alternativa a mediciones absolutas, que en muchos casos no son válidas.

Dentro de estas mediciones existen 2 objetivos básicos. El primero incluye la determinación del comportamiento de fluidos no newtonianos en situaciones de flujo simple empleando funciones materiales adecuadamente definidas. Lo que se pretende es encontrar una correlación entre estructura molecular y comportamiento material o alternativamente entre propiedades materiales y el comportamiento observado en situaciones prácticas.

El segundo objetivo, involucra la predicción del comportamiento en situaciones de flujo más complejas a partir de los resultados de experimentos reométricos simples. Los datos del reómetro son empleados para construir ecuaciones reológicas de estado las cuales pueden ser empleadas en conjunción con las ecuaciones de movimiento y continuidad para predecir el comportamiento en situaciones más prácticas (García-Rejón., 1981).

## 2.2. FLUJO.

La velocidad de migración de una propiedad se mide por su flujo (símbolo:  $J$ ), la cantidad que pasa a través de la unidad de área por unidad de tiempo. Si hay flujo de masa, se habla de un flujo de  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; si la propiedad es energía se expresa en  $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , y así sucesivamente

### 2.2.1. CARACTERIZACION DE FLUJO DE FLUIDOS.

Los fluidos generalmente se caracterizan en base a su viscosidad, coeficientes normales de presión y módulo dinámico. Estas características pueden utilizarse para elegir modelos matemáticos que pueden emplearse para describir propiedades de los fluidos y para predecir el flujo en geometrías complejas y campos de flujo: Las propiedades reológicas, en general están asociadas con los siguientes conceptos:

$$\text{flujo} = \frac{\text{Propiedad}}{\text{Tiempo}} \quad (2.2.1)$$

1) *Flujo estacionario:*

Considere un fluido entre dos platos, el cual fluye en el sentido del plato superior moviéndose con una velocidad  $V_x$  en dirección de  $x$ . El gradiente de velocidad está dado por:

$$\gamma_{xy} = \frac{dV_x}{dy} = \gamma \quad (2.2.2)$$

y macroscópicamente está dado por

$$\frac{V_x}{\delta} \quad (2.2.3)$$

en donde,  $\delta$  es el plato de separación. La presión generada por el flujo actúa tanto en paralelo a la dirección de corte (el esfuerzo de corte  $\tau_{xy}$ ), como perpendicular a la dirección del flujo normal al plano.

2) *Flujo dinámico oscilatorio:*

En las condiciones de corte o mediciones mecánicas dinámicas se impone un campo de corte sinusoidal sobre el fluido, y se mide la amplitud del esfuerzo cortante resultante y el ángulo de fase entre la deformación por esfuerzo de corte y la presión. Se dice que la prueba está dentro del régimen "lineal viscoelástico" si la deformación es linealmente proporcional a la presión impuesta y si la respuesta de la presión es sinusoidal.

Las observaciones experimentales sobre fenómenos de transporte muestran que el flujo de una propiedad suele ser proporcional al gradiente de una propiedad relacionada del sistema y para ver la conexión entre flujo de momento y la viscosidad, se considera un fluido en un estado de *flujo newtoniano*.

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (2.2.4)$$

Los fluidos que obedecen a la ley de Newton se llaman fluidos newtonianos. En los fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo de cizalla  $\tau$  y el gradiente de velocidad  $dv / dy$ . Esto implica que la viscosidad  $\mu$  es constante e independiente del gradiente de velocidad.

Para fluidos no newtonianos, la relación entre  $\mu$  y  $dv / dy$  no es lineal, es decir, la viscosidad no permanece constante sino que es una función del gradiente de velocidad (Geankoplis, 1988).

### 2.2.2. FLUIDOS NEWTONIANOS.

En los fluidos newtonianos, las capas del líquido en desplazamiento se encuentran adheridas entre sí por lo que se oponen a la migración de moléculas entre ellas; esta fuerza es llamada viscosidad Newtoniana ó fricción interna de un sistema, y por unidad de área es la misma para cada capa. La viscosidad es entonces una medida del efecto combinado de las fuerzas de adhesión y cohesión en el fluido.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.2.5)$$

### 2.2.3. FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

En un fluido no newtoniano, el esfuerzo de cizalla no es directamente proporcional al gradiente de velocidad; así la viscosidad varía con la velocidad de cizalla aplicada y en ciertos sistemas es también dependiente del tiempo.

La relación general entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad esta descrita por la ecuación general de potencia:

$$\tau = b \cdot \dot{\gamma}^s + C' \quad (2.2.6)$$

Donde:  $\tau$  es el esfuerzo de cizalla,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de cizalla,  $C'$  es el valor inicial del esfuerzo de cizalla,  $b$  es la constante de proporcionalidad o consistencia y  $s$  es la constante de comportamiento al flujo (Glicksman, 1986).

Para los diferentes sistemas reológicos, el valor de estos factores, cambia de la siguiente manera:

Fluido newtoniano	$s = 1$	$C = 0$
Plástico de Bingham	$s = 1$	diferente de 0
Pseudoplástico	$0 < s < 1$	$C = 0$
Dilatante	$1 < s < \text{infinito}$	$C = 0$

El flujo no newtoniano se da cuando se tienen moléculas asimétricas las cuales, cuando se les aplica una fuerza modifican su tamaño, forma, orientación o cohesividad. La velocidad de cizalla aplicada determinará el tipo y la magnitud del cambio producido en una molécula. Las moléculas asimétricas pueden ser polímeros, partículas coloidales o material en suspensión (Glicksman., 1986).

Los tipos de comportamiento no newtoniano más importantes son: Plástico de Bingham, fluidificado por la cizalla (pseudoplástico), espesado por la cizalla (dilatante), fluidificado por el tiempo (tixotrópico) y espesado por el tiempo (reopéctico).

**Flujo independiente del tiempo.****1) Materiales fluidificados por cizalla (pseudoplásticos):**

La viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de cizalla; pero esta disminución no se realiza en una forma proporcional. Este tipo de flujo indica que esta ocurriendo un tipo de cambio en la estructura interna de la sustancia. La disminución en la viscosidad es una consecuencia del arreglo, siguiendo el campo formado por la velocidad de los componentes de la sustancia. A bajas velocidades, las moléculas están solo parcialmente alineadas y la viscosidad es grande; cuando la velocidad se incrementa las moléculas se encuentran orientadas y alineadas dando un descenso de viscosidad. El proceso es reversible ya que las moléculas vuelven a desorientarse una vez que se suspende la aplicación del gradiente de velocidad (Glicksman., 1986).

Este es el tipo de comportamiento reológico no newtoniano que se presenta con mayor frecuencia.

**2) Materiales espesados por la cizalla (dilatantes):**

Los fluidos dilatantes presentan un aumento en la viscosidad, a medida que se incrementa el gradiente de velocidad. Existen dos formas posibles para el flujo dilatante, dependiendo si se requiere un esfuerzo cortante para iniciar el flujo o no. Cuando el flujo comienza con la aplicación de un esfuerzo cortante mínimo el comportamiento de flujo es el contrario de aquel observado en pseudoplasticidad, es decir, que el esfuerzo cortante y la tasa de corte están relacionados no linealmente, pero la curvatura aumenta conforme se aumenta la tasa de corte (Steffe F. 1996).

Cuando es necesario el esfuerzo cortante finito para iniciar el flujo, el comportamiento de flujo es lo contrario del observado en plasticidad.

Este tipo de comportamiento es difícil de encontrar y lo presentan algunas dispersiones concentradas de almidón, soluciones concentradas de agua y azúcar y suspensiones de material cerámico. Ver Figura 2.1.4. Un comportamiento aparentemente de este tipo, puede darse cuando hay mucha turbulencia en el sistema de medición o cuando el producto es una emulsión en la que el gradiente de velocidad aplicado provoca una disminución en el tamaño de la gota (Cui., 1996).

### **Flujo dependiente del tiempo**

#### **1) Materiales fluidificados por el tiempo (tixotrópicos):**

A una velocidad constante se produce un descenso en la viscosidad que está en función del tiempo. Este cambio puede ser observado en algunos segundos o esperar varios días. Estos fluidos están caracterizados por las siguientes propiedades: sufren un cambio estructural al aplicar la velocidad de cizalla, el sistema puede recuperar su estructura cuando cesa de aplicarse la velocidad, las curvas de flujo (velocidad de cizalla contra esfuerzo de cizalla) puede presentar histéresis. Para observarla se debe obtener la curva de flujo aumentando la velocidad de cizalla y después, sin parar, ir disminuyéndola. La presencia de histéresis indica la ruptura de material al aplicar agitación. Este proceso es irreversible (Glicksman., 1986).

#### **2) Materiales espesados por el tiempo (reopéticos):**

Se tiene un incremento en la viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla. Así mismo se presenta un aumento reversible del esfuerzo de cizalla con el tiempo cuando la velocidad es constante. Son muy raros. Algunos ejemplos son las suspensiones de arcilla betonítica y las suspensiones de yeso (Geankoplis., 1988).

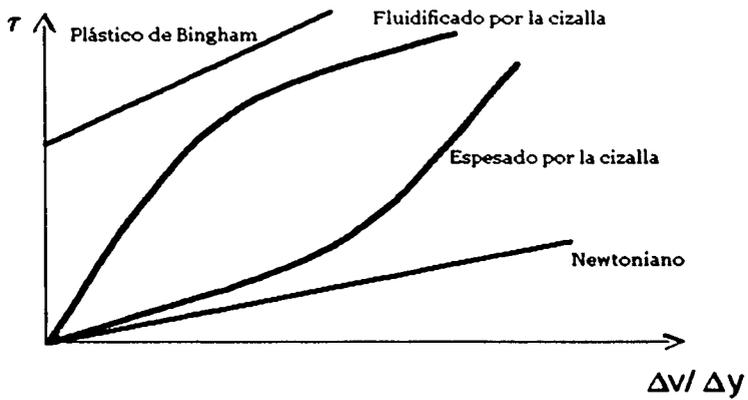


Figura 2.1.4 Tipos de comportamiento reológico (Geankoplis 1988).

Un coeficiente de viscosidad constante es todo lo que se necesita para determinar el comportamiento de líquidos newtonianos incomprensibles bajo cualquier condición de movimiento y esfuerzo. La medición de este coeficiente de viscosidad requiere del uso de un **viscosímetro**, definido como un instrumento para medir la viscosidad.

La viscosidad de líquidos elásticos no Newtonianos puede ser dependiente de la rapidez de deformación. Por lo tanto el viscosímetro es inadecuado para caracterizar el comportamiento de estos materiales y debe ser reemplazado por un reometro, definido como un instrumento para medir las propiedades reológicas (García-Rejón., 1981).

La viscosidad de un fluido, esto es, un gas, un líquido puro o una disolución, es un índice de su resistencia a fluir. Es más fácil de definir, si bien no fácil de medir, como un dispositivo como el de la Figura 2.1.5 La fuerza  $f$  necesaria para mover un segmento del fluido de área  $A$  con una velocidad  $v$ , equiparada a la del fluido una distancia  $y$ , para un determinado fluido viene expresada por la relación de proporcionalidad (Farrington., 1972).

$$f \propto \frac{Av}{y} \quad (2.3.1)$$

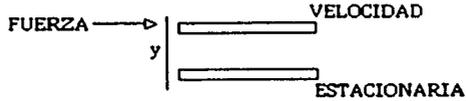


Figura 2.1.5 Esquema para explicar la definición de coeficientes de viscosidad

de acuerdo con 
$$f = \eta \frac{Av}{y}$$

La introducción de una constante de proporcionalidad  $\eta$  conocida como *coeficiente de viscosidad* para fluidos que se comportan de acuerdo a la ley de Newton, lo que permite formular la igualdad anterior así.

$$f = \eta \frac{Av}{y} \quad (2.3.2)$$

### 2.3. VISCOSIDAD.

La medida de la viscosidad de los líquidos requiere primero de la definición de los parámetros involucrados en el flujo. Isaac Newton fue el primero en expresar la ley básica de la viscometría que describe el comportamiento del flujo como el de un líquido ideal.

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (2.2.4)$$

El método viscométrico utilizado para este trabajo y al cual se hará referencia es el flujo Poiseuille en un viscosímetro de capilar.

Para determinar la viscosidad de un fluido a través de un capilar horizontal se debe de cumplir con un número de Reynolds menor a 2,100. La caída de presión necesaria para mantener el flujo viscoso en estado estacionario es debida totalmente a un esfuerzo viscoso en la pared, y es por lo tanto proporcional a la viscosidad (Bird., 1962).

En un viscosímetro de Cannon Fenske , el líquido fluye de un tubo capilar vertical desde un depósito de volumen bien definido situado en la parte superior, hacia un segundo depósito al final del capilar, encontrándose las superficies de ambos depósitos a presión atmosférica, como se observa en la Figura 2.1.6.

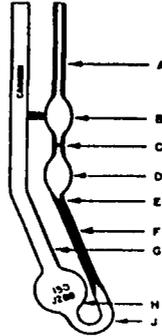


Figura 2.1.6. Esquema de un viscosímetro Cannon Fenske No. 75, A: tubo de toma de muestra, B: primer depósito, C: marca donde termina el llenado, D: segundo depósito, E: marca donde se toma el tiempo, F: capilar, G: tubo de succión, H: último depósito.

Teniendo una diferencia de presión necesaria para aumentar el equilibrio hidrostático :

$$\Delta P = \rho gh \quad (2.3.4)$$

Por lo que la viscosidad queda definida por la ecuación 2.3.5

$$\mu = \frac{\pi r^4 gh}{8VL_{CA}} * \rho t \quad (2.3.5)$$

Esta se transforma ya que se considera como constante para un viscosímetro determinado como en nuestro caso Cannon Fenske No. 75, por lo que:

$$\mu = A * \rho * t \quad (2.3.6)$$

Esta ecuación (2.3.6) define el flujo en el interior del capilar pero se desprecian los efectos finales mostrados desde que es necesario trabajo para acelerar el fluido. Por ello, la presión impulsora propiamente descrita no solamente debe de incluir la caída de presión de Hagen Poiseuille.

Un segundo término en la ecuación se puede hacer usando la ecuación de Bernoulli si consideramos los efectos viscosos despreciables (Bird., 1962). Dicho modelo expresa el trabajo realizado en un elemento de volumen de un fluido incomprensible, moviéndose a lo largo de una línea de flujo, es igual al incremento total en energía potencial y cinética y que el incremento en la velocidad debida a la aceleración del fluido, se asocia una caída de presión. Por lo tanto la ecuación 2.3.7 expresa a  $\mu$  con la corrección de energía cinética.

$$\mu = \frac{\pi r^4 gh}{8VL_{CA}} * \rho - \frac{\rho V}{8\pi L_{CA}} \quad (2.3.7)$$

Para calcular **B** se midió el volumen de un estándar (oil estándar S3) del recipiente H, (V=7.0 ml) a 25°C y la longitud del capilar ( $L_{ca}$  65= mm) ver Figura 2.1.6 , por lo tanto:

$$B = \frac{V}{8\pi L_{ca}} \quad (2.3.8)$$

$$A = \frac{\left\{ \mu + \left[ B \left( \frac{\rho}{t} \right) \right] \right\}}{\rho \cdot t} \quad (2.3.9)$$

Finalmente la viscosidad se obtuvo con la ecuación 2.3.7 (Farrington., 1972).

$$\mu = (A \cdot \rho \cdot t) - B \left( \frac{\rho}{t} \right) \quad (2.4.0)$$

Sustituyendo el valor de las constantes, en la ecuación 2.4.0 se obtiene la ecuación 2.4.1

$$\mu = (0.00728 \cdot \rho \cdot t) - 0.0428 \left( \frac{\rho}{t} \right) \quad (2.4.1)$$

Cada viscosímetro requiere de las constantes de calibración referida a un estándar, el cual toma en cuenta:

- El orificio del capilar
- Condiciones de entrada
- Y los problemas de estabilidad debido a la disminución de carga durante la prueba de 1 a 2 minutos (Tecante C., 1995).

Para hacer las determinaciones de viscosidad de las soluciones problema, el tubo de succión se mantuvo en posición vertical y se colocaron en el deposito inferior 7 mL de fluido, para que fluyera en el capilar por gravedad. Posteriormente el fluido se succiono por el tubo de succión, hasta la marca superior y se dejo fluir registrando el tiempo que tarda el fluido en pasar por las dos marcas.

### 2.3.1. VISCOSIDAD INTRÍNSECA.

Los estudios viscometricos a una baja concentración del polisacárido y a una velocidad de cizalla nula es posible calcular un parámetro muy importante en la caracterización de polimeros, este parámetro es la viscosidad intrínseca, la cual se define por la ecuación (2.4.2) (Torres., 1992):

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \eta_{red} \quad (2.4.2)$$

Donde:

$$\eta_{red} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 C} \quad (2.4.3)$$

Cuando la viscosidad de las disoluciones se estudian con el fin de deducir las propiedades de las moléculas disueltas, las viscosidades se han de medir para el disolvente puro y para varias disoluciones a diferente concentración.

$$\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \frac{\eta}{\eta_0} - 1 \quad (2.4.4)$$

Donde,  $\eta$ ,  $\eta_0$  son las viscosidades de la disolución y del solvente respectivamente y  $\eta_{red}$  es la viscosidad reducida.

Las propiedades de las disoluciones de macromoléculas están afectadas por las interacciones de estas partículas grandes de soluto. Las propiedades de las moléculas individuales, más que sus interacciones, se obtienen al extrapolar las cantidades medidas a dilución infinita. El efecto de la viscosidad por unidad de concentración  $C$  [=] de soluto, se expresa ahora como:

$$[\eta] = \frac{\eta / \eta_0 - 1}{c} \quad (2.4.5)$$

Cuando la concentración se incrementa, también se incrementa la viscosidad, por consiguiente para eliminar los efectos de la concentración la viscosidad específica es dividida entre la concentración y al extrapolar a una dilución infinita obtenemos el valor de la **viscosidad intrínseca**.

El valor extrapolado se representa por  $[\eta]$  donde:

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta/\eta_0 - 1}{c} \quad (2.4.6)$$

La viscosidad intrínseca depende de la masa molecular la estructura del polisacarido y de su conformación en el espacio, también depende de la temperatura y muy a menudo de la velocidad de cizalla ( Torres., 1992).

En el caso de soluciones de polímeros es imposible calcular el volumen ocupado por el polímero de una manera ambigua y las ecuaciones fueron escritas de tal manera que la escala de concentración fue cambiada de fracción de volumen a peso por unidad de volumen. Así, Kraemer definió una cantidad  $[\eta]$  que se conoce como *viscosidad intrínseca*, la cual se conoce al hacer la gráfica y extrapolar la relación 2.4.8.

$$(\ln \eta_{rel}) / C = [\eta] + \kappa''[\eta]^2 C \quad (2.4.7)$$

$$\ln \eta_{rel} / C \text{ vs. } C \quad (2.4.8)$$

Otros modelos para expresar la dependencia de la concentración con la viscosidad, es el modelo lineal de Martin donde (Torres., 1992):

$$\eta_o - \eta_s = \eta_s c [\eta]_o e^{\kappa c [\eta]_o} \quad (2.4.9)$$

Y desarrollando la gráfica con la relación 2.5.0 al extrapolar se obtendrá también la viscosidad intrínseca.

$$\ln \eta_{rel} \text{ vs } C \quad (2.5.0)$$

También la dependencia entre la viscosidad intrínseca y la masa molecular se representa por un determinado tipo de moléculas y para un determinado disolvente por ecuaciones de la forma (Mark-Houwink):

$$[\eta] = K M^a \quad (2.5.1)$$

donde M es la masa molecular y K y <sup>a</sup> dos constantes experimentales. Una vez que estos parámetros han sido determinados por medidas en fracciones del polímero de masas moleculares conocidas la ecuación 2.5.1, se puede emplear para obtener valores de esas masas a partir de resultados de medidas de la viscosidad intrínseca (Kramer., 1938).

El experimento de la viscosidad intrínseca puede proporcionar no sólo información acerca de la masa y tamaño de la molécula, sino también ciertos datos termodinámicos de la solución (Farrington., 1972).

Una molécula de cadena larga en solución adquiere una forma algo torcida o enortijada, intermedia entre una masa estrechamente enrollada y una conformación lineal rígida. Es de esperarse que estén representados todos los posibles grados de enortijamiento debido al movimiento browniano interno de las cadenas flexibles. Es un buen disolvente, uno que dé calor cero o negativo al mezclarlo con el polímero, la molécula está más bien extendida libremente, y la viscosidad intrínseca es alta (Trachtenberg., 1981).

En un disolvente pobre, es decir, en uno en el cual se disuelva el polímero con calor de mezclado positivo (absorción de calor), los segmentos de la molécula se atraen entre si en solución con mucha más fuerza que con la que atrae el disolvente y el resultado es una molécula más compacta. Ver Figura 2.1.7



Figura 2.1.7 Formas de la molécula en i) un buen disolvente ii) en un mal disolvente.

Las viscosidades de los líquidos se determinan usualmente por la velocidad de flujo a través de un tubo de sección circular. La velocidad de flujo en este dispositivo depende de la viscosidad del líquido, porque la película del líquido que se adhiere a la superficie del vidrio es estacionaria.

### 2.3.2. VISCOSIDAD RELATIVA.

El número de viscosidad ( $\eta / \eta_0$ ) mide la contribución a la viscosidad de las moléculas del polímero a la concentración  $C$ , también llamada viscosidad relativa. ( $\eta_{rel}$ ) que es la relación entre la *viscosidad de la solución* y la *viscosidad del solvente*. Como una primera aproximación para soluciones diluidas el cociente es proporcional a la relación de los tiempos de flujo.

Es un valor adimensional.

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \eta_{rel}$$

(2.5.2)

**2.3.3. VISCOSIDAD ESPECIFICA.**

$(\eta_{sp})$  es el incremento "fraccional " en la viscosidad.

$$\frac{\eta}{\eta_o} - 1 = \eta_{sp} \quad (2.5.3)$$

$$\eta_{sp} / C = [\eta] + \kappa'[\eta]^2 C \quad (2.5.4)$$

**2.3.4. VISCOSIDAD INTRÍNSECA DE ALGUNAS GOMAS Y MACROMOLÉCULAS DE IMPORTANCIA BIOLÓGICA.**

La Tabla [2.2.1] presenta la forma de algunas macromoléculas y su relación con la viscosidad intrínseca.

**Tabla 2.2.1 Viscosidad intrínseca de macromoléculas de importancia biológica.**

FORMA	SUSTANCIA	PESO MOLECULAR		REFERENCIA
			[ $\eta$ ], ml/g.	
globular	ribonucleasa	13680	3.4	Kramer 1938
	seroalbúmina	67500	3.7	Kramer 1938
hebras al azar	insulina	2970	6.1	Kramer 1938
	subunidad de miosina	197000	93	Kramer 1938
varillas	L-glutamato	340000	720	Kramer 1938

La Tabla [2.2.2] presenta la viscosidad intrínseca de dos gomas xantana en función de la fuerza iónica ( $I$ ) a 25°C.

**Tabla 2.2.2. Viscosidad intrínseca de la goma xantana en función de la fuerza iónica ( $I$ ) a 25°C (Torres, et al . 1992).**

$I(M)$	xantana comercial		[ $\eta$ ] (ml/g)
	(Keltrol)	<i>Xanthomonas campestris</i>	
1	3.74	2.7	
0.5	3.36	4.38	
0.1	5.91	5.33	4.93
0.05	7.49	7.41	
0.01	9.43	8.47	

## **II.- METODO EXPERIMENTAL**

### **CAPITULO 3.**

#### **ESTIMACION DE LA VISCOSIDAD INTRINSECA**

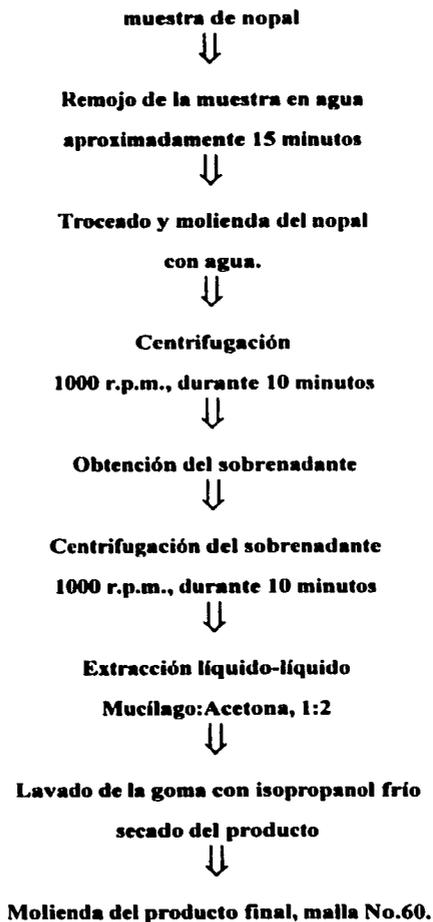
##### **3.1 MATERIALES Y METODOS.**

En este trabajo se utilizó el nopal verdura proveniente de la Delegación Milpa Alta, Distrito Federal. Los cladodios carecían de espinas característica del *Opuntia ficus indica*, estos fueron cortados en las condiciones de cosecha. El cladodio fue picado para así obtener el mucílago y posteriormente tratado según Medina (2000) para la obtención de la goma de mucílago *Opuntia ficus indica*.

##### **3.1.1. TECNICA DE EXTRACCIÓN DE LA GOMA DE MUCÍLAGO.**

De acuerdo a la metodología propuesta por Medina (2000) la cual se reproduce a continuación, el producto obtenido es un polvo (malla 60) de color blanco.

TECNICA DE EXTRACCIÓN DE LA GOMA DE MUCÍLAGO (L. Medina.,2000).



### 3.1.2 ANALISIS PROXIMAL DE LA GOMA DE MUCÍLAGO ESTUDIADO.

	<b>mucílago(%)</b>
humedad	10
grasa base seca	1.6
proteína	0.03
cenizas	1.4
extracto libre de nitrógeno	86.97

### 3.1.3 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE GOMA DE MUCÍLAGO.

Las soluciones de mucílago se prepararon a diferentes concentraciones, disolviendo el polvo en agua desionizada, mezclando con agitación constante hasta una total disolución, a una temperatura de 25°C y se almacenaron en refrigeración por 24 horas para darle un tiempo de envejecimiento al sistema antes de realizar las pruebas reológicas.

### 3.1.4 ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA.

Se hizo en un viscosímetro de Cannon Fenske No. 75 (Figura 2.1.6), que es un tubo en U. El viscosímetro se llena con la solución que se desea evaluar hasta el nivel superior, o marca **C**, posteriormente el fluido se succiona rebasando la marca **B** del bulbo a través del tubo capilar hasta la marca **C**. Una vez que el fluido pasa a través del tubo capilar bajo la influencia de la presión hidrostática del mismo se registra el tiempo que tarda en pasar el fluido de la marca **C** a la **D** a través del tubo capilar.

El tiempo se multiplica por una constante del instrumento (ecuación 2.4.1) para determinar la viscosidad cinemática del fluido. Ver Figura 2.1.7.

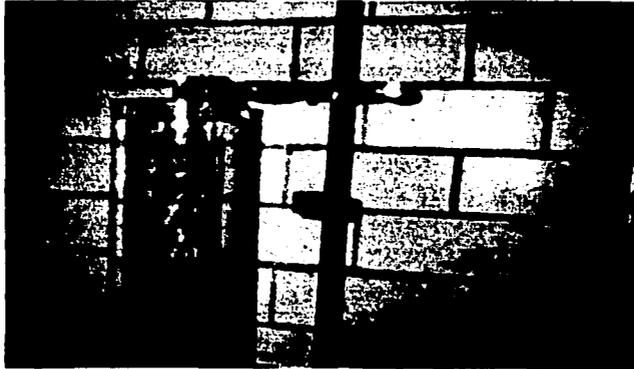


Figura 2.1.8 Viscosímetro experimental Cannon Fensek No. 75.

El tiempo que le toma al fluido pasar por el tubo capilar es inversamente proporcional a la densidad del fluido y directamente proporcional a la viscosidad dinámica obteniendo la ecuación:

$$tiempo \propto \frac{\mu}{\rho} \quad (3.1.1)$$

$$\mu = \text{cinemática}(\text{cStokes} \cdot \text{s}) = \text{cte}(\text{cStokes}) \cdot t(\text{s}) \quad (3.1.2)$$

Para determinar la viscosidad intrínseca se utilizaron los modelos de Kramer y Martin (Torres et al. 1992). Como se vio con detalle en el Capítulo 2, recordemos que la determinación de la viscosidad en un capilar queda definida por la ecuación 2.3.5 (ley de Hagen Poiseuille) y con la corrección cinemática la ecuación 2.3.5 se transforma en la ecuación 2.3.7

$$\mu = \frac{\pi r^4 gh\rho t}{8vL_{CA}} - \frac{\rho v}{8\pi L_{CA}} \quad (2.3.7)$$

Al sustituir las constantes:

$$\mu = (A \cdot \rho \cdot t) - B\left(\frac{\rho}{t}\right) \quad (2.4.0)$$

Como el tiempo es dependiente de la densidad y la viscosidad de un fluido, el viscosímetro de flujo capilar da una lectura directa de la viscosidad cinemática.

### 3.1.5 ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD INTRÍNSECA.

Para medir la viscosidad intrínseca es importante que en el sistema se cumplan tres condiciones.

- Que el flujo sea laminar, es decir que el número de Reynolds (Re) no sea mayor a 2100 (adimensional).
- Que el fluido sea Newtoniano. (ecuación 2.2.5).
- Reconocer la región diluida del sistema (C\*).

En la región diluida ( $C < C^*$ ) las unidades moleculares hidrodinámicas son separadas para su estudio y  $\eta_{sp}$  es proporcional a la concentración  $C$ . La región semi-diluida es intervalo ( $C^* < C < C^{**}$ ), donde las unidades hidrodinámicas comienzan a superponerse, para la región concentrada ( $C^{**}$ ) se pierde el flujo laminar por lo que carece de importancia para este estudio (Torres et al. 1992).

De acuerdo con las ecuaciones de Huggins, Kramer y Martín las gráficas  $\eta_{sp}, \ln \eta_r / C$  y  $\eta_r$  vs. concentración del polímero respectivamente, los valores para  $[\eta]$  son estimados por cada ecuación. Se debe señalar que no es importante la ecuación que se va a usar para estimar  $[\eta]$  ya que todo se reduce a un problema de extrapolación (Torres et al., 1992).

## REACTIVOS

Los reactivos empleados en la determinación de la viscosidad intrínseca  $[\eta]$  fueron:

- Cloruro de Sodio, (grado analítico) J.T. Baker.
- Buffer pH 10(ác. bórico), Sigma México.
- Buffer pH 7(fosfato), J.T. Baker.
- Buffer pH 4(fosfato), J.T. Baker.
- Agua Desionizada.

**EQUIPOS:**

Los instrumentos empleados en la determinación de la viscosidad intrínseca  $[\eta]$  fueron:

- Balanza analítica OHAUS GA 200.
- Parrilla de Agitación Magnética con calentamiento.
- The Cannon-Fenske Routine Viscometer No.75.
- Termómetro.
- Cronómetro.
- Reometro Haake Rotovisco CV20.

## RESULTADOS

Una de las más importantes características de los polisacáridos en solución es la de alterar drásticamente el comportamiento al flujo, el cual es sensible tanto al tamaño como a la forma que adopta la molécula, por esto la medida de la viscosidad intrínseca es una respuesta de las condiciones hidrodinámicas del polisacárido.

### 4.1.1 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CRÍTICA $C^*$ , EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL HIDROCOLOIDE Y LA FUERZA IONICA.

La determinación del efecto de la fuerza ionica en la viscosidad intrínseca se realizó en la región diluida, esta región es importante ya que no se tienen agregados moleculares en esta zona.

La descripción de la región diluida se hace al graficar el  $\log \eta_{sp}$  vs.  $\log C$  que se presenta en la Figura (4.1.7). La relación de discontinuidad lineal que presenta la gráfica se usa para hallar la concentración crítica  $C^*$ . La curva se atribuye a la transición de condiciones de solución diluida donde las moléculas individuales del polímero se encuentran como hebras aisladas, para pasar al régimen de solución concentrada donde el volumen hidrodinámico total de las cadenas individuales excede al volumen de la solución (Torres et al., 1992).

El valor encontrado en este estudio de  $C^*$  es de 0.40 gr L<sup>-1</sup>

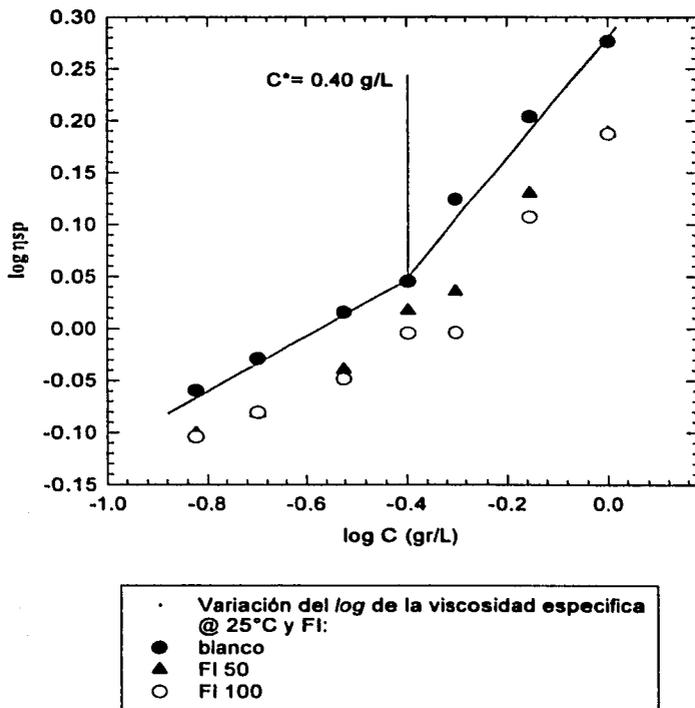


Figura 4.1.7 Variación del  $\log$  de la viscosidad específica a temperatura ambiente, sin fuerza iónica,  $I = 50$  mM y  $I = 100$  mM sobre la concentración de la goma de mucllago *Opuntia ficus-indica*.

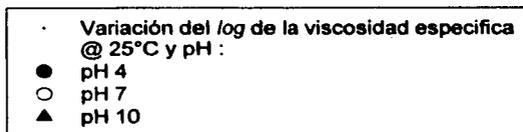
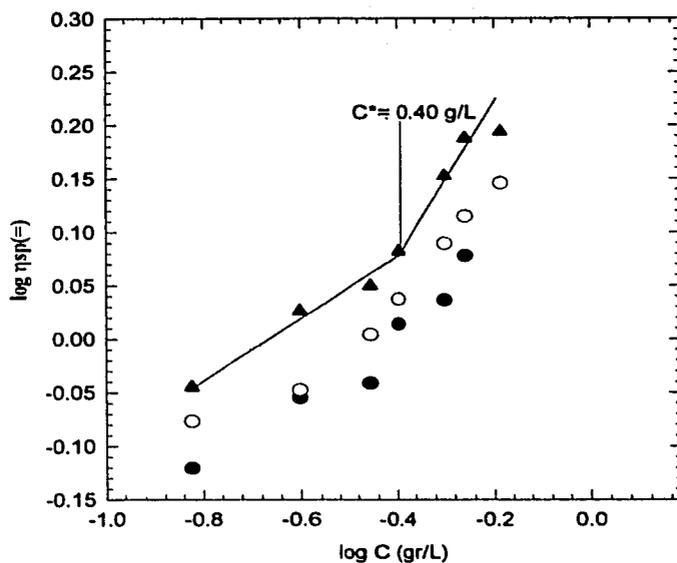
Otro polisacárido como la xantana tiene un valor de  $C^* = 0.20$  gr/L (Rajesh., 1995), este comportamiento puede ser explicado por la conformación rígida de la goma xantana, no es una molécula muy flexible y a una concentración baja empieza a formar agregados.

#### 4.1.2 DETERMINACION DE LA CONCENTRACION CRITICA $C^*$ EN FUNCION DEL pH.

La descripción de la región diluida se presenta en la Figura (4.1.2), el polímero se encuentra como hebra aislada, esta región es importante ya que aquí se establecen las condiciones de región diluida para determinar la viscosidad intrínseca. En esta determinación al variar el pH del disolvente, este se comporta como un buen disolvente el cambio de pendiente es muy claro.

El valor encontrado para  $C^*$  es de  $0.40$  gr  $L^{-1}$

R. Ndjouenkeu (et al. 1995), reporta un valor muy similar para la  $C^*$  de una galactomanana,  $0.39$  gr/L dando una molécula muy flexible y con una viscosidad intrínseca de  $64$  L/gr siendo un polisacárido con entrecruzamientos más densos.



**Figura 4.2.2** Variación del log de la viscosidad específica a temperatura ambiente, pH=4, pH=7 y pH=10, sobre la concentración de la goma de mucllago *Opuntia ficus-indica*.

#### 4.1.3 DETERMINACION DE LA CONCENTRACION CRITICA $C^*$ EN FUNCION DE LA TEMPERATURA.

La descripción de la región diluida se presenta en la Figura (4.1.3). El valor para  $C^*$  es de  $0.40 \text{ gr L}^{-1}$

El valor de  $C^*$  es independiente de las condiciones ambientales impuestas en esta parte experimental, esto esta de acuerdo a lo reportado en la literatura ya que Morris (et al. 1995) reporta que solo se encuentra la zona donde los agregados moleculares tienen su origen al cambio de pendiente de la gráfica logarítmica y es eliminado la viscosidad del solvente.

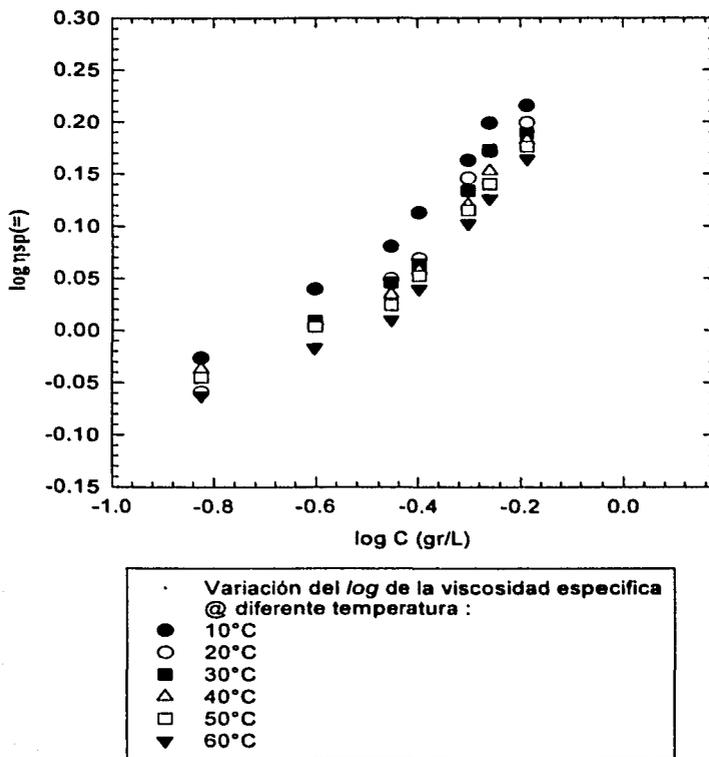


Figura 4.2.6 Variación del  $\log$  de la viscosidad específica a temperatura de 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C y 60°C sobre la concentración de la goma de mucilago *Opuntia ficus-indica*.

## 4.2 ESTIMACION DE LA VISCOSIDAD INTRINSECA [ $\eta$ ] USANDO LOS MODELOS DE KRAMER Y MARTIN.

Para la determinación de [  $\eta$  ] de la goma de mucllago de nopal, se utilizo la extrapolación conjunta de las curvas de Martin y Kramer ya que estos modelos se ajustaron a los datos experimentales en la zona diluida adecuadamente con una variación en su regresión menor al 2%.

### 4.2.1 VISCOSIDAD INTRINSECA DE LA GOMA DE MUCILAGO [ $\eta$ ] EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DEL HIDROCOLOIDE Y LA FUERZA IONICA.

El efecto de la fuerza ionica es de suma importancia en la caracterización de los polielectrolitos. A una fuerza ionica infinita(  $\Theta$  - el solvente esta en estado perturbado) las moléculas cargadas presentan una viscosidad alta dependiente de la fuerza ionica. Smidsrod y Haug (1971) representan esta funcionalidad como:

$$\eta = \eta_{\infty} + SI^{-1/2} \quad (4.2.1)$$

Donde  $\eta_{\infty}$  es la viscosidad de extrapolación y  $\eta$  es la viscosidad a una fuerza ionica infinita  $S$  es la pendiente en la relación  $\eta$  vs  $I^{-1/2}$  de acuerdo con la ecuación (4.2.1) esta es función de las cadenas rígidas del polímero.

Los resultados experimentales con respecto a la fuerza iónica y las propiedades viscosas de la goma de mucilago se presentan en las Figuras 4.1.8, 4.1.9 y 4.2.1 a una concentración que va de 50 a 700 ppm. Es claro que al incrementarse la concentración de iones el resultado es un decremento en la  $[\eta]$ , lo que sugiere que es una molécula polielectrolitica cargada negativamente. Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura, Medina (et al 2000) expone que hay una reducción en la viscosidad que es mas pronunciado con iones divalentes como por ejemplo  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  y de manera similar a lo expuesto por Trachtenberg (et al 1981).

A cero fuerza ionica las cargas negativas producen una fuerte repulsión intramolecular por lo que se expande más la molécula, por ello la viscosidad intrínseca de la goma de mucilago aumenta en agua desionizada.

**Tabla 4.4.1 Valores estimados de la viscosidad intrínseca a diferente fuerza ionica de la goma de mucilago *Opuntia ficus-indica*.**

(I)	$[\eta]$
fuerza ionica	viscosidad intrínseca ( L/gr)
0	1.84
50	1.75
100	1.73

Sam Pin Lee (et al.1998), reporta la viscosidad intrínseca de este mismo polisacárido 181 L/gr. Hay que tomar en cuenta que este valor es del mucilago, no de la goma del *Opuntia ficus-indica*, varía mucho la forma de obtención del mucilago ya que el propone que el fruto (tuna) también contiene importantes cantidades de mucilago por lo que mezcla cladiodio y fruta para la obtención de mucilago precipitándolo con isopropanol.

Torres (et al. 1995) reporta el valor de la viscosidad intrínseca de la goma xantana comercial 5.91 L/gr, este valor lo relaciona con su peso molecular que es de  $4.4 \times 10^6$  g / mol.

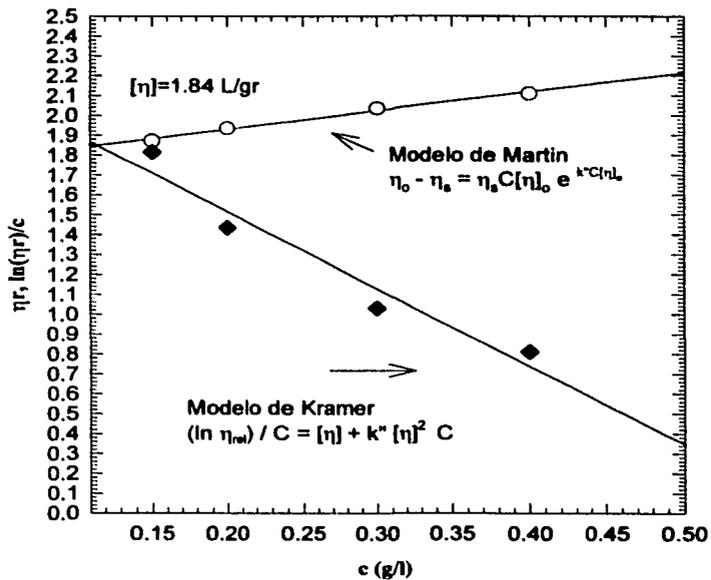


Figura 4.1.8 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente, sin fuerza iónica por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.

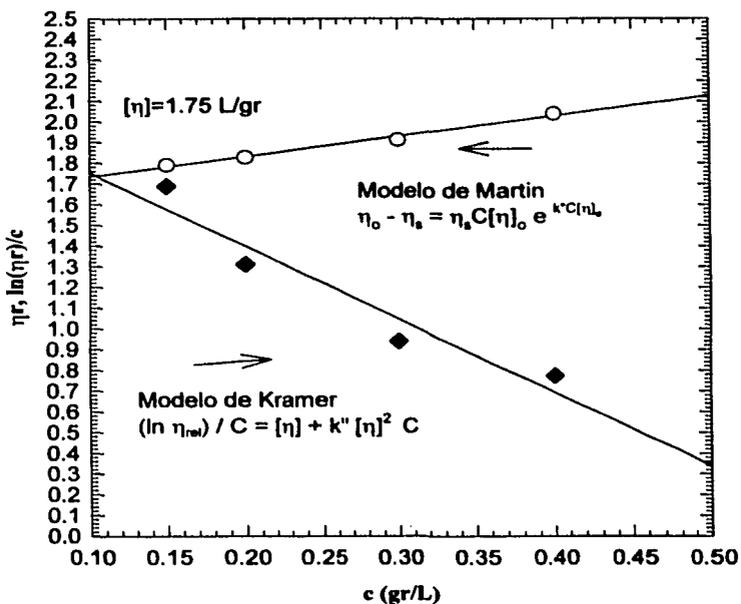


Figura 4.1.9 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente, con  $l = 50 \text{ mM}$  por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin

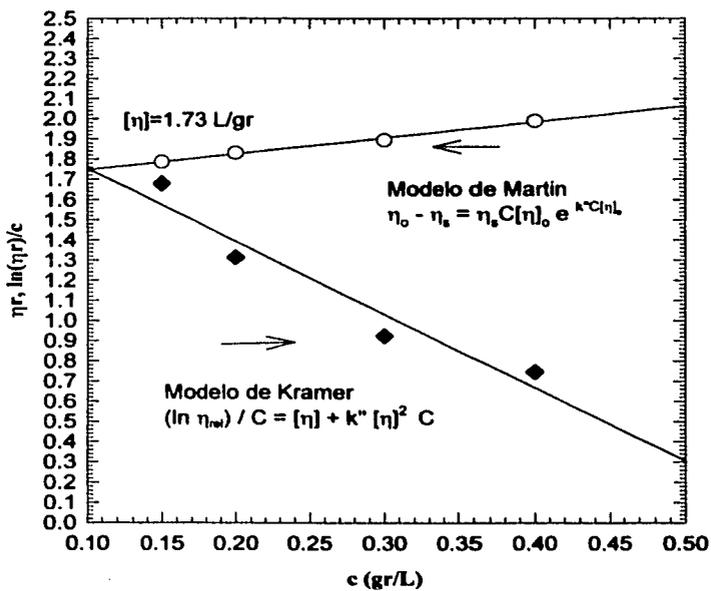


Figura 4.2.1 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente, con  $I = 100 \text{ mM}$  por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.

#### 4.2.2 VISCOSIDAD INTRINSECA [ $\eta$ ] DE LA GOMA DE MUCILAGO EN FUNCION DEL pH.

En la Figura (4.2.5) al incrementar los valores de pH se observa un aumento en los valores de la viscosidad intrínseca, esto se debe principalmente a la ionización de los grupos carboxilo de la molécula de la goma de mucilago, este comportamiento también es reportado por Medina (et. al.2000) que describe el mismo comportamiento de la goma de mucilago a pH alcalino. Por otra parte en la región ácida los valores de la viscosidad intrínseca disminuyen drásticamente entre los valores de 4 y 7, Figuras 4.2.4 y 4.2.3 respectivamente esto concuerda con lo reportado por Trachtenberg y Meyer (1982).

Los valores encontrados para la viscosidad intrínseca se presentan en la Tabla 4.4.2.

**Tabla 4.4.2 Valores estimados de la viscosidad intrínseca a diferente pH de la goma de mucilago *Opuntia ficus-indica*.**

pH	viscosidad intrínseca (L/gr)
10	1.88
7	1.78
4	1.75

Es importante tomar en cuenta el pH de la goma de mucilago para determinar las propiedades funcionales del hidrocólide por las atracciones y repulsiones de la molécula.

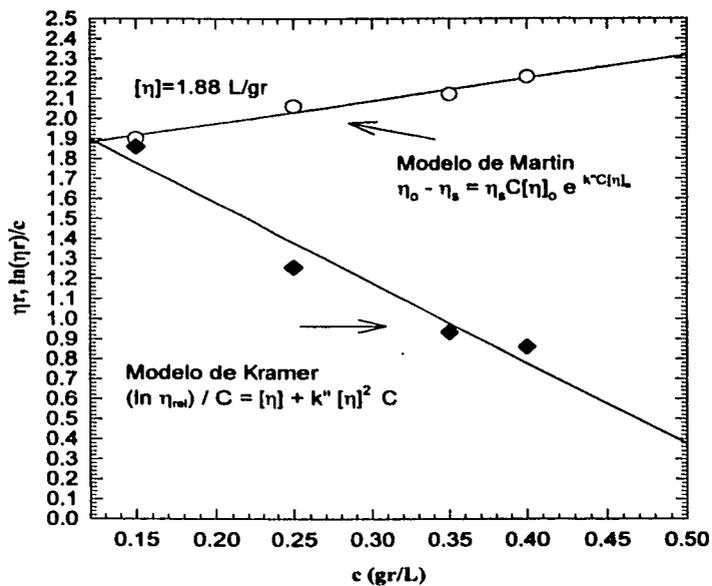
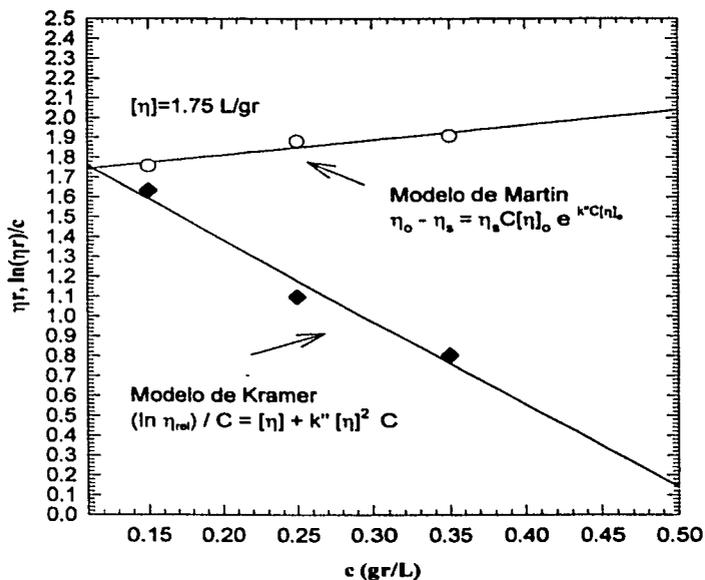


Figura 4.2.5 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente, con pH = 10 por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.



**Figura 4.2.3** Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente, con pH = 4 por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.

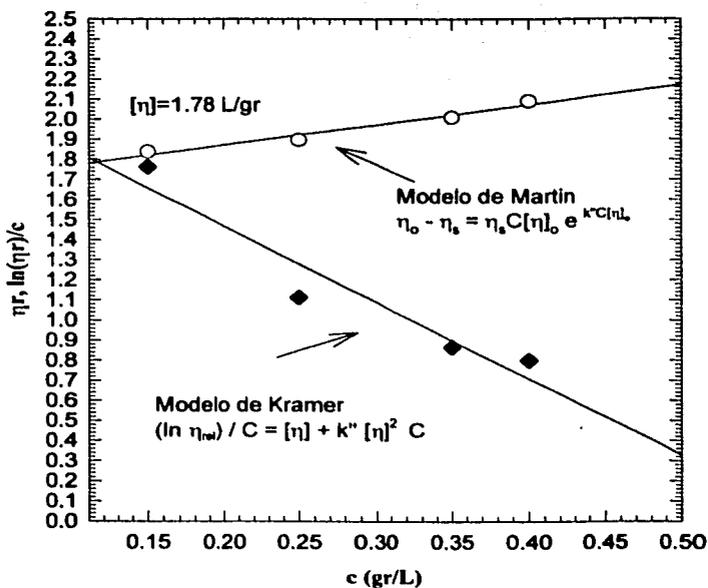


Figura 4.2.4 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura ambiente, con pH = 7 por extrapolación combinada de las curvas de Kramer y Martin.

### 4.2.3 VISCOSIDAD INTRINSECA [ $\eta$ ] DE LA GOMA DE MUCILAGO EN FUNCION DE LA TEMPERATURA.

Con respecto a la influencia de la temperatura en los valores de la viscosidad intrínseca de la goma de mucilago se observa que si se disminuye la temperatura la viscosidad intrínseca aumenta y conforme se aumenta la temperatura la viscosidad intrínseca disminuye, este resultado esta de acuerdo a lo reportado en la literatura (Kazuo et. al. 1984), es probable que en estas condiciones las moléculas se encuentran formando una madeja enredada y al aumentar la temperatura se muevan más enérgicamente como "reptando" a través de microtubulos imaginarios.

Las Figuras 4.2.7 y 4.3.3 presentan los valores que van de los 10°C a los 60°C, en los cuales la viscosidad intrínseca no es constante. La viscosidad disminuye con el aumento de temperatura ya que los fluidos se comportan según la Ecuación 4.2.3.

$$\text{Viscosidad} \propto e^{\frac{\Delta E}{RT}} \quad (4.2.2)$$

La relación viscosidad temperatura esta representada por una ecuación tipo Arrhenius (Daniels., 1972).

$$\eta = A \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right)\right] \quad (4.2.3)$$

Donde  $E_a$  es la energía de activación,  $R$  representa la constante universal de los gases,  $A$  es una constante y  $T$  es la temperatura absoluta.

Los resultados se comparan con lo reportado en la literatura, temperaturas de 30°C, 40°C y 50°C permanecían constantes esto se debe a la evaporación del solvente durante la experimentación por lo que se recomienda un baño Koehler, provisto de iluminación y control de temperatura.

**Tabla 4.4.3 Valores estimados de la viscosidad intrínseca a diferentes temperatura de la goma de mucilago *Opuntia ficus-indica*.**

Temperatura (°C)	viscosidad intrínseca (L/gr)
10	1.92
20	1.84
30	1.85
40	1.85
50	1.85
60	1.82

Otra explicación a este comportamiento lo reporta Rajesh (et al 1995), quien propone una molécula muy flexible en algunos puntos que permite a la molécula girar sobre un eje para posteriormente volverse a entrecruzar.

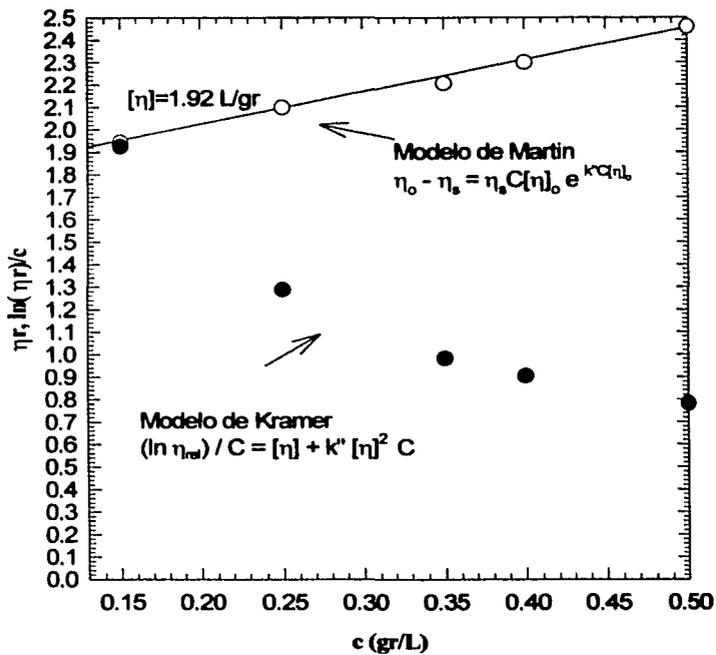


Figura 4.27 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 10°C, por extrapolación de las curvas de Kramer y Martin.

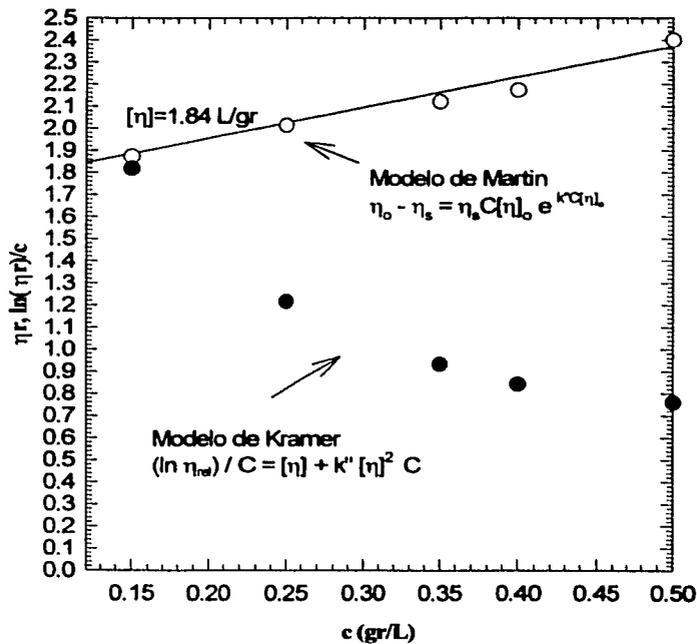


Figura 4.2.8 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 20°C, por extrapolación combinada de la curva de Martin.

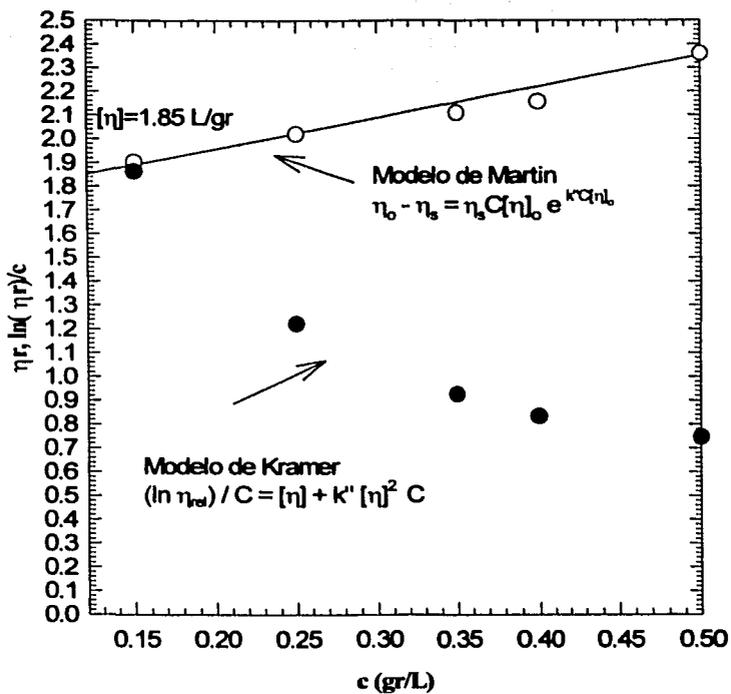


Figura 4.2.9 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 30°C, por extrapolación de la curva de Martin.

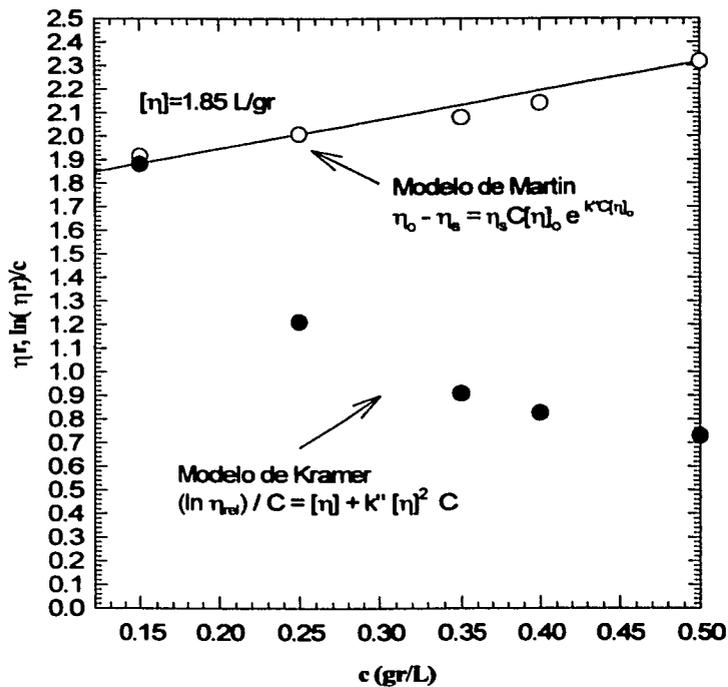


Figura 4.3.1 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 40°C, por extrapolación de la curvas de Martin.

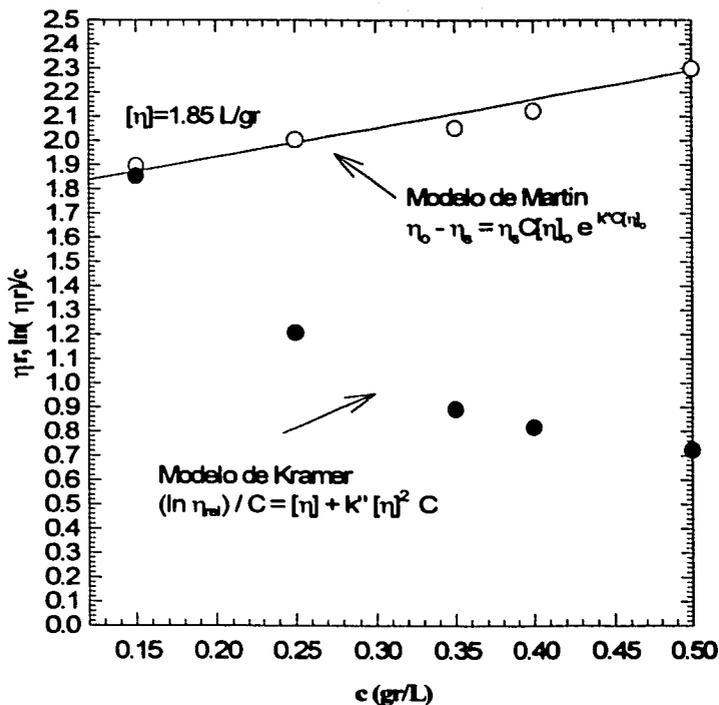


Figura 4.3.2 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 50°C, por extrapolación de la curva de Martin.

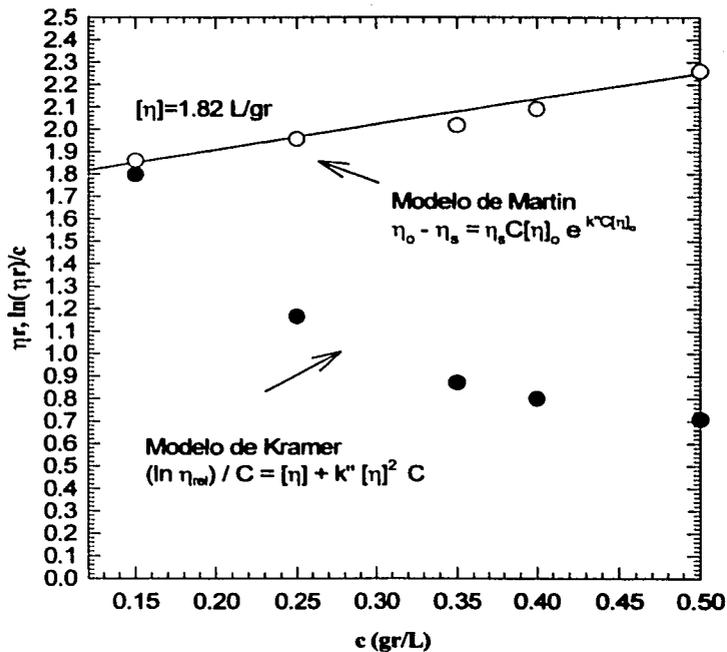


Figura 4.3.3 Determinación de la viscosidad intrínseca a temperatura de 60°C, por extrapolación de la curva y Martin.

**ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.**

- Los resultados de la viscosidad intrínseca de la goma de mucllago a diferentes condiciones sugieren un comportamiento típico de hebras aleatorias y que existen macroagregados moleculares que persisten en régimen diluido. La formación de estos agregados pueden impartir propiedades funcionales especiales.
- Al incrementarse la fuerza ionica la viscosidad intrínseca decrece este comportamiento es más pronunciado con iones divalentes, lo que sugiere que es una molécula polielectrolitica. Con respecto al pH en las zonas alcalinas la viscosidad intrínseca aumenta drásticamente debido a la conformación que adopta la molécula.
- Con los resultados obtenidos se permite aumentar las perspectivas de aprovechamiento de este tipo de cactacea, además de aprovechar su cultivo en regiones semiáridas del país que permita contribuir a aliviar la desertificación de estas regiones. Debido a que México importa la mayor parte de la demanda de los hidrocoloides que consume, es importante encontrar fuentes potenciales que podrían ser alternativas para algunos de los hidrocoloides que se importan.

- El estudio de sistemas de hidrocoloides parece ser infinito, existen numerosas combinaciones de hidrocoloides, fuerza iónica, concentración total y relaciones entre componentes en mezclas, donde el pH, la temperatura y además las interacciones que se pueden dar entre otros constituyentes alimenticios como proteínas, grasas, azúcares u otros solutos. Resulta útil tener en mente la gran complejidad que representa un sistema alimenticio donde existen múltiples componentes de diversas naturalezas y donde las propiedades reológicas de todo el conjunto fácilmente se pueden afectar por los cambios del entorno.
- Comparando la viscosidad intrínseca que presenta la goma de muclago, a nivel macroestructural, el volumen hidrodinámico de esta molécula con respecto a la viscosidad intrínseca de una goma comercial como lo es la xantana, se observa una relación 3:1 similar a lo reportado en la literatura en curvas de viscosidad de cizalla simple que lo estudia a nivel macroestructural. Ver figura 5.1.1.
- Por lo tanto como sugerencias de trabajos posteriores, sería conveniente realizar los estudios de este hidrocoloide en mezclas para visualizar posibles efectos sinérgicos. El estudio de estas mezclas se enriquecería utilizando técnicas alternas como análisis térmico, específicamente calorimetría diferencial de barrido, lo cual completaría los resultados reológicos de viscosidad intrínseca y podría emerger entonces una interpretación válida experimentalmente de los fenómenos de interacción presentes en estos sistemas.

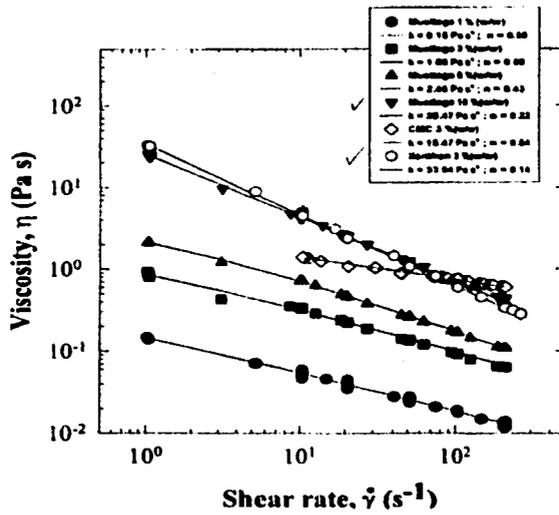


Fig. 1. Effect of mucilage concentration on the steady-shear viscosity at 25°C. Data at pH = 4.8 and  $I = 0.1025$  M.

Figura 5.1.1. Curvas de viscosidad de cizalla simple (Medina 2000).

**i) Modelo de Flory.**

Si suponemos que una molécula de polímero en disolución se encuentra como una nube de monómeros distribuidos en torno a un centro de gravedad con una concentración que disminuye a medida que nos alejamos del mismo, el modelo de viscosidad puede trasladarse a un equivalente con una molécula de polímero.

En este modelo existen huecos en las orillas de las moléculas en donde pueden penetrar las moléculas del disolvente en grado variable lo que produce un rompimiento del patrón del flujo laminar y por lo tanto un aumento en la viscosidad de la solución.

La concentración de monómeros a una distancia dada del centro de gravedad de la molécula depende del grado en que se encuentra expandida la misma y esto a su vez depende de las interacciones monómero-monomero y monómero-solvente en el cual predominan las interacciones monómero-solvente, la molécula estará expandida a un grado máximo penetrando el solvente a una mayor profundidad y con una consiguiente viscosidad mayor para la solución.

## ii) nombre común y IUPAC para la viscosidad.

NOMBRE COMÚN	NOMBRE IUPAC	DESCRIPCION
Viscosidad Relativa	Relación de viscosidades	$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{t}{t_0}$
Viscosidad Específica	-	$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \frac{t - t_0}{t_0} = \eta_{rel}^{-1}$
Viscosidad Reducida	No. de viscosidad	$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{C} = \frac{\eta_{rel}^{-1}}{C}$
Viscosidad Inherente	No. de visc. logarítmico	$\eta_{inh} = \frac{\ln(\eta_{rel})}{C}$
Viscosidad Intrínseca	No. de visc. limitante	$[\eta] = \left( \frac{\eta_{sp}}{C} \right)_{C \rightarrow 0} = (\eta_{inh})_{C \rightarrow 0} X$

## iii) notación.

- A** constante del viscosímetro
- B** constante de la corrección cinemática
- C<sup>\*\*</sup>** región concentrada.
- C<sup>\*</sup>** concentración crítica.
- C** concentración
- °C** grados centígrados
- G'** módulo elástico
- I** fuerza iónica, es la semisuma de los productos  $C_i z_i^2$ , de todos los iones presentes en solución.
- $$I = \frac{1}{2} \sum C_i z_i^2$$
- J** flujo
- L<sub>CA</sub>** longitud del capilar
- mM** milimolar
- ppm** partes por millón.
- pH** se define como el logaritmo decimal de signo contrario de la actividad del ion hidrógeno  $-\log [H_3O]^+$

*Letras Griegas*

- $\eta$  coeficiente de viscosidad
- $[\eta]$  viscosidad intrínseca.
- $\eta_o$  viscosidad del solvente.
- $\eta_{red}$  viscosidad reducida.
- $\eta_{sp}$  viscosidad específica.
- $\eta_{rel}$  viscosidad relativa.
- $\mu$  viscosidad.

## BIBLIOGRAFIA.

- (1) Amin El S., Olfat M. Awad, and M. M. El-Sayed. "The Mucilage of *Opuntia ficus-indica* Mill." *Department of Chemistry, Alexandria University, Alexandria, Egypt (U.A.R.). Carbohydr. Res.*, 15 (1970) 159-161. march 30, 1970.
- (2) Anzaldo Trejo Juan Manuel. "El Mucilago de la *Opuntia ficus-indica*".
- (3) Badui Dergal Salvador. "Diccionario de tecnología de alimentos". *Alhambra Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. México 1996.
- (4) Barbosa Cánovas G.V and L. Ma. "Rheological properties of food gums and food gum mixtures" *Department of Biological Systems Engineering*. Washington State University. 1992.
- (5) Berit Smestad Paulsen and Per Steinar Lund. "Water-soluble polysaccharides of *Opuntia ficus-indica* CV (Burbank's Spineless). Department of Pharmacognosy, *Institute of Pharmacy*, University of Oslo, P.B. 1068 Blindern. Oslo 3, Norway 17 July 1978.
- (6) Bird R. B. "Fenomenos de Transporte".
- (7) Bravo-Hollins H. "Las cactaceas de México." *Universidad Nacional Autónoma de México*. Vol. 1, (1978).
- (8) By G. O. Aspinall  
"Gums and Mucilages". *Department of Chemistry*, Trent University, Peterborough. Ontario, Canadá.
- (9) Carbajal De Nova Rosa Isela. "Estudio del comportamiento físico de emulsiones hipocalóricas durante su almacenamiento." *Tesis de Maestría*, CINVESTAV-IPN. 1996.
- (10) Cárdenas Vargas Benito. "El Nopal memelo". *Folleto de actualización*. Vargas y Monroy, México 1989.
- (11) Christesen B.E, Smidsrod O, Elgsaeter A, Stokke BT. "Depolymerization of double-stranded xanthan by acid hydrolysis: characterization of partially degrade double strands and single-stranded oligomers released from the ordered structures". *Macromolecules*, 26 (22) 6111-6120, 1993.

- (12) Cui W & Mazza G. "Physicochemical characteristics of flaxseed gum". *Food Research International*, 29(3/4) 397-402, 16, 1996.
- (13) Dealy John M. "Official nomenclature for material functions describing the response of a viscoelastic fluid to various shearing and extensional deformations". *The Society of Rheology, Inc. 37(1), jan/feb 1993*.
- (14) Farrington Daniels. "Curso de Fisicoquímica Experimental". *Mc GrawHill*. México 1972.
- (15) Fiszman S.M., E. Costell y L. Durán. "El Comportamiento reológico de los geles de hidrocoloides. Relación con su composición y estructura". *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.*, 24(2), 1984
- (16) Flores Hernandez Arnoldo. "El Nopal *Opuntia spp*". Folleto de divulgación *PRONASOL-CONACYT-PLAN NUEVA LAGUNA*. Universidad Autónoma de Chapingo. Unidad Regional Universitaria de zona aridas. Septiembre 1994.
- (17) García-Rejón G. "Introducción a la Reología de los polímeros" *Plasti-Noticias*. México 1981.
- (18) Geankoplis, C. "Procesos de transporte y operaciones unitarias". *Libro 3a imp*. CECSA. México (1988).
- (19) Glicksman M. (ed.) "Food hydrocolloids". *Vol I and III*. CRC Press. Boca Raton Florida, USA. 1986.
- (20) Guzman Monica. "Hidrocoloides". *Gcia. Cuentas Especiales*. Germantown International Limited México.
- (21) Haake Mess-Technik. "Instruction manual" *Haake Mess-Technik Co., Germany* 1992.
- (22) Hwang Jaekwan and Jozef L. Kokini "Structure and Rheological function of side branches of carbohydrate polymers". *Journal of Texture Studies* 22 (1991) 123-167 1991.
- (23) Kakii Kazuo, Satoru Kitamura, Takashi Shirakashi and Mitsuo Kuriyama. "Some Properties of Mucilage Polysaccharides Extracted from Sewage Activated Sludge". Department of Environmental Chemistry, Faculty of Engineering, Utsunomiya University, Ishii-cho, Utsunomiya 321, Japan. *J. Ferment. Technol.*, Vol. 62, No. 5, p. 429-435. 1984.

- (24) Kakii Kazuo, Satoru Kitamura, Takashi Shirakashi and Mitsuo Kuriyama. "Comparasion of mucilage Polysaccharides Extracted from sewage activated sludge". Department of Enviromental Chemistry, Faculty of Enginnering, Utsunomiya University, Ishii-cho. Utsonomiya 321, Japan. *J.Ferment. Technol.*, Vol. 64, No. 1, 15-56. 1986.
- (25) Key Whang, Sam Pin Lee "Functional properties of mucilage and pigment extracted from *Opuntia ficus indica*" *Journal of the Korean Society of food Science and Nutrition*, 27(5) 821-826, 15.
- (26) Kramer, E.O. "Molecular weights of celluloses and cellulose derivatives". *Ind.Eng.Chem.*, 30, 1200-1230(1938).
- (27) Launay B, Cuvelier G, Martinez Reyes S. "Viscosity of locust bean, guar and xanthan gum solutions in the Newtonian domain: a critical examination of the log( $\eta_{sp}$ )/ $c$ -log  $C$ ( $\eta$ ) $_0$  master curves". *Carbohydrate Polymers*; 34 (4) 385-395, 34, 1997.
- (28) McGarvie Donald and Haralambos Parolis. "The mucilage of *Opuntia ficus-indica* Department of Chemistry, Rhodes University, Grahamstown 6140 (South Africa). march 1978
- (29) McGarvie Donald and Haralambos Parolis. "The acid-labile, peripheral chains of the mucilage of *Opuntia ficus-indica*". *Department of Chemistry*, Rhodes University. P.O. Box 94 Grahamstown 6140 (South Africa). february 1981.
- (30) Medina-Torres L. "Rheological properties of mucilage gum (*Opuntia ficus indica*) *Food Hydrocolloids*; 9 (3) 165-172, 12.2000 Department, Chemistry Faculty "E", National Autonomus University of México(UNAM), 04510 México, D:F: México.2000.
- (31) Morris Edwin R. and Simon B. Ross-Murphy. "Chain Flexibility of Polysaccharides and glycoproteins from Viscosity Measurements". Unilever Research, *Colworth Laboratory*, Sharnbrook, Bedford MK 44 11Q, UK.
- (32) Ndjouenkeu R, Akingbala JO, Richardson RK, Morris ER. "Weak gel, properties of kha flour from *beilschmiedia* sp.- a traditional food thickener from tropical west africa". *Food Hydrocolloids*; 9 (3) 165-172, 12. 1995.
- (33) Ortuño Hernandez Teresa "Aportación al Estudio de la Goma del Nopal". Universidad Nacional Autónoma de México. *Tesis* 1951.

- (34) Pimienta Barrios Eulogio .“El Nopal Tunero”*Libro.Universidad de Guadalajara.México* 1990.
- (35) Pin Sam Lee, Key Whang & Young Duck Ha.“Functional properties of mucilage and pigment extracted from *Opuntia ficus indica*”.*Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*.27 (5) 821-826, 15 , 1998.
- (36) Prieto Melendez, Ma. de Lourdes. y Sánchez Castillo Ma. Magdalena.“Elaboración de un cristalizado a base de nopal”.*U.N.A.M.* 1995.
- (37) Rajesh Dhani, Harding SE, Jones T, Hughes T, Mitchell JR, Kar mun To.“Physico-chemical studies on a commercial food grade xanthan.i.- Characterisation by sedimentation velocity, sedimentation, equilibrium and viscometry”.*Carbohydrate Polymers*, 27 (2) 93-99, 53, 1995.
- (38) Rodríguez H.A., Tecante A.,”*Propiedades reológicas dinámicas de geles formados por mezclas gelana-xantana y gelana iota-carragenina.*” Tesis de Maestría, UNAM 1997.
- (39) Rodríguez H & Aguilar L.“Detection of *Xanthomonas campestris* mutants with increased xanthan production”.*Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 18 (4) 232-234, 22, 1997.
- (40) Smidsrod, O., & Haug, A. *Biopolymers*, 19, 1213-1227, 1971.
- (41) Steffe, F. James “ *Rheological methods in food process engineering* “ Second Edition Freeman Press USA1996.
- (42) Trachtenberg Shlomo and Alfred M. Meyer.“Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* Mucilage”. *Botany Department*, Hebrew University, 91904 Jerusalem, Israel. 19 de february 1981.
- (43) Trachtenberg Shlomo and Alfred M. Meyer.  
“Biophysical properties of *Opuntia ficus-indica* Mucilage. ”.*Botany Department*, Hebrew University, 91904 Jerusalem, Israel. 24 march 1981.
- (44) Trachtenberg Shlomo and Alfred M. Meyer.  
“A Stereological Analisis of the Succulent Tissue of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill ”.*Botany Department*, Hebrew University, 91904 Jerusalem, Israel. 22 april 1981.

- (45) Tecante, A. "Reología de geles en memorias del curso: Reología y su aplicación al procesamiento de alimentos." *Programa Universitario de Alimentos* (1995).
- (46) Torres G Luis, Edmundo Brito, Enrique Galindo y Lionel Choplin "Viscous Behaviour of xanthan aqueous solutions from a variant strain of *Xanthomonas campestris*" *Journal of Fermentation and Bioengineering*. Vol 75 No. 1 58-64. 1993.
- (47) Vernon, E.J., Lever, C.A. y Torreblanca A. "Estudio de las propiedades viscoelásticas de productos alimenticios". *Rev. Tecnol. Aliment.* (Méx) Vol. XVIII, No.2.
- (48) Vernon, E.J., Lever, C.A. y Torreblanca "Propiedades reológicas de emulsiones alimenticias". *Rev. Tecnol. Aliment.* (Méx) Vol. XVIII, No.1.
- (49) Villarreal F.P. Rojas Mendoza, V. Arellano y J. Moreno. "Estudio químico sobre seis especies de nopales (*Opuntia* spp.)" *Ciencia Aplicada. Departamento de Química, Parasitología y Botánica*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, N.L.