



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES<sup>M.</sup>  
CUAUTILÁN**

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTILÁN



**REOLOGÍA Y TEXTURA DE MATERIALES BIOLÓGICOS,** de  
**PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS (FLUENCIA Y RELAJACIÓN) DE** <sup>de</sup>  
**GELATINAS COMERCIALES. EFECTO DEL TIPO DE GELIFICANTE**  
**( GRENETINA Y CARRAGENINA).**

**TRABAJO DE SEMINARIO**  
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**  
**INGENIERA EN ALIMENTOS**  
**P R E S E N T A**  
**LUCÍA SÁNCHEZ TRUJILLO**

ASESORA: IBQ. NORMA BEATRÍZ CASAS ALENCÁSTER

CUAUTILÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO.

2002

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



VERDAD NACIONAL  
AVERGÜENZA AL  
MUNDO

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Reología y Textura de Materiales Biológicos: Propiedades viscoelásticas

( fluencia y relajación ) de gelatinas comerciales. Efectos del tipo de  
gelificante ( gretina y carragenina ).

que presenta la pasante: Lucía Sánchez Trujillo

con número de cuenta: 9110508-4 para obtener el título de:

Ingeniera en alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 15 de Julio de 2002.

MODULO	PROFESOR	FIRMA
<u>I</u>	<u>Men C. Maria Eugenia Ramirez Ortiz</u>	<u>[Firma]</u>
<u>II</u>	<u>Men C. Virginia Delgado Reyes</u>	<u>[Firma]</u>
<u>III</u>	<u>I.B.O. Norma B. Casas Alencaster</u>	<u>[Firma]</u>

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios:

Por permitirme llegar hasta aquí y lograr esto, que es mi sueño hecho realidad. Por darme el precioso don de la vida.

A mis padres

Papá: Por ayudarme a empezar esto, que hoy es una realidad. ¡Gracias!  
Mamá: Por tu sacrificio, por ser el combustible para mi motor. ¡Te amo!

A la Profesora Norma Casas:

Por su ayuda y apoyo incondicional. ¡Gracias!

A mis hermanos

Korí, Hugo y Julio: Por estar conmigo todo este tiempo y apoyarme en todo momento. ¡Esto es para ustedes!

A mis sobrinos

Fernando, Sergio y el que viene: Porque son las ramas de nuestro árbol, porque sean personas de bien y se superen todos los días de su vida. ¡Los quiero!

Una dedicatoria muy especial a alguien que ya no esta físicamente con nosotros, pero que siempre llevare en el corazón:

A ti Gus, ¡donde quiera que estés!

A mis primos

Adrián y Víctor: Por enseñarme el valor de la solidaridad, por su apoyo cuando más necesité, esto también se los debo a ustedes.

A mi amiga Claudia:

Por soportar todo este tiempo conmigo. Por las noches de desvelo. ¡Gracias!

## RESUMEN

Se efectuaron pruebas de fluencia y relajación por compresión en geles de gretina y carragenina elaborados a partir de mezclas comerciales en polvo para preparar "gelatinas". Se utilizó un texturómetro Lloyd TA 500 con celda de carga de 10 N y una placa de aluminio de 4.5 cm de diámetro. Se impusieron tres niveles de esfuerzo en fluencia (1529, 2549 y 3568 Pa), por 120 s y tres niveles de deformación en relajación (12,5, 18.75 y 25%) por 240 s. Las pruebas se efectuaron por quintuplicado a 13°C. Las curvas experimentales de capacitancia de fluencia y relajación, después de corregirse por el aumento de área, se ajustaron al modelo de Kelvin-Voigt generalizado (fluencia), al modelo de Maxwell (relajación) y ambos a ecuaciones empíricas. Algunos parámetros mostraron dependencia del esfuerzo y/o deformación impuestos por lo que no se tuvo acceso a la zona de viscoelasticidad lineal, aun así, las pruebas diferenciaron claramente un carácter más sólido en los geles de gretina, denotado por menores tiempos de retardo, mayor participación del valor de capacitancia instantáneo a la capacitancia máxima y menor deformación viscosa, en las pruebas de fluencia. En relajación, las muestras de gretina se caracterizaron por tiempos de relajación y módulo residual mayores; lo anterior y los valores de las constantes empíricas confirmaron el carácter más sólido de los geles de gretina. La dependencia de los parámetros con el esfuerzo ayuda a entender la forma en que los materiales se deforman y los resultados pueden ser de utilidad cuando se consideran las aplicaciones de estos gelificantes en alimentos, en función del comportamiento esperado en los mismos.

## I. INTRODUCCION

Una aplicación de creciente interés de los hidrocoloides es la gelificación, ya sea para la obtención de geles en agua o leche de muy diversas texturas en postres y productos de confitería, o como una propiedad enfocada a la sustitución de grasa, el reforzamiento y modificación de textura en embutidos y derivados lácteos, entre otras aplicaciones. Los geles pueden clasificarse por el tipo de uniones en las zonas de entrecruzamiento, como geles químicos cuando éstas son covalentes y geles físicos cuando son no covalentes. Ejemplos de éstos últimos son los geles de grenetina y de polisacáridos de algas (Ross-Murphy, 1995).

Por casi un siglo, la grenetina se ha producido a escala industrial y utilizado como agente estructurante, para proporcionar la textura requerida en dulces, postres, productos cárnicos y lácteos (Anónimo,1992). La grenetina produce geles transparentes, ligeramente coloreados, su temprana fusión a la temperatura de la boca proporciona una excelente liberación de sabor durante la masticación, lo cual la hace única y popular para algunas aplicaciones, pero la limita en ciertos productos (Papageorgiou y Kasapis,1995). La elaboración y almacenamiento de postres a partir de gelatina requiere refrigeración. Los geles de grenetina son suaves y flexibles pero sus propiedades texturales son muy limitadas. La formación de gel requiere concentraciones superiores a la de otros gelificantes como la gelana, además de mayor tiempo y menor temperatura para la gelificación. La fuerza del gel depende de la concentración y es poco influenciada por la fuerza iónica y el pH (Lau y col., 2000). Bajo una prueba de Perfil de Textura, se producen geles con fuerza similar (35-44 N) con 4% de grenetina, 1.5% de agar, 1.0% de carragenina y 0.5% de gelana. La

grentina produce los geles más elásticos, menos frágiles y menos firmes al tacto; la carragenina los más duros; la gelana los más firmes al tacto (respuesta a bajas deformaciones) y frágiles (Anónimo, 1992). La carragenina kappa se ha utilizado como sustituto de la grentina para la preparación de geles en agua que no requieren de refrigeración para gelificar, los geles de este tipo presentan abundante sinéresis y son frágiles.

Los geles alimenticios, a pesar de contener más de 90% de agua, no fluyen, pero tampoco se comportan como sólidos estrictamente, por lo que se clasifican como materiales viscoelásticos. La viscoelasticidad es el efecto combinado de propiedades sólidas y líquidas. El comportamiento viscoelástico puede ser evaluado en la zona de viscoelasticidad lineal (cuando las propiedades del material sólo dependen del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo o deformación impuesta) o fuera de ella. Algunos materiales presentan una zona de viscoelasticidad lineal, limitada a muy bajas deformaciones o esfuerzos (Rao, 1992).

Existen varios métodos para determinar las propiedades viscoelásticas de los materiales alimenticios entre los que se encuentran las pruebas estáticas de fluencia y relajación. Ambas han sido extensamente utilizadas en la caracterización reológica de materiales incluyendo alimentos como quesos, geles, vegetales y embutidos (Whorlow, 1980).

## PRUEBAS ESTATICAS.

En las pruebas de fluencia por compresión se aplica un esfuerzo constante ( $\sigma_0$ ) y se registra el cambio con el tiempo de la deformación relativa resultante ( $\epsilon$ ), se define la deformación relativa al esfuerzo o *capacitancia de fluencia* como  $J = \epsilon_0 / \sigma$ . En relajación, se aplica repentinamente al material una cierta deformación ( $\epsilon_0$ ) que se mantiene constante el tiempo suficiente para observar la respuesta del esfuerzo ( $\sigma$ ) que disminuye gradualmente y se define el *módulo de relajación* como  $E = \sigma_0 / \epsilon$ . Las pruebas de este tipo pueden hacerse en modo de extensión o compresión en el caso de materiales sólidos y en cizalla en el caso de materiales semisólidos y fluidos. Dentro de las limitaciones que se presentan con las pruebas de fluencia y relajación están la dificultad de acceder a la zona lineal ya que en la mayoría de los datos publicados (Hermansson, 1982; Ma y Barbosa, 1997; Nussinovitch y col., 1990a y b), este aspecto no se ha verificado o los resultados estuvieron claramente fuera del dominio lineal; además, el tiempo ( $\Delta t$ ), necesario para alcanzar el esfuerzo o deformación impuestos debe ser menor que el menor tiempo de relajación, de no ser así, el espectro de relajación es truncado. La fricción entre la muestra y las placas o el deslizamiento influyen de manera importante en las curvas obtenidas. Otros factores que afectan los resultados son las dimensiones de la muestra, la velocidad de compresión y los niveles de deformación. Los experimentos a tiempos largos en geles presentan problemas prácticos como deshidratación, sinéresis, cambio lento de propiedades y variación de temperatura. En la mayoría de los casos, se utilizan modelos para ajustar las curvas experimentales y la respuesta está altamente predeterminada por la elección del modelo. Como consecuencia, la mayoría de los

parámetros publicados no son solamente dependientes de las propiedades reológicas de los geles sino también de las condiciones experimentales y no serán comparables de un gel a otro. Sin embargo, incluso bajo estas condiciones restringidas, los parámetros extraídos de las curvas de fluencia y relajación pueden ser útiles en la práctica para establecer ecuaciones empíricas que relacionen las propiedades viscoelásticas con la composición, el proceso térmico o para predecir la textura de geles (Doublie y col., 1992).

### RELAJACION

Algunos modelos para la zona de viscoelasticidad lineal son utilizados en las curvas de relajación, por ejemplo el modelo de Maxwell generalizado (ecuación. 1).

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\lambda_i}} + E_{n+1} \quad (1)$$

Donde:  $E(t)$  módulo de relajación en función del tiempo;  $E_i = \sigma/\epsilon_0$ , módulo elástico del  $i$ ésimo elemento del modelo;  $\sigma$ , Esfuerzo;  $\epsilon_0$ , deformación relativa impuesta;  $\lambda_i$ , tiempo de relajación y  $E_{n+1}$ , módulo residual o asintótico. Cualquiera que sea el número de elementos Maxwell utilizados, el comportamiento resultante es característico de líquidos viscoelásticos en ausencia de módulo residual. En algunos casos, a tiempos de relajación prolongados, el esfuerzo tiende a alcanzar un valor aparentemente constante y el sistema puede ser considerado como un sólido viscoelástico, por lo menos en la escala de tiempo utilizada, lo que corresponde al

término constante  $E_{n+1}$  de la ecuación 1. El modelo de Maxwell generalizado se asocia con un modelo mecánico que consta de "i" elementos Maxwell (un amortiguador, elemento viscoso, y un resorte, elemento elástico, en serie), unidos en serie con un elemento elástico (resorte). Algunas ecuaciones puramente empíricas han sido propuestas para analizar las curvas de caída de esfuerzo. Entre éstas, está la ecuación propuesta por Peleg (1979):

$$\frac{{}^tE_0}{(E_0 - E(t))} = k_1 + k_2 t \quad (2)$$

Donde:  $E_0$  es el valor inicial del módulo de relajación,  $k_1$  el tiempo característico del proceso y  $k_2$  un parámetro adimensional ( $k_2 \geq 1$ ). Esta ecuación ha sido utilizada para ajustar curvas de caída de esfuerzo en geles de polisacáridos por Nussinovitch y col. (1990a y b) y por Guo y col. (1999) en masas de harina de maíz nixtamalizado con buenos resultados. El valor límite del módulo a tiempos largos está dado por:

$$E_{lim} = E_0 \left( 1 - \frac{1}{k_2} \right) \quad (3)$$

Un líquido viscoelástico es caracterizado por  $k_2=1$  (relajación completa). Cuando  $k_2 > 1$  el módulo asintótico puede ser calculado con el valor  $E_{lim}$ . Otra ecuación utilizada para el ajuste de datos de relajación por Peleg (1979) y Hermansson (1982), en diferentes productos es:

$$\frac{(E_0 - E(t))}{E_0} = \frac{abt}{(1+bt)} \quad (4)$$

El valor de **a** describe el nivel de la caída de esfuerzo, cuando **a=0** corresponde a un sólido elástico ideal y cuando **a=1** corresponde a un líquido ideal. El valor de **b** describe la velocidad a la cual el esfuerzo se relaja y tiene unidades de  $t^{-1}$ . El valor de **(1-a)** ha sido tomado como una medida del grado de elasticidad. El tiempo necesario para alcanzar **a/2** es **1/b** y es una medida del tiempo de relajación.

## FLUENCIA

En las pruebas de capacitancia de fluencia, un factor que contribuye de manera sustancial en los resultados es el cambio de área de la sección transversal durante la prueba. Independientemente si los resultados fueron obtenidos en el dominio lineal o no, la siguiente ecuación general ha sido usada para ajustar los datos experimentales en pruebas de fluencia bajo compresión o cizalla

$$J(t) = J_0 + \sum_{i=1}^{i=n} J_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) + \frac{t}{\eta_0} \quad (5)$$

Donde:  $J(t)$ , capacitancia en función del tiempo;  $J_0$ , capacitancia instantánea;  $J_i$  y  $\tau_i$ , capacitancia y tiempo de retardo de los elementos Kelvin del modelo;  $\eta_0$ , viscosidad en la zona de flujo estacionario. La curva que describe la ecuación 5 tiene tres zonas, una de capacitancia instantánea ( $J_0$ ) o deformación instantánea ( $\epsilon_0$ ), paralela al eje de las ordenadas (resorte); una retardada dada por los "i" elementos Kelvin del modelo (resorte y amortiguador en paralelo) y una zona lineal de

deformación continua,  $t/\eta_0$ , (amortiguador). Si  $J_0=0$  y  $n=1$ , tenemos el modelo de Lethersich, si  $n=1$  el modelo de Burgers y si  $n>1$  se conoce como el modelo de Kelvin-Voigt generalizado. Para el cálculo de los parámetros se ha recurrido al método gráfico de aproximaciones sucesivas de Inokuchi o a métodos de regresión no lineal utilizando paquetes matemáticos comerciales (Rao, 1987; Casas y Gómez, 2001). En la mayoría de los estudios con geles, éstos se comportan como líquidos a tiempos largos cuando la deformación se hace lineal con el tiempo y esto se atribuye al hecho de que algunas de las uniones no son permanentes cuando son sometidas a esfuerzo (Mitchell, 1979).

Purkayastha y col. (1985), proponen una forma simplificada que brinda un buen ajuste cuando el comportamiento es descrito hasta por cuatro términos exponenciales

$$J(t) = J_0 + t/\eta_0 + \frac{t}{K_1 + K_2 t} = J_0 + t/\eta_0 + \phi(t) \quad (6)$$

El tercer término de la ecuación 6, conocido como "función fluencia",  $\phi(t)$ , describe de dos a cuatro términos exponenciales y mantiene las características del modelo de Kelvin-Voigt generalizado.  $J_0$  es la capacitancia instantánea;  $\eta_0$ , viscosidad en la zona de flujo;  $t$ , tiempo;  $K_2$  ( $\text{Pa}^{-1}$ ) y su recíproco  $1/K_2$  (Pa), es una medida de la suma de  $J_i$  (valor asintótico de la "función fluencia");  $K_1$  (Pa s) está relacionado con la viscosidad que retarda la deformación elástica. La aplicación de esta ecuación facilita la separación del ajuste a la linealidad de las diferentes partes de la curva de fluencia.

El objetivo del presente trabajo es comparar el comportamiento viscoelástico de geles de grenetina y carragenina comerciales ("gelatinas") bajo pruebas de fluencia y relajación, ajustando tanto a modelos para la zona de viscoelasticidad lineal, como a ecuaciones empíricas. Asimismo, se pretende analizar el efecto del esfuerzo (fluencia) y la deformación (relajación) en el caso de que las condiciones de prueba no permitan el estudio en la zona de viscoelasticidad lineal.

## II. MATERIALES Y METODOS

### **Materiales**

Se utilizaron muestras de gelatinas comerciales de carragenina (Pronto, General Foods) y grenetina (Royal, Navisco S.A. de C.V.).

Las muestras se prepararon hidratando el contenido del paquete (170 g para grenetina y 130 g para carragenina) con 500 mL de agua a 92° C hasta completa disolución, se vació cada solución en cajas Petri de 90 mm de diámetro y 16 mm de altura, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se refrigeraron a 9°C por 24 horas. Por medio de un sacabocados se cortaron muestras cilíndricas de 35 mm de diámetro y 16 mm de altura, las muestras ya cortadas se mantuvieron en refrigeración hasta el momento de efectuar la prueba. Por medio de la información nutrimental presentada en el envase y la cantidad de agua empleada para la preparación se calculó la concentración final de grenetina y carragenina, siendo éstas 2.94% y 2.28% respectivamente. El contenido de azúcar es de 21.56% para la gelatina de grenetina y 19.78% para la gelatina de carragenina. Los ingredientes de cada gelatina son: CARRAGENINA: Azúcar refinada, carragenina, ácido adipico, citrato de potasio, saborizante y colorantes artificiales, aspartame (0.07%) y asesulfame K (0.02%). GRENETINA: Azúcar refinada, grenetina, ácido fumárico, citrato de sodio, sal yodada, saborizante artificial, fosfato monocálcico, vitamina C y colorantes artificiales.

### **Métodos**

Ambas pruebas fueron efectuadas por compresión. Se utilizó un Texturómetro Lloyd Modelo TA 500 con celda de carga de 10 N. En los experimentos de fluencia se

impusieron tres niveles de fuerza: 0.150, 0.250 y 0.350 kg (1529, 2549 y 3568 Pa) durante 120 s. En las pruebas de relajación se impusieron tres niveles de deformación: 12.5, 18.75 y 25% durante 240 s. Para ambas pruebas se utilizó como dispositivo una placa de aluminio de 4.5 cm de diámetro y una fuerza de 5 g para que el dispositivo determinara el contacto con la muestra. Durante la prueba, se tuvo una temperatura promedio de 13° C. Se hicieron cinco réplicas de cada prueba y el análisis de resultados se realizó tratando los datos experimentales con la media aritmética de los datos de las cinco réplicas.

### **Tratamiento de datos**

#### **Pruebas de fluencia**

Para las pruebas de fluencia, los datos promedio de distancia recorrida por el dispositivo en función del tiempo fueron tratados en una hoja de cálculo a fin de obtener la capacitancia corregida ( $J_c(t)$ ) a partir del esfuerzo corregido y la deformación de Hencky por efecto del aumento de área como lo definen Nussinovitch y col. (1990a). Los datos de capacitancia corregida en función del tiempo fueron ajustados al modelo de Kelvin-Voigt generalizado (ecuación 5) con uno y dos tiempos de retardo en el programa "Creep" programado en Turbo Pascal por Casas y Gómez (2001). El programa está basado en el método gráfico de Inokuchi, y proporciona valores preliminares de los parámetros del modelo, los cuales fueron finalmente alimentados en el programa matemático comercial Curve Expert 1.3 (Microsoft Corp.) al cual previamente se ingresó el modelo de Kelvin-Voigt generalizado con el fin de obtener un ajuste más fino al modelo. En el mismo programa "Creep" se calculó el porcentaje de contribución de cada elemento del

modelo a la capacitancia corregida obtenida al tiempo máximo de prueba, denominada capacitancia máxima ( $J_m$ ).

El ajuste a estos modelos tiene la desventaja de que se incluyen un mayor número de constantes por lo que se recurrió al modelo simplificado (ecuación 6). El ajuste a este modelo también se efectuó en el programa "Creep" y en el Curve Expert. Se efectuaron regresiones lineales de los parámetros  $\eta_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $J_m$ ,  $J_0$ , y  $1/K_2$  (capacitancia asintótica) a fin de observar su dependencia con el esfuerzo.

### **Pruebas de relajación**

En el caso de las pruebas de relajación los datos experimentales de fuerza en función del tiempo también fueron tratados en una hoja de cálculo a fin de obtener el área calculada y el esfuerzo corregido (Nussinovitch y col., 1990a) basándose en los cuales se calculó el módulo de relajación en función del tiempo. Los datos de módulo de relajación en función del tiempo se ajustaron al modelo de Maxwell generalizado (ecuación 1) con los elementos que proporcionaron el mejor ajuste utilizando el programa matemático comercial Curve Expert. Asimismo, los datos se ajustaron a las ecuaciones empíricas 2 y 4 de dos parámetros, propuestas entre otros autores por Peleg (1979).

Finalmente, se relacionaron los parámetros de equilibrio en fluencia y relajación (capacitancia asintótica y módulo asintótico) por medio de regresiones lineales.

### III. RESULTADOS

#### FLUENCIA.

En el Cuadro 1 se presentan la deformación relativa máxima y la capacitancia máxima corregida y aparente de las gelatinas de grenetina y carragenina a los tres esfuerzos impuestos.

Cuadro 1. Deformación relativa máxima, capacitancia máxima aparente y corregida para geles de carragenina y grenetina.

GELIFICANTE	ESFUERZO INICIAL (Pa)	DEFORMACIÓN RELATIVA MÁXIMA (%)	CAPACITANCIA MÁXIMA APARENTE (Pa <sup>-1</sup> )	CAPACITANCIA MÁXIMA CORREGIDA (Pa <sup>-1</sup> )
CARRAGENINA	1529.40	19.36	1.15 E-04	1.53 E-04
	2549.10	27.21	9.35 E-05	1.40 E-04
	3568.70	32.16	7.70 E-05	1.24 E-04
GRENETINA	1529.40	18.74	1.17 E-05	1.48 E-04
	2549.10	27.02	9.29 E-05	1.39 E-04
	3568.70	32.90	7.85 E-05	1.28 E-04

Del Cuadro 1 puede observarse que al aumentar el esfuerzo inicial la deformación relativa máxima aumenta para ambos geles y su magnitud, al mismo esfuerzo, es muy similar. La capacitancia corregida fue mayor que la aparente en todos los casos y disminuyó al aumentar el esfuerzo (Figura 1), lo cual es indicativo de que no se trabajó en la zona de viscoelasticidad lineal. Esto se atribuye a que el nivel de deformación alcanzado ocasionó un aumento importante en el área de la sección transversal del gel, disminuyendo el esfuerzo y aumentando la deformación relativa al esfuerzo. Purkayastha y col., (1985) encontraron un efecto similar de aumento de la capacitancia corregida en pulpa de papa y queso cheddar, así como un aumento de esta diferencia al aumentar el esfuerzo.

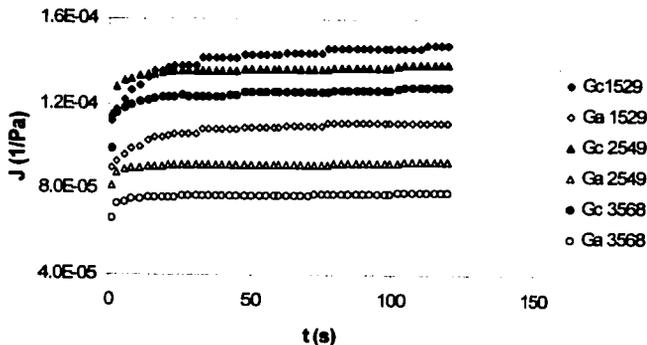


Figura 1. Capacitancia aparente ( $G_a$ ) y corregida ( $G_c$ ), para geles de grenetina a los diferentes esfuerzos (1529, 2549 y 3568 Pa).

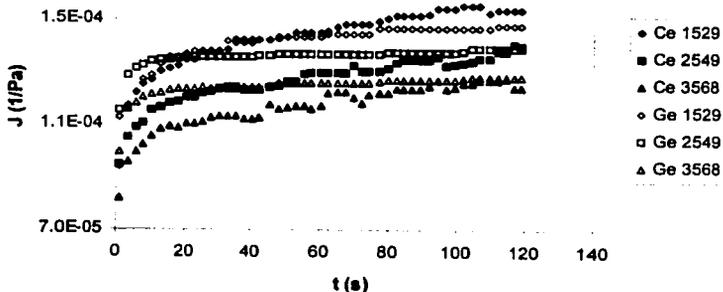


Figura 2. Capacitancia corregida experimental para geles de carragenina ( $C_e$ ) y grenetina ( $G_e$ ) a los diferentes esfuerzos (1529, 2549 y 3568 Pa).

En la Figura 2 se presenta la capacitancia corregida de los geles de grenetina y carragenina a los tres esfuerzos. Aun cuando la capacitancia máxima ( $J_m$ ) es muy similar para ambos geles, la forma de las curvas cambia, lo que implica un comportamiento viscoelástico diferente. Las principales diferencias entre las curvas de los geles de grenetina y carragenina radican en una mayor capacitancia instantánea para grenetina y una mayor pendiente de la zona lineal para carragenina, implicando una menor viscosidad y una mayor deformación en esta zona para los geles de carragenina. El hecho de que las curvas de la capacitancia en función del tiempo a los diferentes esfuerzos no se superpongan (Figuras 1, 2 y 3) confirma que no se tuvo acceso a la zona lineal. Purkayastha y col. (1985) en pulpa de papa fresca y queso cheddar, observaron una dependencia de las curvas de capacitancia con el esfuerzo, como en el caso que nos ocupa.

Aún cuando los esfuerzos impuestos provocaron estar fuera del intervalo de viscoelasticidad lineal, los datos experimentales fueron ajustados a los modelos de Burgers (ecuación 5,  $n=1$ ), de Kelvin-Voigt generalizado con dos tiempos de retardo (ecuación 5,  $n=2$ ) así como al modelo simplificado (ecuación 6), por medio del procedimiento antes mencionado. En la Figura 3, se presentan las curvas de capacitancia corregida y calculada ajustadas al modelo de Kelvin-Voigt generalizado con dos tiempos de retardo para las gelatinas de grenetina (Figura 3a) y carragenina (Figura 3b), a excepción de los geles de carragenina al menor esfuerzo, para los cuales se presenta el ajuste al modelo simplificado, ya que el de Burgers y Kelvin-Voigt generalizado no proporcionaron un ajuste adecuado.

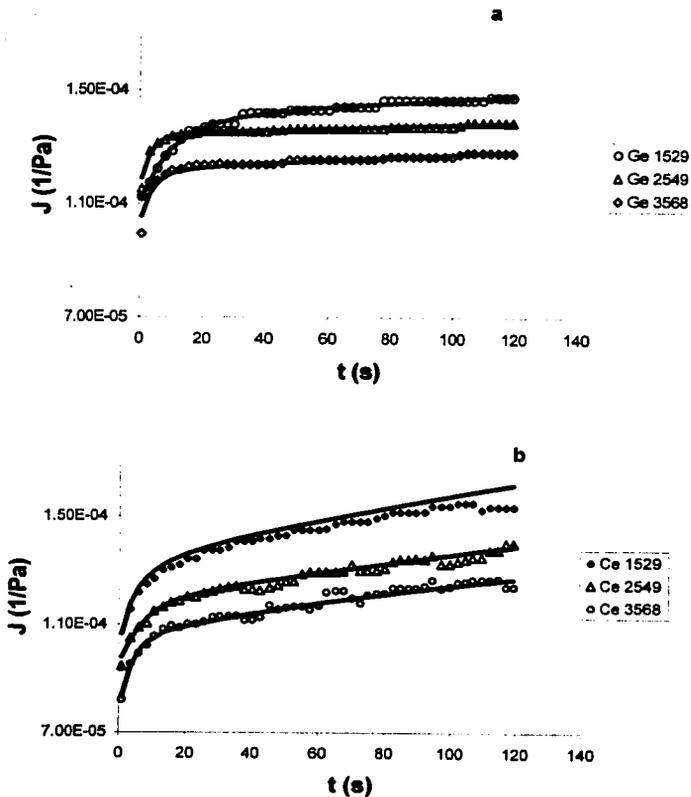


Figura 3. Capacitancia experimental y calculada para geles de gretatina (a) y carragenina (b). Ge, capacitancia experimental para gretatina y Ce, capacitancia experimental para carragenina. Líneas continuas: capacitancia calculada.

Cuadro 2. Parámetros de los modelos de Kelvin-Voigt generalizado con dos tiempos de retardo y simplificado para los geles de carragenina a los tres esfuerzos.

ESFUERZO (Pa)	MODELOS		
	PARAMETRO	KELVIN-VOIGT GENERALIZADO	SIMPLIFICADO
1529	$J_0$ (Pa <sup>-1</sup> )	9.52E-05	9.98E-05
	$J_1$ (Pa <sup>-1</sup> )	4.09E-06	
	$T_1$ (s)	24.20	
	$1/\eta_0$ (Pa <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	1.62E-07	2.11E-07
	$\eta_0$ (Pa s)	6.17E+06	
	$J_2$ (Pa <sup>-1</sup> )	2.05E-05	
	$T_2$ (s)	6.47	
	$K_1$ (Pa s)		1.019E+05
	$(J_1+J_2), 1/K_2$ (Pa <sup>-1</sup> )	2.45E-05	3.81E-05
	$r^2$	0.819	0.889
2549	$J_0$ (Pa <sup>-1</sup> )	9.05E-05	9.29E-05
	$J_1$ (Pa <sup>-1</sup> )	4.91E-06	
	$T_1$ (s)	7.69	
	$1/\eta_0$ (Pa <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	1.62E-07	1.42E-07
	$\eta_0$ (Pa s)	6.17 E+06	7.04 E+06
	$J_2$ (Pa <sup>-1</sup> )	2.31E-05	
	$T_2$ (s)	4.71	
	$K_1$ (Pa s)		1.94E+05
	$(J_1+J_2), 1/K_2$ (Pa <sup>-1</sup> )	2.80E-05	3.03E-05
	$r^2$	0.979	0.974
3568	$J_0$ (Pa <sup>-1</sup> )	7.54E-05	8.03E-05
	$J_1$ (Pa <sup>-1</sup> )	1.32E-05	
	$T_1$ (s)	62.24	
	$1/\eta_0$ (Pa <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	9.99E-08	1.36E-07
	$\eta_0$ (Pa s)	1.00 E+07	7.35 E+06
	$J_2$ (Pa <sup>-1</sup> )	2.84E-05	
	$T_2$ (s)	3.58	
	$K_1$ (Pa s)		1.42E+05
	$(J_1+J_2), 1/K_2$ (Pa <sup>-1</sup> )	4.16E-05	3.26E-05
	$r^2$	0.978	0.964

Puede notarse, en la Figura 3, que las curvas de los geles de carragenina presentan una pendiente más pronunciada en la zona de flujo (final de la curva), representada por  $1/\eta_0$ , y una capacitancia instantánea ( $J_0$ ) menor que los geles de grenetina.

Cuadro 3. Parámetros de los modelos de Kelvin-Voigt generalizado con dos tiempos de retardo y simplificado para los geles de grenetina a los tres esfuerzos.

ESFUERZO (Pa)	MODELOS		
	PARAMETRO	KELVIN-VOIGT GENERALIZADO	SIMPLIFICADO
1529	$J_0$ (Pa <sup>-1</sup> )	1.096E-04	1.102E-04
	$J_1$ (Pa <sup>-1</sup> )	1.88E-05	
	$T_1$ (s)	14.06	
	$1/\eta_0$ (Pa <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	6.44E-08	1.83E-08
	$\eta_0$ (Pa s)	1.55 E+07	5.47 E+07
	$J_2$ (Pa <sup>-1</sup> )	1.20E-05	
	$T_2$ (s)	7.047	
	$K_1$ (Pa s)		3.031E+05
	$(J_1+J_2),$ $1/K_2$ (Pa <sup>-1</sup> )	3.07E-05	4.26E-05
	$r^2$	0.992	0.902
	2549	$J_0$ (Pa <sup>-1</sup> )	1.122 E-04
$J_1$ (Pa <sup>-1</sup> )		4.69E-06	
$T_1$ (s)		5.78	
$1/\eta_0$ (Pa <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )		3.53E-08	1.35E-08
$\eta_0$ (Pa s)		2.83 E+07	7.4E +07
$J_2$ (Pa <sup>-1</sup> )		1.76E-05	
$T_2$ (s)		2.62	
$K_1$ (Pa s)			8.85 E+04
$(J_1+J_2),$ $1/K_2$ (Pa <sup>-1</sup> )		2.22E-05	2.48E-05
$r^2$		0.964	0.933
3568		$J_0$ (Pa <sup>-1</sup> )	9.90E-05
	$J_1$ (Pa <sup>-1</sup> )	1.95E-05	
	$T_1$ (s)	3.29	
	$1/\eta_0$ (Pa <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	5.12E-08	2.65E-08
	$\eta_0$ (Pa s)	1.95 E+07	3.77 E+07
	$J_2$ (Pa <sup>-1</sup> )	3.76E-06	
	$T_2$ (s)	11.99	
	$K_1$ (Pa s)		9.45 E+04
	$(J_1+J_2), 1/K_2,$ (Pa <sup>-1</sup> )	2.33E-05	2.62E-05
	$r^2$	0.938	0.946

En los Cuadros 2 y 3 se presentan los parámetros obtenidos a partir de las curvas de capacitancia corregida con el modelo simplificado y de Kelvin-Voigt generalizado, para los geles de carragenina y grenetina. Se omitió el modelo de Burgers ya que en todos los casos el ajuste a éste fue pobre ( $r^2 < 0.8$ ). El ajuste al modelo de Kelvin-

Voigt generalizado y al modelo simplificado es similar en ambos geles. El hecho de haber obtenido valores de  $r^2$  entre 0.8 y 0.99, y no mayores, puede deberse a la fluctuación de los datos experimentales más que a un ajuste pobre a los modelos.

Ma y Barbosa (1997) en geles de xantana con iones (fuera de la zona lineal) y Gross y col.(1980) en geles de pectina de bajo metoxilo (en la zona lineal) reportan los parámetros de los modelos de Kelvin-Voigt generalizado, Burgers y Letherish, lo que muestra que el hecho de no estar en la zona lineal, no limita el uso de los modelos mencionados.

Al analizar el cambio de los parámetros por efecto del esfuerzo por medio de regresiones lineales (datos no mostrados), se observó lo siguiente. En los geles de carragenina, un aumento lineal de la viscosidad en la zona de flujo estacionario ( $\eta_0$ ) con un aumento en el esfuerzo ( $r^2=0.829$ ), puede ser interpretado como sugieren Purkayastha y col. (1985) para pulpa de papa, en el sentido de que la presión hidrostática interna se vuelve importante fuente de resistencia adicional a la deformación. En carragenina se observó también que por efecto del esfuerzo, la capacitancia máxima ( $r^2=0.997$ ) y la instantánea ( $r^2=0.973$ ), disminuyeron linealmente; este aumento de la resistencia a la deformación por efecto del esfuerzo puede atribuirse a la elevada sinéresis que presentan los geles. Nussinovitch y col. (1990b) para geles de gelana comentan que en pruebas de fluencia, la sinéresis actúa de dos formas, la primera liberando presión hidrostática, lo cual reduce la resistencia a la deformación y por otro lado, causa endurecimiento al aumentar la concentración efectiva de goma. El parámetro  $K_1$  (unidades de viscosidad), retarda la deformación instantánea de los elementos Kelvin, entre más alto es su valor, menor

es la deformación en la zona de retardo. En los geles de grenetina,  $K_1$  parece disminuir linealmente con el esfuerzo ( $r^2= 0.72$ ), esto lo interpretan Purkayastha y col. (1985) para queso cheddar como indicativo de un carácter de cedencia, entendido éste como un debilitamiento de la estructura por aumento del esfuerzo. Cabe aclarar, que las tendencias antes mencionadas deben tomarse como preliminares ya que sólo se manejaron tres niveles de esfuerzo. Para tener una mayor certeza de los efectos del esfuerzo y los mecanismos que dominan la deformación en cada material, se recomienda manejar más niveles de esfuerzo.

La capacitancia asintótica ( $1/K_2$ ) en ambos geles es similar a la suma de  $J_1+J_2$  (Cuadros 2 y 3). A excepción del menor esfuerzo,  $1/K_2$  es menor en grenetina que en carragenina, lo que implica una menor deformación en la zona de retardo en grenetina, congruente con lo observado en la Figura 3 y con los valores de  $J_r$  (%) en el Cuadro 4. La suma y el promedio de los dos tiempos de retardo para el modelo de Kelvin-Voigt generalizado fueron mayores para los geles de carragenina, denotando un mayor retardo de la deformación por efecto del elemento viscoso en paralelo con el elástico en la zona de retardo. Estos tiempos de retardo altos están asociados con una mayor viscosidad de los elementos newtonianos en paralelo con los elásticos en la zona de retardo para los geles de carragenina. La viscosidad de la zona de flujo es menor para los geles de carragenina (del orden de  $10^6$ ) que para los de grenetina (del orden de  $10^7$ ), lo cual implica una mayor deformación (y capacitancia) por efecto de esta parte del modelo en los geles de carragenina.

En el Cuadro 4 se presenta el porcentaje de contribución de los diferentes elementos del modelo de Kelvin-Voigt generalizado: capacitancia elástica instantánea  $J_0$ ;

capacitancia elástica total,  $J_{e0}$ ; capacitancia viscosa,  $J_v$  y capacitancia elástica retardada,  $J_r$  a la capacitancia máxima,  $J_m$ .

Cuadro 4. Porcentaje de contribución de los diferentes elementos del modelo de Kelvin-Voigt generalizado a la capacitancia máxima.

ESFUERZO INICIAL (Pa)	$J_0$ (%)	$J_{e0}$ (%)	$J_v$ (%)	$J_r$ (%)	$J_m$ (Pa <sup>-1</sup> )
<b>CARRAGENINA</b>					
1529	67.50	84.72	11.04	21.46	1.53E-04
2549	67.49	85.32	9.96	22.56	1.40E-04
3568	66.29	88.94	5.65	28.06	1.24E-04
<b>GRENETINA</b>					
1529	76.03	94.24	4.15	19.82	1.48E-04
2549	82.90	96.76	2.90	14.20	1.39E-04
3568	77.54	95.55	3.92	18.53	1.28E-04

Puede notarse que en ambos geles, la contribución de la capacitancia elástica expresada por  $J_0$  (capacitancia elástica instantánea) y  $J_{e0}$  (capacitancia elástica total) predomina sobre la viscosa, pero esto es más marcado en los geles de grenetina, (arriba del 90%). La capacitancia viscosa contribuye en menor magnitud pero esta contribución es más importante para los geles de carragenina (5-11%), lo cual puede notarse en la Figura 3a por la pendiente mas pronunciada para los geles de carragenina. La contribución de la capacitancia elástica retardada es también mayor para carragenina. Lo antes descrito indica que los geles de grenetina son más sólidos que los de carragenina a pesar de tener una capacitancia máxima muy similar.

## RELAJACION

En la Figura 4 (a y b) se presentan las curvas de esfuerzo aparente y esfuerzo corregido en función del tiempo para los geles de carragenina y grenetina a los tres niveles de deformación impuestos. Puede notarse que el esfuerzo corregido es menor que el esfuerzo aparente y que la diferencia entre éstos se acentúa al aumentar el nivel de deformación impuesto, lo cual es congruente con el hecho de que el área de contacto aumenta con la deformación, ocasionando una disminución del esfuerzo, mayor, entre mayor es el área de contacto. Al aumentar el nivel de deformación aumentaron el esfuerzo y módulo de relajación y se observa mayor esfuerzo inicial para los geles de grenetina, lo cual no necesariamente es indicativo de geles más duros, ya que es probable que la relajación más rápida en carragenina impida tener acceso al módulo inicial si el tiempo en que se toma el primer dato es menor al menor tiempo de relajación. Con el esfuerzo corregido se calculó el módulo de relajación ( $E$ ), en función del tiempo. En la Figura 5 se presentan las curvas experimentales de relajación para carragenina y grenetina así como las curvas calculadas obtenidas al ajustar a los modelos de Maxwell con dos tiempos de relajación (grenetina) y Maxwell generalizado (carragenina). Puede notarse que el hecho de que las curvas no se sobrepongan indica que no se tuvo acceso a la zona de viscoelasticidad lineal. Peleg (1979), Hermansson (1982) y Nussinovitch y col. (1990a y b) realizaron pruebas de relajación fuera de la zona de viscoelasticidad lineal en diferentes productos, incluyendo geles, y ajustaron al modelo empírico de la ecuación 4. Hermansson (1982) encontró cambios congruentes en los parámetros de relajación  $a$  y  $b$ , a diferentes niveles de deformación y Nussinovitch (1996a y b) observó una marcada disminución del módulo asintótico por efecto del aumento del nivel de deformación en geles de agar, carragenina y gelana. Safari-Ardi y Phan-

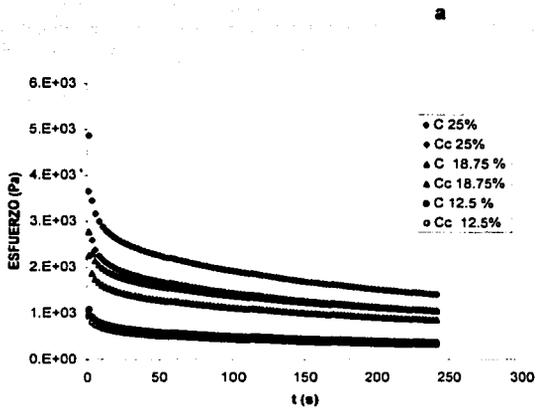


Figura 4. Esfuerzo aparente (C y G) y esfuerzo corregido (Cc y Gc) para gels de carragenina (a) y gretetina (b), a los tres niveles de deformación (12.5, 18.75 y 25%).

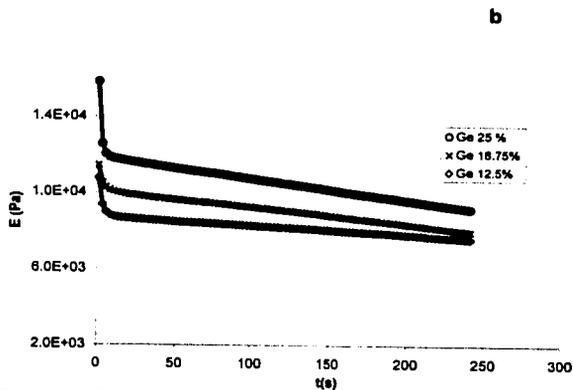
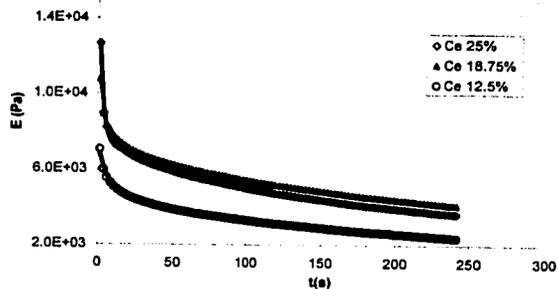


Figura 5. Módulo de relajación experimental (figuras) y calculado (línea continua) para geles de carragenina (a) y gretetina (b) a las diferentes deformaciones (12.5, 18.75 y 25%). Ce, carragenina; Ge, gretetina

Thien (1998) en pruebas de cizalla oscilatoria y relajación observaron que en ambas, en la zona de viscoelasticidad lineal, no fue posible detectar diferencias debidas al origen del trigo, mientras que fuera de la zona lineal, el efecto fue evidente. Lo anterior indica que aún fuera de la zona de viscoelasticidad lineal, las pruebas son útiles para analizar el efecto causado por diferentes variables.

En la Figura 5 puede notarse que para las curvas de carragenina, el módulo de relajación inicial es menor que para las de gnetina y que aparentemente las primeras alcanzan el valor asintótico. Las curvas de gnetina presentan una caída pronunciada al inicio, seguida de una caída aparentemente lineal sin alcanzar, en el tiempo experimental, un valor asintótico.

En el Cuadro 5 se presentan los parámetros obtenidos al ajustar las curvas de relajación a los modelos empíricos (ecuaciones 2 y 4). El módulo de relajación inicial fue mayor para gnetina a todas las deformaciones, lo que se interpreta como mayor dureza del gel. Al aumentar la deformación aumentó el módulo inicial para ambos geles.

Cuadro 5. Parámetros de los modelos empíricos (ecuaciones 2 y 4).

PARAMETROS	CARRAGENINA			GNETINA		
	Deformación (%)					
	12.5	18.75	25.0	12.5	18.75	25.0
Módulo inicial (Pa)	7 057.8	10 789.6	12 660.4	10 770.0	11 441.2	15 841.1
a	0.71	0.66	0.74	0.45	0.33	0.43
b (1/s)	0.036	0.037	0.054	0.011	0.018	0.038
Módulo asintótico (Pa)	2314.71	4467.68	4288.75	8626.96	9395.60	11885.27
Pérdida máxima de esfuerzo (%)	69.84	61.81	71.07	29.38	30.25	42.05
$k_1$ , 1/ab (s)	38.77	41.02	24.89	206.54	165.03	59.84
$k_2$ , 1/a (-)	1.40	1.51	1.34	2.20	3.00	2.29
1/b (s)	27.65	27.20	18.56	93.89	54.89	26.16
1-a (-)	0.29	0.34	0.25	0.54	0.67	0.56
1/k <sub>1</sub> (1/s)	0.026	0.024	0.040	0.005	0.006	0.017

El valor de  $a$  representa el nivel de caída de esfuerzo ( $1 \leq a \leq 0$ ), si  $a=0$ , el material es puramente elástico y si  $a=1$ , es puramente viscoso. Los geles de gretina presentaron, a todos los esfuerzos, valores de  $a$  menores que los de carragenina, indicando su carácter más sólido. El valor de  $b$  representa la velocidad a la cual el esfuerzo se relaja, obteniéndose valores más altos para los geles de carragenina, los cuales se relajaron más rápidamente.

Los geles de gretina mostraron valores más altos para el módulo asintótico y menor pérdida máxima de esfuerzo (%), en comparación con los geles de carragenina, reafirmando un mayor predominio del comportamiento sólido en los primeros. El valor de  $k_2$  (adimensional) está relacionado con el nivel de relajación, si  $k_2=1$ , se tiene una relajación completa (líquido viscoelástico); valores de  $k_2 > 1$  indican una mayor tendencia al comportamiento sólido como es el caso de todos los geles estudiados; los geles de gretina a todos los esfuerzos presentaron un mayor valor de  $k_2$ . Los parámetros  $1/b$  y  $k_1$  son una medida del tiempo de relajación, los geles de gretina presentaron valores de  $1/b$  y  $k_1$  mayores que los de carragenina a todos los esfuerzos, reafirmando el carácter más sólido de los geles de gretina. En ambos geles estos parámetros disminuyen al aumentar el porcentaje de deformación, evidenciando menor elasticidad, congruente con el aumento de la velocidad inicial de relajación. Nussinovitch y col. (1990b) encontraron una disminución de  $k_1$  al aumentar el porcentaje de deformación en geles de agar, carragenina y gelana, similar al observado en este estudio para los geles de gretina. El aumento de la deformación ocasionó un incremento en  $b$  (medida de la velocidad de relajación), indicando que los geles tienden a presentar menor

elasticidad cuando se someten a deformaciones altas debido a cambios irreversibles en la estructura interna del material (Peleg, 1979). El valor de  $a$ , no presentó una tendencia de cambio clara por efecto del aumento del porcentaje de deformación. El módulo asintótico aumentó con la deformación, lo cual no está de acuerdo con lo reportado por Nussinovitch y col. (1990a y b) para geles de gelatina, agar y carragenina, que observaron una disminución del módulo asintótico por efecto del aumento de deformación, y lo atribuyen al carácter de cedencia de los geles. En el caso de los geles de carragenina y grenetina, la máxima pérdida de esfuerzo (relación porcentual de la pérdida de esfuerzo al tiempo máximo de relajación sobre el esfuerzo inicial) puede relacionarse con el carácter de cedencia y, su aumento con la deformación, ser equivalente a la disminución del módulo asintótico observada por Nussinovitch y col.

En el Cuadro 6 se presentan los parámetros obtenidos al ajustar las curvas de relajación de los geles de carragenina al modelo de Maxwell generalizado con dos tiempos de relajación. Puede notarse que al aumentar el nivel de deformación, aumentan los módulos de relajación,  $E_1$  y  $E_2$ , y el módulo asintótico ( $E_a$ ), coincidiendo con la magnitud y tendencias de los datos del módulo asintótico obtenido con los modelos empíricos (Cuadro 5). Este aumento indica una percepción de mayor firmeza. Los tiempos de relajación ( $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ ) disminuyeron al aumentar el nivel de deformación, lo que es indicativo de que los geles tienden a ser más fluidos (carácter de cedencia).

**Cuadro 6. Parámetros del modelo de Maxwell generalizado para geles de carragenina (ecuación 1).**

Parámetro	DEFORMACIÓN (%)		
	12.5	18.75	25.0
$E_1$ (Pa)	2.51 E+03	4.06 E+03	8.39 E+03
$\lambda_1$ (s)	6.98	4.43	2.43
$E_2$ (Pa)	2.95 E+03	4.01 E+03	4.25 E+03
$\lambda_2$ (s)	158.18	131.17	106.67
$E_a$ (Pa)	1.73 E+03	3.54 E+03	3.30 E+03
$r^2$	0.996	0.996	0.996

Las curvas de relajación de los geles de grenetina dieron un buen ajuste al modelo de Maxwell con dos tiempos de relajación (en Curve Expert 1.3) pero los valores de los parámetros no resultaron congruentes, (lo que es común cuando se utilizan programas matemáticos comerciales) por lo que no se reportan ni se discuten.

Aun cuando la historia de deformación en fluencia y relajación es diferente, Nussinovitch y col. (1990b) compararon los parámetros de equilibrio de estas pruebas (capacitancia y módulo asintótico) y encontraron que guardan cierta similitud presentando ambos la tendencia de disminuir con el esfuerzo. Cabe aclarar que la comparación hecha por Nussinovitch y col. (1990b) fue solamente gráfica utilizando dos niveles de deformación. En nuestro caso, comparamos el módulo asintótico ( $E_a$ ) en función de la deformación en relajación ( $\epsilon$ ) y el inverso de la capacitancia asintótica ( $1/J_a$ ) en función de la deformación al inicio de la zona lineal en fluencia ( $\epsilon_i$ ); esto pudo efectuarse ya que la deformación en relajación y la deformación al inicio de la zona lineal en fluencia son del mismo orden de magnitud (Figuras 6a y 6b). Tanto el módulo asintótico como el inverso de la capacitancia asintótica

aumentan con el nivel de deformación; la correlación, aún cuando no es muy alta, es mayor para el módulo asintótico y las pendientes para los dos geles son similares, mientras que para el inverso de la capacitancia asintótica, las correlaciones son más bajas y las pendientes diferentes.

En la Figura 7 se presenta la relación entre el módulo residual y la deformación en relajación, donde se aprecia que para grenetina tiene pendiente negativa, hecho que puede considerarse equivalente a lo encontrado por Nussinovitch y col. (1990a y b) en relación con la disminución del módulo asintótico al aumentar la deformación para geles de agar, carragenina y gelana y que atribuyen al debilitamiento de la estructura (carácter de cedencia). Para carragenina, el esfuerzo residual parece ser independiente de la deformación, en este caso, la mayor concentración de carragenina (2.28%) que la empleada por Nussinovitch (1990b) puede dar una mayor resistencia al debilitamiento.

En la Figura 8 se presenta la relación entre el módulo asintótico y el inverso de la capacitancia asintótica, donde se observa que al disminuir el módulo asintótico, disminuye el inverso de la capacitancia asintótica. Para carragenina se obtuvo una mayor correlación (0.89,) mientras que para grenetina fue muy baja (0.34). Los resultados aquí encontrados son contrarios a los de Nussinovitch y col. (1990a) en geles de gelana. Un estudio con más niveles de deformación y esfuerzo permitiría confirmar o descartar las observaciones anteriores, dado que en general, las correlaciones son bajas. La interpretación de esta relación en términos estructurales es interesante de determinar y requiere de un estudio más amplio, con más niveles de variación de la deformación y el esfuerzo.

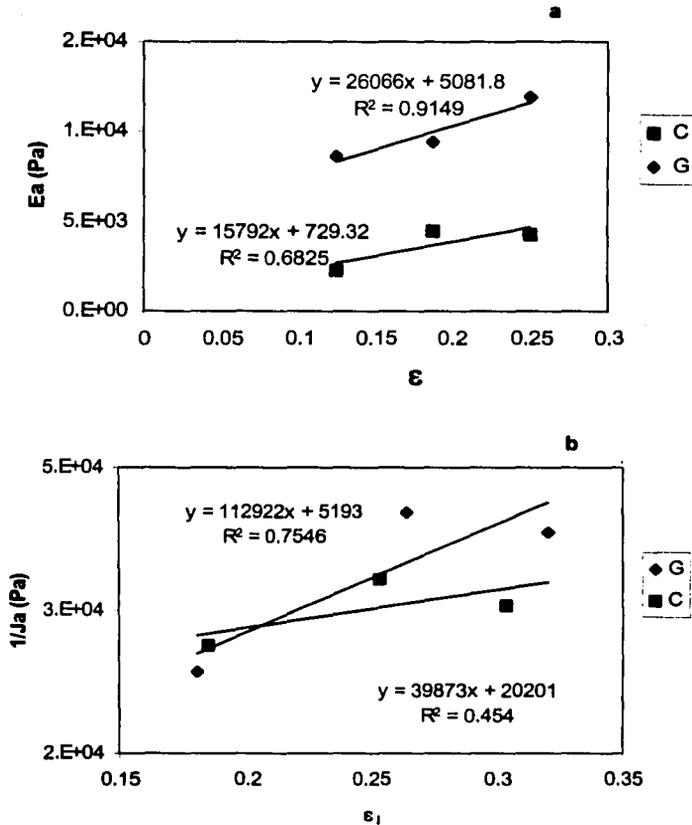


Figura 6. (a) Relación entre el módulo asintótico y la deformación (C, carragenina; G, grenetina). (b) Relación entre el inverso de la capacitancia asintótica y la deformación al inicio de la zona lineal (G, grenetina; C, carragenina).

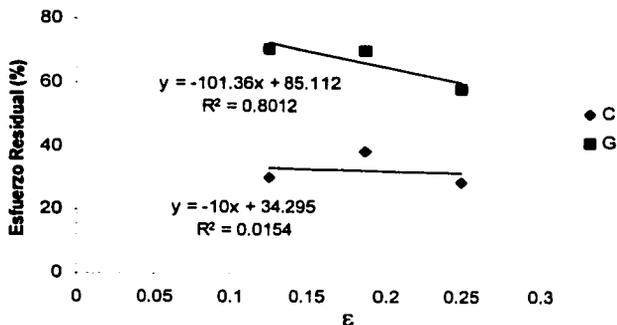


Figura 7. Relación entre el esfuerzo residual y la deformación (G, grenetina; C, carragenina)

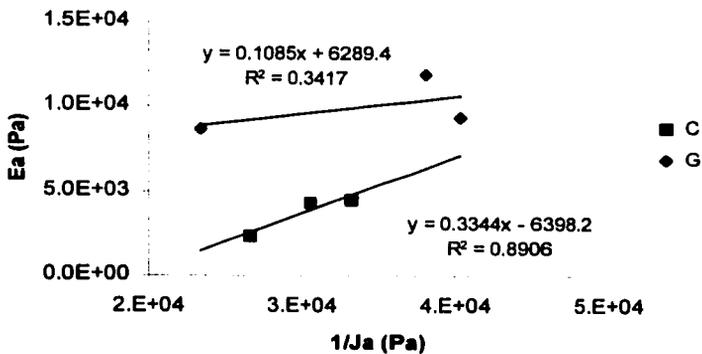


Figura 8. Relación entre el módulo asintótico y el inverso de la capacitancia asintótica (C, carragenina; G, grenetina).

## CONCLUSIONES

Las pruebas se efectuaron fuera de la zona de viscoelasticidad lineal, lo cual se refleja en la dependencia de varios de los parámetros con el esfuerzo y la deformación. Aun así, el estudio fue de utilidad pues mostró diferencias importantes en el comportamiento reológico de los geles. Ambas pruebas revelaron que los geles de grenetina son más elásticos, a través de una mayor capacitancia instantánea, menores tiempos de retardo, menor deformación de los elementos de retardo y viscosos del modelo de Kelvin-Voigt generalizado en las pruebas de fluencia así como mayor módulo asintótico y esfuerzo residual, mayores tiempos de relajación y menores valores de  $a$  en pruebas de relajación. La fragilidad de los geles de carragenina puede atribuirse a su menor elasticidad. Los resultados son de utilidad para la aplicación de estos gelificantes en diferentes productos alimenticios en función de la respuesta reológica deseada. Aun cuando ya existe cierta información sobre propiedades texturales y reológicas, estos resultados comparativos bajo las mismas condiciones aportan información adicional. Estudios de este tipo pueden utilizarse para evaluar el efecto de otras variables como pH, sales, azúcar, y las interacciones con otros ingredientes, así como para la gran potencialidad que representa el uso de mezclas de polisacáridos. Es recomendable relacionar los resultados de estas pruebas con pruebas texturales (perfil de textura, dureza) y con otras reológicas y sensoriales. Se sugiere efectuar pruebas con más niveles de esfuerzo y deformación y en la zona lineal y medir en forma paralela otras propiedades como sinéresis, que permitan interpretar más a fondo los cambios en la estructura causados por los procesos de deformación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anónimo. 1992. Gellan gum. A multi-functional polysaccharide for gelling and texturizing. Boletín técnico. Kelco, Inc. San Diego, Cal.
- Casas-Alencáster, N y Gómez-Chávez, A. 2001. Development of a program for the calculation of viscoelastic parameters in creep test using the Kelvin-Voigt generalized model. Proceedings of the Eighth International Congress on Engineering and Food. Technomic Pub. Co. II. pp 1767-1771.
- Doublier, J.L., Launay, B. y Cuvelier, G.1992. Viscoelastic properties of food gels. en: M.A. Rao, y J.F. Steffe. (eds). *Viscoelastic properties of foods*. Elsevier Applied Science. Londres. pp 371-423.
- Gross, M.O., Rao, V.N.M. y Smit, C.J.B.1980. Rheological characterization of low-methoxyl pectin gel by normal creep and relaxation. *J. Texture Stud.* **11**: 271-290.
- Guo, Z., Castell-Pérez, M.E. y Moreira, R.G. 1999. Characterization of masa and low moisture corn tortilla using stress relaxation methods. *J. Texture Stud.* **30**:197-215.
- Hermansson, A.M. 1982. Gel characteristics-structure as related to texture and waterbinding of blood plasma gels. *J. Food Sci.* **47**:1966-1972.
- Lau, M.H., Tang, J., y Paulson, A.T. 2000. Texture profile and turbidity of gellan/gelatin mixed gels. *Food Res. Int.* **33**:665-671.
- Ma. L. y Barbosa-Cánovas, G.V.1997. Viscoelastic properties of xanthan gels interacting with cations. *J. Food Sci.* **62** (6):1124-1128.
- Mitchell, J.R. 1976. Rheology of gels. *J. Texture Stud.* **7**:313-39.
- Nussinovitch, A., Kaletunc, G., Normand, M.D. y Peleg, M. 1990b. Recoverable work versus asymptotic relaxation modulus in agar, carrageenan and gellan gels. *J. Texture Stud.* **21**:.427-438.
- Nussinovitch, A., Normand, M.D. y Peleg, M.1990a. Characterization of gellan gels by uniaxial compression, stress relaxation and creep. *J. Texture Stud.* **21**:.39-49.

- Papageorgiou, M. y Kasapis, S. 1995. The Effect of added sucrose and corn syrup on the physical properties of gellan-gelatin mixed gels. *Food Hydrocoll.* **9**(3):211-220.
- Peleg, M. 1979. Characterization of the stress relaxation curves of solid foods. *J. J. Food Sci.* **44**:277-81.
- Purkayastha, S., Peleg, M., Johnson, E.A. y Normand, M.D. 1985. A computer aided characterization of compressive creep behavior of potato an cheddar cheese. *J. Food Sci.* **50**:45-50.
- Rao, M.A., Kash, S.F., Cooley, H.J. y Barnard J. 1987. Deskstop computer based collection and analysis of creep-compliance data on fluid foods. *J. Texture Stud.* **18**:405-413.
- Rao, V.N.M. 1992. Classification, description and measurement of viscoelastic properties of solid foods. en: M.A. Rao, y J.F. Steffe. (eds). *Viscoelastic properties of foods*. Elsevier Applied Science. Londres. pp 3-47.
- Ross-Murphy, S. 1995. Structure-property relationships in food biopolymer gels and solutions. *J. Rheol.* **39**(6):1451-1463.
- Safari-Ardi, M. y Phan-Thien, N. 1998. Stress relaxation and oscillatory tests to distinguish between doughs prepared from wheat flours of different varietal origin. *Cereal Chem.* **75** (1):80-8.
- Whorlow, R.W. 1980. *Rheological Techniques*. Ellis, Horwood. Chichester, U.K.