



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**“MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES REOLÓGICAS DE UNA
BEBIDA LACTEA FERMENTADA ADICIONADA CON FIBRA
SOLUBLE DE JICAMA (*Pachyrhizus erosus*)”**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

PRESENTA:

LAURIANO RAMOS SOLÍS



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

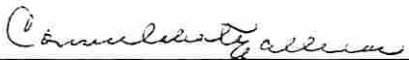


NOVIEMBRE, 2008
Chapingo, Estado de México

**MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES REOLÓGICAS DE UNA
BEBIDA LACTEA FERMENTADA ADICIONADA CON FIBRA
SOLUBLE DE JICAMA (*Pachyrhizus erosus*)**

Tesis realizada por **Lauriano Ramos Solís** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
AGROALIMENTARIA**

DIRECTORA: 
DRA. CONSUELO LOBATO CALLEROS

ASESOR: 
DRA. CECILIA BEATRIZ PEÑA VALDIVIA

ASESOR: 
M.C. ELEAZAR AGUIRRE MANDUJANO

AGRADECIMIENTOS

A Dios sobre toda las cosas.

A mis padres y hermanos gracias por todo ese apoyo, confianza y por todas esas enseñanzas a lo largo de mi vida.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero otorgado a través de la beca en la Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria de la Universidad Autónoma Chapingo la cual forma parte del Padrón Nacional de Posgrado del CONACYT.

A la Dra. Consuelo S.O. Lobato Calleros por su valiosa incondicional apoyo, sus excelentes contribuciones y por su acertada dirección en la presente investigación.

A la Bióloga Yolanda Ornelas Uribe, del Instituto de Limnología y Ciencias del Mar de la Universidad Nacional Autónoma de México, por toda su colaboración incondicional, su valioso apoyo y tiempo ocupado en el desarrollo y análisis de las microscopías electrónicas de barrido.

A la M.C. Ana y a la M.C Maira por su ayuda y asesoría para la determinación de los polisacáridos presentes en la jicama; así como para la obtención de la fibra soluble utilizada en esta investigación.

A la M.C Ofelia Sandoval y al M.C. Cesar Ramírez por su valiosa ayuda y asesoría en la parte este proyecto.

A Sra. Victoria Herdez, por su apoyo y sugerencias en el trabajo de laboratorio durante el desarrollo de este trabajo.

A mis mejores amigos Jorge Méndez Corral, Alfonso Tena Avalos, Jonnathan Benítez González, Ricardo Lozano Sandoval, Luis A. Aparicio García, Mario Medina Cristales, y Mariel P. Buendía Tamariz, por su valiosa amistad, y por su apoyo durante la realización de esta investigación.

A todas aquellas personas que de alguna manera han compartido conmigo pequeños o grandes momentos de mi vida y a las que de algún modo hicieron posible la realización de esta investigación.

Sinceramente:
Lauriano

DEDICATORIA

A mis padres Lauriano y Adela que son las personas que más amo y respeto en la vida, como respuesta al amor, apoyo, confianza, enseñanza, consejos y dedicación que he recibido a lo largo de mi vida y por brindarme la oportunidad de seguir logrando mis convicciones.

A mis hermanos Yuri Alberto, Luz Airely, Ligia Isela, María de los Ángeles como muestra clara de que su amor, sus enseñanzas y consejos fueron fundamentales para poder llegar al logro de otra de mis grandes metas.

En especial a mi hermana María de los Angeles por su amor, confianza, comprensión, apoyo y por todo lo que hemos vivido y compartido juntos durante cada etapa de nuestras vidas, te amo hermana eres lo máximo.

A mis sobrinos José Alberto, Francisco Edwin, Itzel, Carlos Eduardo, Abril Montserrat, Yuri Alberto, Gherson Eduardo, Perla Mayetsi, Danna Irany y Diego por complementar mi vida de alegría y entusiasmo y por ser un gran motor de impulso para seguir siempre adelante.

Sinceramente:
Lauriano

DATOS BIOGRÁFICOS

Lauriano Ramos Solís, realizó sus estudios de licenciatura en el Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Autónoma Chapingo. De manera profesional ha trabajado en el área de control de calidad y proceso de la industria del papel y en la industria de las bebidas gaseosas y energéticas. Ha tomado cursos en reología, textura y determinación de polisacáridos en el área de alimentos.

MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES REOLÓGICAS DE UNA BEBIDA LÁCTEA FERMENTADA ADICIONADA CON FIBRA SOLUBLE DE JÍCAMA (*Pachyrhizus erosus*)

MICROSTRUCTURE AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF A FERMENTED LACTIC BEVERAGE CONTAINING SOLUBLE JICAMA FIBER (*Pachyrhizus erosus*)

Ramos Solís Lauriano
Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria.
Universidad Autónoma Chapingo

Bajo la dirección de la Dra. Consuelo Lobato Calleros

RESUMEN

Se investigaron las contribuciones reológicas y estructurales de fibra soluble de jícama en bebidas lácteas fermentadas (LB). Los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') como una función de la deformación (%), el comportamiento de flujo, sinéresis y micrografías electrónicas de barrido de una LB conteniendo fibra soluble de jícama ($BL_{FJ1.0}$) y una LB sin la adición de fibra (BL_{CSF}) fueron determinados. La bebida BL_{CSF} exhibió valores más elevados de G' y G'' en la región viscoelástica lineal, en comparación con aquellos exhibidos por la bebida $BL_{FJ1.0}$. El comportamiento de flujo de las bebidas fue descrito por el modelo de Herschel-Bulkley. La adición de fibra soluble de jícama resultó en una bebida $LB_{FJ1.0}$, cuya estructura estuvo formada por agregados de micelas de caseína cubiertos con estructuras fibrosas atribuidas a los componentes de la fibra soluble de jícama, la cual mostró mayor carácter pseudoplástico y consistencia, pero menor esfuerzo de fluencia que la estructura originada en la bebida BL_{CSF} . Esta última constituida por agregados de micelas de caseína más compactos que los observados en la bebida $BL_{FJ1.0}$. La fibra soluble de jícama redujo el nivel de sinéresis de la LB.

Palabras claves: reología, bebida láctea fermentada, fibra soluble, jícama

ABSTRACT

The structural and rheological contributions of soluble jicama fiber in fermented lactic beverage (LB) were investigated. The storage (G') and loss (G'') moduli as a function of strain (%), flow behavior, syneresis, and scanning electron micrographs of a fermented lactic beverage containing soluble jicama fiber ($BL_{FJ1.0}$) and of a control fermented lactic beverage without added fiber (BL_{CSF}) were determined. The BL_{CSF} beverage exhibited higher G' and G'' values in the linear viscoelastic region in comparison with those exhibited by the $BL_{FJ1.0}$ beverage. The flow behavior of the beverages was described using the Herschel-Bulkley model. Added soluble jicama fiber resulted in a $LB_{FJ1.0}$ beverage whose structure was formed by casein micelles aggregates covered with fibrous structures attributed to the soluble jicama fiber components, which showed higher pseudoplastic character and consistency, but lower yield stress than the structure originating in the BL_{CSF} beverage. The latter had more compact casein micelle aggregates than those observed in the $LB_{FJ1.0}$. The soluble jicama fiber reduced the syneresis level of the fermented lactic beverages.

Key words: rheology, fermented lactic beverage, soluble fiber, jicama

CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
DATOS BIOGRÁFICOS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEORICO	4
2.1 La jícama	4
2.1.1 Origen y distribución de la planta	4
2.1.2 Especies botánicas	5
2.1.3 Nombres comunes	5
2.1.4 Importancia del cultivo	6
2.2 Fibra alimentaria	9
2.2.1 Tipos de fibras	11
2.2.2 Constituyentes más importantes de la fibra soluble	13
2.2.2.1 Pectinas	13
2.2.2.2 Hemicelulosas.....	15
2.2.3 Propiedades de la fibra dietetica en bebidas lácteas.....	16
2.2.4 Aplicaciones de la fibra en la industria alimentaria	18
2.3 Bebidas lácteas fermentadas.....	19
2.3.1 Principales problemas que presentan las leches fermentadas	21
2.4 Arreglo microesrtructural de las bebidas lácteas fermentadas.....	22
2.5 Comportamiento mecánico de las bebidas lácteas fermentadas.....	23
2.6 Evaluación sensorial	24
2.6.1 Prueba triangular	26
3. BIBLIOGRAFIA.....	28

CAPITULO I. MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES REOLÓGICAS DE UNA BEBIDA LACTEA FERMENTADA ADICIONADA CON FIBRA SOLUBLE DE JÍCAMA (PACHYRHIZUS EROSUS).....	33
1. INTRODUCCIÓN.....	35
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
2.1 Extracción y purificación de fibra soluble e insoluble de jícama (Pachyrhizus erosus) variedad Morelos	38
2.2 Determinación del índice de metoxilo de la pectina de jícama	44
2.3 Proceso de elaboración de las bebidas lácteas fermentadas.....	44
2.4 Determinación de la microestructura de la jícama y de las bebidas lácteas fermentadas.....	46
2.5 Determinación de las propiedades reológicas de las bebidas lácteas fermentadas	49
2.6 Evaluación sensorial de las bebidas lácteas fermentadas.....	50
2.7 Análisis de datos.....	50
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
3.1 Contenidos de fibra soluble e insoluble de la jícama.....	51
3.2 Grado de metilación (índice de metoxilo) de la pectina de jícama.....	54
3.3 Microestructura de la jícama	54
3.4 Composición química de las bebidas lácteas fermentadas	56
3.5 Microestructura de las bebidas lácteas	60
3.6 Comportamiento reológico de las bebidas lácteas	65
3.6.1 Barrido de amplitud.....	65
3.6.2 Comportamiento de flujo.....	70
3.7 Evaluación sensorial.....	78
4. CONCLUSIONES.....	78
5. BIBLIOGRAFIA.....	81

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Principales hortalizas cultivadas en México de acuerdo a la superficie cultivada (miles de ha).....	7
Cuadro 2. Principales estados productores de jícama en México de acuerdo a la superficie cultivada (ha).....	8
Cuadro 3. Principales estados productores de jícama en México de acuerdo al volumen de producción (miles de ton).....	8
Cuadro 4. Rendimiento en el cultivo de jícama (ton ha^{-1}) en los principales estados productores de nuestro país.	9
Cuadro 5. Principales defectos que se presentan en las leches fermentadas.....	21
Cuadro 6. Contenidos de fibra dietética total, fibra insoluble y fibra soluble (medias $\pm$ desviación estándar) en jícama.	52
Cuadro 7. Composición química y grado de sinéresis (medias $\pm$ desviación estándar) de las bebidas lácteas fermentadas.....	58
Cuadro 8. Valores de módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\tan \delta$) ($\pm$ desviación estándar) de las bebidas lácteas fermentadas durante el tiempo de almacenamiento	68
Cuadro 9. Valores medios ($\pm$ desviación estándar) de los términos del modelo de Herschel – Bulkley que obedecieron las bebidas lácteas fermentadas.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Extracción y purificación de pectina de jícama (<i>Pachyrhizus erosus</i>).....	40
Figura 2. Extracción y purificación de hemicelulosas débilmente unidas de jícama (<i>Pachyrhizus erosus</i>).	41
Figura 3. Extracción y purificación de hemicelulosas fuertemente unidas de jícama (<i>Pachyrhizus erosus</i>).	42
Figura 4. Extracción y purificación de celulosas de jícama (<i>Pachyrhizus erosus</i>).....	43
Figura 5. Proceso de elaboración de las bebidas lácteas.....	48
Figura 6. Micrografías Electrónicas de barrido del corte transversal de jícama (<i>Pachyrhizus erosus</i>) liofilizada.	56
Figura 7. Micrografía electrónica de barrido de la bebida control BL _{CSF} Magnificación 1 000x, barra de escala = 10µm.....	61
Figura 8. Micrografía electrónica de barrido de la bebida control BL _{CSF} , Magnificación 5 000x, barra de escala = 5µm.....	62
Figura 9. Micrografía electrónica de barrido de la bebida control BL _{FJ1.0} , Magnificación 1 000x, barra de escala = 10µm.....	64
Figura 10. Micrografía electrónica de Barrido de la bebida control BL _{FJ1.0} , Magnificación 5 000x, barra de escala = 5µm.....	64
Figura 11. Comportamiento del módulo de almacenamiento (G') (curvas con figuras ■, ● y aquellas rellenas de color negro) y del módulo de pérdida (G'') (curvas con figuras □, ○ y aquellas sin relleno) de las bebidas lácteas fermentadas en función de la deformación, al día uno, siete y catorce de almacenamiento.	67
Figura 12. Comportamiento de Tan δ de las bebidas lácteas fermentadas en función de la deformación, al día uno, siete y catorce de almacenamiento.....	69
Figura 13. Comportamiento del esfuerzo cortante (σ) en función de la velocidad de cizalla (γ), de las bebidas lácteas, al día uno, siete y catorce de elaboradas.....	71
Figura 14. Comportamiento de la viscosidad aparente (Pa.s) en función de la velocidad de cizalla (γ), de las bebidas lácteas al día uno, siete y catorce de elaboradas	72

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ADA - Asociación Americana de la Dieta

BAL- Bacterias ácido lácticas

BL_{FJ1.0} - Bebida láctea fermentada con el 1% fibra soluble de jícama

BL_{CSF} - Bebida láctea fermentada exenta de fibra soluble de jícama

FA - Fibra alimentaria

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations

FI - Fibra insoluble en agua

FS - Fibra soluble en agua

INIAP - Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias

MEB - Microscopía Electrónica de Barrido

mEB - microscopio electrónico de barrido

PD - Polisacáridos disponibles para el organismo

PND - Polisacáridos no disponibles para el organismo

PSG - Polisacáridos glicémicos

PSNG - Polisacáridos no glicémicos

SAGARPA - Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación

SEMARNAT - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SIACON - Sistema de Información Agropecuaria de Consulta

USDA - Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América

I. INTRODUCCIÓN

La fibra de los alimentos apoya la conservación de la salud y la prevención de enfermedades en los seres humanos. Diversos estudios epidemiológicos han establecido que existe una relación entre el consumo de fibra de los alimentos y la reducción de riesgo de varias enfermedades crónicas, incluyendo cáncer de colon, enfermedades cardiovasculares, obesidad, diabetes, diverticulosis de colon y constipación, entre otras (Ascherio y Willet, 1995; Kim, 1995; Schneeman, 1999). Dietas altas en fibra generalmente reflejan un estilo de vida más saludable; sin embargo, mundialmente la ingesta de fibra es menor respecto a la cantidad recomendada de 38 g para los hombres y 25 g para las mujeres (Trumbo *et al.*, 2002; Beristain *et al.*, 2006). Incrementos del consumo de fibra ha sido un reto difícil, ya que las fuentes de fibra comúnmente usadas en la formulación y preparación de alimentos enriquecidos con fibra, no contribuyen a mejorar el sabor y propiedades texturales (Beristain *et al.*, 2006). Es importante entonces, que los ingredientes con altos contenidos en fibra utilizados en la obtención de alimentos fortificados o enriquecidos con este componente, sino que también exhiban ciertas propiedades funcionales que mejoren la calidad de esos alimentos (Tungland and Meyer, 2002). La fibra dietética ha sido definida por la American Association of Cereal Chemist (2001), como la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado de los seres humanos, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso. La fibra dietética incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y algunas otras

sustancias asociadas a las plantas (Tungland y Meyer, 2002). La fibra está presente en todas las plantas que son ingeridas como alimentos, incluyendo frutas, hortalizas, granos y legumbres; sin embargo, sus composición varía con la fuente; así la celulosa es más abundante en los granos de cereales, mientras que las pectinas son constituyentes importantes de la fibra proveniente de frutas, papa y betabel (Grain, 2006). Las diferencias en composición de la fibra son importantes al considerar las propiedades funcionales de los alimentos preparados industrialmente, puesto que durante el procesamiento los componentes de la fibra pueden interaccionar con aquellos originalmente contenidos en el alimento y modificar el sabor y textura (Sendra *et al.*, 2008). Para obtener alimentos con mayor calidad se sugiere usar fibras obtenidas de vegetales distintos a los convencionalmente usados, de esta manera se contribuirá a una mayor diversidad de propiedades funcionales en los alimentos enriquecidos con fibra. En este estudio la fuente no convencional de fibra, que se está proponiendo es la jícama (raíz modificada de las plantas de la especie *Pachyrhizus erosus*).

Las bebidas lácteas fermentadas son consideradas benéficas para la salud debido a la acción de sus bacterias viables; son pobres en fibra, por lo que se propone enriquecerlas con este componente para incrementar su valor alimenticio. Además, los componentes de la fibra pueden prevenir la agregación de la proteína de estas bebidas durante su vida de anaquel, debida a la inestabilidad de las caseínas en el pH entre 3.4 y 4.6 (Nakamura *et al.*, 2006). El enriquecimiento de un alimento requiere diversas evaluaciones para conocer

la influencia de la incorporación de los nuevos constituyentes al alimento. Este es el caso de un producto de leche fermentada, que aquí se propone enriquecer con fibra, y conocer sus características mecánicas, sensoriales y conocer estabilidad. Con base en lo antes expuesto, el objetivo de este trabajo fue conocer las modificaciones en la microestructura y las características reológicas debidas a la adición de fibra soluble de jícama (*Pachyrhizus erosus*) en una bebida láctea fermentada; así como la relación entre el arreglo estructural generado entre los componentes de la bebida láctea con sus propiedades reológicas.

2. MARCO TEORICO

2.1 La jícama

2.1.1 Origen y distribución de la planta

La jícama (*Pachyrhizus erosus*) es una hortaliza originaria de México y América Central, y su parte más importante es la raíz tuberculosa (Sorensen, 1996). La jícama fue introducida y cultivada muy ampliamente en trópicos y sub-trópicos del mundo, como Costa Rica, oeste de la India, Islas Hawai, Guam, las islas Filipinas, Java; Sumatra, China, Indochina, Guinea, valle de la Riviera del Nilo, Camerún y Pretoria (Duke, 1981).

En forma silvestre, *Pachyrhizus erosus*, se encuentra desde el norte de Veracruz hasta Tabasco en la vertiente del Golfo, y a partir del Estado de Jalisco hasta Costa Rica en la vertiente del Pacífico, a través de los estados de Puebla, Querétaro, México, Morelos y la parte oriental de San Luis Potosí. Las plantas de esta especie se encuentran con frecuencia trepando sobre la vegetación y en pendientes pedregosas, generalmente sobre sustratos calcáreos (Jiménez, 1999).

En cuanto a su taxonomía, la jícama pertenece al reino Plantae, división Magnoliophyta, clase Magnoliopsida, orden Fabales, familia Fabaceae, subfamilia Faboideae, género *Pachyrhizus*, y especie *erosus*, (SEMARNAT, 2006).

2.1.2 Especies botánicas

El género *Pachyrhizus* tiene varias especies: *P. tuberosas*, *P. ahipa* y *P. panamensis* originarias del sur de América; además de otras que son originarias de Centro América y México: *P. erosus* y *P. ferrugineo*. Para el caso de *P. erosus* las áreas de mayor diversidad se encuentran en México en los Estados de Veracruz, Tabasco, Oaxaca y Chiapas, en todo Guatemala y norte de Honduras. Las más grandes variaciones morfológicas se encuentran en México en los estados de Veracruz, Oaxaca, Tabasco y Chiapas, y además en Guatemala (Sorensen, 1996).

2.1.3 Nombres comunes

La jícama en Venezuela es llamada como caraota de caballo; en El Salvador como frijol de jícamo; en México como jícama; en Filipinas como sinkamás; en la Isla Reunión como pois-cochon, pois-manioc, manioc-cochon; en Martinica como patate-cochon; en Francia como dolique bulbeux; en Vietnam como cadau y en Nueva Caledonia como magnagna, quéchoc (Montaldo, 1972). En inglés a la jícama se le conoce como yam bean (Saray, 1979).

2.1.4 Importancia del cultivo

A nivel mundial la superficie total cultivada de raíces, que incluye la jícama, y tubérculos en 2002 rebasó las 52,145.117 ha, obteniendo un rendimiento de 13.10 ton ha⁻¹ y una producción de 685, 893.849 mt. En México la superficie cultivada de raíces y tubérculos para ese mismo año fue de 67,645 ha, obteniendo un rendimiento de 22.9 ton ha⁻¹ y una producción total de 1,552.576 mt (FAO, 2002).

La jícama se encuentra entre las principales hortalizas cultivadas en nuestro país; ocupa el lugar número 16 con base en la superficie sembrada (Cuadro 1) (SIACON 2005). La superficie dedicada a este cultivo, distribuida principalmente en 10 estados (Cuadro 2), incrementó de 4,349 ha en el año 2001 a 6,445.62 ha en el año 2004 (SAGARPA, 2001; SIACON, 2005) (Cuadro 1).

Cuadro 1.
Principales hortalizas cultivadas en México de acuerdo a la superficie cultivada
(miles de ha)

Cultivo	Año			
	2001	2002	2003	2004
Chiles	155.65	149.84	151.77	146.96
Tomate	124.25	118.98	126.45	135.67
Elote	36.97	44.59	44.82	69.23
Cebolla blanca	1.40	2.19	7.08	29.42
Brócoli	17.78	16.26	22.71	22.91
Calabacita sin clasificar	29.70	31.21	28.88	22.10
Pepino	18.58	17.37	17.28	19.68
Espárrago	16.34	15.89	15.22	15.05
Chícharo	9.85	9.67	9.89	14.81
Zanahoria sin clasificar	14.77	15.01	12.52	13.86
Lechuga sin clasificar	10.31	10.93	11.52	13.02
Ejote	9.77	11.02	9.83	10.86
Haba verde	9.76	10.08	8.65	9.76
Cebollín	10.03	9.87	8.32	8.10
Calabacita italiana	-	1.27	2.79	7.58
Jícama	4.35	4.18	6.61	6.44
Col (repollo)	6.83	6.44	6.06	6.12
Ajo	6.69	4.78	5.45	5.61
Superficie Agrícola Nal.	21607.97	21664.02	21754.41	21874.03

Fuente: Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON) 2005.

Los principales estados productores de jícama en México son Nayarit, Michoacán, Veracruz, Morelos, Guerrero, Puebla, Jalisco, Guanajuato, Colima y Yucatán (Cuadros 2 y 3); sin embargo los tres primeros estados cultivan más del 72 % de la superficie destinada a este cultivo (SIACON, 2005) (Cuadro 2).

Cuadro 2.

Principales estados productores de jícama en México de acuerdo a la superficie cultivada (ha)

Estado	Año			
	2001	2002	2003	2004
Nayarit	1 162.0	1 263.5	1 383.0	1 968.0
Michoacán	851.0	766.0	1 664.0	1 764.0
Veracruz	449.0	73.0	1 939.0	921.0
Morelos	813.0	643.8	605.8	619.6
Guerrero	247.0	237.0	258.0	270.0
Puebla	130.0	130.0	105.0	255.0
Jalisco	269.0	83.0	244.0	251.0
Guanajuato	279.0	209.7	267.0	201.0
Colima	24.0	30.0	41.0	52.0
Yucatán	52.0	50.0	50.0	50.0
Total nacional	4 349.0	4 180.0	6 608.8	6 445.6

Fuente: Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON) 2005.

Cuadro 3.

Principales estados productores de jícama en México de acuerdo al volumen de producción (miles de ton)

Estado	Año			
	2001	2002	2003	2004
Nayarit	31.10	38.73	35.78	54.98
Michoacán	21.10	18.66	39.68	42.38
Veracruz	10.67	15.76	44.91	24.04
Morelos	26.99	19.31	18.88	19.88
Guerrero	6.66	6.24	7.96	6.94
Puebla	4.55	4.97	3.99	5.87
Jalisco	9.66	1.94	6.55	5.93
Guanajuato	7.70	5.94	6.96	5.77
Colima	0.48	0.49	0.69	1.45
Yucatán	0.54	0.20	0.50	0.43
Total nacional	120.20	112.70	166.88	168.97

Fuente: Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON) 2005.

El rendimiento nacional promedio de la jícama es alrededor de las 30 ton ha⁻¹ (Cuadro 4). En general, el estado de Morelos presentó los rendimientos de jícama más elevados (30 a 33.2 ton ha⁻¹) y Yucatán los menores (5 a 10.41 ton ha⁻¹) durante los años 2001 a 2004 (SIACON, 2005) (Cuadro 4).

Cuadro 4.

Rendimiento en el cultivo de jícama (ton ha^{-1}) en los principales estados productores de nuestro país

Estado	Año			
	2001	2002	2003	2004
Nayarit	26.77	30.75	32.56	27.94
Michoacán	24.79	24.37	23.85	24.03
Veracruz	23.76	23.05	24.67	26.10
Morelos	33.20	30.00	31.17	32.45
Guerrero	26.98	26.31	30.86	25.70
Puebla	35.00	38.23	38.00	23.02
Jalisco	35.91	23.42	26.84	23.63
Guanajuato	27.57	28.32	29.23	28.68
Colima	20.00	16.17	16.93	27.94
Yucatán	10.41	5.00	10.00	8.50
Promedio nacional	27.64	27.39	27.02	26.26

Fuente: Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON) 2005.

2.2 Fibra alimentaria

Los polisacáridos, macromoléculas constituidas por unidades de monosacáridos, se clasifican de acuerdo a su papel en la alimentación humana en: disponibles para el metabolismo (PD) (utilizables y metabolizables), como el almidón y en no disponibles (PND), como las pectinas, hemicelulosas y celulosa (Brett y Waldron, 1990; Covarrubias y Cassab, 2003). Este concepto es útil, pues genera atención en el hecho de que algunos polisacáridos no son digeridos en el tracto digestivo, ni absorbidos por el intestino delgado de los humanos. Una substitución apropiada de la clasificación de los polisacáridos en disponibles y no disponibles, consiste en su división en carbohidratos glicémicos (PSG) (*i.e.* proveen carbohidratos al metabolismo) o no glicémicos (PSNG) (*i.e.* no proveen carbohidratos al metabolismo). Además de las clasificaciones antes mencionadas, se han introducidos términos que describen

varias clases y sub-clases de los polisacáridos; así los PND han sido a su vez clasificados en solubles e insolubles en agua. Otro término que agrupa a algunos polisacáridos es el de fibra dietética o fibra alimentaria (FA) e incluye PSNG principalmente, como sustancias pécticas, mucílagos, hemicelulosas y celulosa, además de otros componentes que no son polisacáridos, como lignina y pequeñas proporciones de proteínas estructurales. La FA se define como el material de las paredes celulares de las plantas que es resistente a las enzimas digestivas humanas. La FA está constituida por polisacáridos (celulosa, hemicelulosas y sustancias pépticas) y lignina. Contrariamente a lo que ocurre con el resto de los componentes de los alimentos, la fibra no es atacada por las enzimas del estómago y del intestino delgado, por lo que llega al colon sin ser degradada. Allí sufre en mayor o menor grado, según su composición, un proceso de fermentación por las bacterias intestinales y la parte no fermentada es excretada (Alabaster, 1993).

Durante más de un siglo el contenido de FA fue considerado una medida de digestibilidad y los alimentos con contenido alto de FA eran calificados como de baja calidad; actualmente este concepto ha cambiado y la necesidad de FA por humanos, animales no rumiantes y monogástricos ha sido ampliamente reconocida. Entre los efectos fisiológicos generales de la FA sobre los seres humanos pueden citarse: incremento en el volumen del contenido del tracto digestivo y reducción de su tiempo de tránsito, lo que disminuye o evita la constipación y otras alteraciones; disminución de los niveles de colesterol en sangre; regulación de niveles de glucosa en plasma; protección contra

enfermedades cardíacas y ciertas formas de cáncer, etc. (Englyst y Cummings, 1990; Englyst *et al.*, 1992; FAO, 1997; García y Peña, 1995).

2.2.1 Tipos de fibras

La fibra se compone de una mezcla heterogénea de sustancias y con base en su solubilidad en agua y su efecto fisiológico en el organismo, la fibra ha sido clasificada como insoluble en agua (FI) y soluble en agua (FS) (Mejía *et al.*, 1992). Sin embargo, la separación entre fibra soluble e insoluble es poco clara, pues depende de las condiciones de extracción (Asp *et al.*, 1992).

Los alimentos que contienen FI en mayor proporción son las hortalizas, verduras, leguminosas frescas y granos de cereales. La FI, incluye polisacáridos, como algunas hemicelulosas y celulosa, y lignina (no polisacárido). La FI casi no es susceptible de ser degradada por procesos de fermentación y presenta un efecto más marcado que la FS en la regulación intestinal, con reducción del tiempo de tránsito de los alimentos y aumento del bolo fecal; es particularmente efectiva para la prevención y tratamiento de la constipación y puede también ayudar a reducir el riesgo de cáncer en colon y cáncer colateral (García y Peña, 1995), ya que acelera el movimiento de sustancias potencialmente carcinogénicas del tracto digestivo; además, puede ayudar a prevenir hemorroides y enfermedades diverticulares. La lignina, componente de la FI de menor digestibilidad entre todos los tipos de fibra, es un antioxidante efectivo y se encuentra en zanahorias, ejotes, papas, tomates,

granos completos, entre otros alimentos. La alimentación rica en FI y baja en grasas puede ayudar al control de peso (Nantel, 1999).

Las principales fuentes de FS son las frutas, los frijoles, la avena y la cebada (Mejías, Bouges y Rosado, 1992). La FS incluye pectinas, mucílagos y algunas hemicelulosas clasificadas como gomas. Se ha señalado que la FS es benéfica para disminuir el colesterol en sangre; por ello es considerada como una herramienta valiosa contra enfermedades del corazón; es efectiva para mantener el funcionamiento adecuado del sistema digestivo porque evita la constipación y así, protege contra el cáncer de colon y colo rectal, enfermedades diverticulares, síndrome de irritación intestinal y desarrollo de cálculos biliares. El consumo de cantidades elevadas de FS ayuda al manejo de la diabetes por disminución de la tasa de absorción de glucosa en el intestino delgado (Nantel, 1999).

Dependiendo de las fuentes de fibra y de si son crudas o cocidas, sus acciones varían en el tracto gastrointestinal. Se puede decir que el efecto de cada tipo de fibra es parecido al de una esponja cargada de agua, que pasa por el intestino. Esta esponja tiene los siguientes efectos: a) retarda el vaciamiento gástrico y logra una absorción lenta de los componentes de los alimentos; b) como resultado de esta absorción lenta, la fibra regula la respuesta metabólica a la carga de nutrimentos; c) modula el metabolismo del colesterol debido a que incrementa los ácidos biliares en las heces; d) aumenta el peso de las heces debido a la fibra residual no fermentable y a la masa bacteriana que resulta de

la fermentación intestinal de la fibra. Algunas sustancias osmóticamente activas que se producen por la fermentación también retienen agua y contribuyen al aumento en peso de las heces (Eastwood, 1992).

La Asociación Americana de la Dieta (ADA) recomienda una ingesta diaria total para personas menores a 50 años de 38 g día^{-1} para hombres y 25 g día^{-1} para las mujeres; mientras que para los hombres y las mujeres mayores de 50 años recomienda el 30 y 21 g día^{-1} respectivamente, debido a la reducción en el consumo de alimentos (Duxbury, 2004). Una tercera parte de la fibra total recomendada para la ingesta deber ser fibra soluble, $5\text{-}10 \text{ g día}^{-1}$. En México hay bajos niveles de ingesta de fibra $17\text{-}27 \text{ g día}^{-1}$ (FAO, 2003).

2.2.2 Constituyentes más importantes de la fibra soluble

2.2.2.1 Pectinas

Las pectinas o sustancias pécticas constituyen un grupo de polisacáridos ricos en ácido galacturónico y, en menor medida, ramnosa, arabinosa y galactosa. Al igual que en otros grupos de polisacáridos de pared, la definición de pectinas es operativa y se basa en la extracción de la fibra (previamente delignificada) con soluciones acuosas de un agente quelante o bien, extracción con una solución ácida diluida (en ambos casos la extracción se realiza en caliente) (Rodríguez-Palenzuela, *et al.*, 2000).

Las pectinas están ampliamente distribuidas en todo el reino vegetal. Son un componente esencial de las paredes celulares de las plantas dicotiledóneas y también se hallan presentes, aunque en menor proporción, en las monocotiledóneas. En las primeras, las pectinas constituyen el componente principal de la lámina media de la pared primaria (Rodríguez-Palenzuela, *et al.*, 2000). Las pectinas tienen un papel esencial en la estabilidad de la pared al actuar como material aglutinador de las fibras de celulosa. En frutas y verduras, las sustancias pécticas constituyen un factor determinante de la textura y firmeza, y por tanto de la calidad del producto (Rodríguez-Palenzuela, *et al.*, 2000).

Tal como se han definido, las pectinas son sustancias, en términos prácticos, solubles en agua. No obstante, es frecuente que los residuos de ácido galacturónico se encuentren metilados en mayor o menor grado. El grado de metilación afecta a diversas propiedades de las pectinas, incluyendo su solubilidad en agua, la cual es inversamente proporcional al grado de metilación (Rodríguez-Palenzuela, *et al.*, 2000).

Una de las aplicaciones principales de las pectinas se debe a la capacidad de estas moléculas de formar geles en determinadas circunstancias. Las pectinas de bajo metoxilo pueden formar geles en presencia de calcio, mientras que las de alto metoxilo gelifican a pH ácido (de modo que la repulsión electrostática entre los grupos ácido sea mínima) y en presencia de una concentración elevada de azúcar (que contribuye a deshidratar la solución). Estos geles son

de uso frecuente en mermeladas, confituras y conservas de frutos. En otros casos, la aplicación consiste justamente en la eliminación de sustancias pécticas de un producto. La clarificación de zumos, esto es, la eliminación enzimática de pectinas en forma coloidal, constituye un ejemplo típico (Rodríguez-Palenzuela, *et al.*, 2000).

2.2.2.2 Hemicelulosas

Las hemicelulosas son un conjunto heterogéneo de polisacáridos, cuya composición varía de una especie a otra. Un común denominador de la fracción hemicelulosa es el de representar a los polisacáridos insolubles en agua en forma nativa, pero que pueden solubilizarse en álcalis fuertes (Rodríguez-Palenzuela, *et al.*, 2000).

La distribución de las hemicelulosas en el reino vegetal es prácticamente universal, y aunque existen grandes diferencias respecto a la importancia cuantitativa y la composición química de las mismas, puede afirmarse que las hemicelulosas están presentes en cualquier tejido vegetal. Dentro de la célula vegetal, las hemicelulosas se localizan en las paredes formando parte de la fase amorfa (o no cristalina) (Rodríguez-Palenzuela, *et al.*, 2000).

Las hemicelulosas pueden extraerse con soluciones alcalinas concentradas (1 a 4 M). Una vez extraídas de la pared, la mayoría pasa a ser soluble en agua. En muchos casos, este requerimiento de soluciones alcalinas fuertes para su

extracción de las paredes se debe a la existencia de numerosos puentes de hidrógeno entre las hemicelulosas y las fibrillas de celulosa (Rodríguez-Palenzuela *et al.*, 2000).

2.2.3 Propiedades de la fibra en bebidas lácteas

Estas propiedades dependen de la composición de la fibra que sea adicionada y no de la fibra en general. La solubilidad en agua es muy variable entre las distintas fibras. Las fibras solubles en contacto con el agua forman un retículo donde queda atrapada, originándose soluciones de gran viscosidad. Estas características de este tipo de fibra son las responsables de sus acciones sobre el metabolismo lipídico, hidrocarbonado y en parte su potencial anticarcinogénico (Kin, 2000).

Las fibras insolubles son capaces de retener el agua en su matriz estructural, por lo que forman mezclas de viscosidad baja; esto produce un aumento de la masa fecal que acelera el tránsito intestinal. Por otra parte contribuye a disminuir la concentración y el tiempo de contacto de moléculas potenciales carcinogénicas con la mucosa del colon (Kin, 2000).

El tamaño de partícula de la fibra puede influir en su capacidad para captar agua y será un factor influyente en el procesamiento de alimentos. Es importante señalar que la retención hídrica se ve también afectada por los procesos de

fermentación que puede sufrir la fibra dietética en el intestino grueso (Mataix y Gassull., 2002).

Es probablemente la fermentabilidad, la propiedad más importante de un gran número de fibras, ya que de ella derivan multitud de efectos tanto locales como sistémicos. La fermentabilidad está bastante relacionada con la solubilidad de cada fibra.

La fibra dietética llega inalterada al intestino grueso, aquí las bacterias del colon, con sus numerosas enzimas de gran actividad metabólica, pueden digerirla en mayor o menor medida dependiendo de su estructura. Este proceso de digestión se produce en condiciones anaerobias, por lo que se denomina fermentación (Zarzuelo y Gálvez, 2005). En el colon se dan fundamentalmente dos tipos de fermentación: fermentación sacarolítica y fermentación proteolítica).

Los principales productos de la fermentación de la fibra son: ácidos grasos de cadena corta, gases (hidrogeno, anhídrido carbónico y metano) y energía. Los polímeros de glucosa son hidrolizados a monómeros por acción de las enzimas extracelulares de las bacterias del colon. El metabolismo continúa en la bacteria hasta la obtención de piruvato. Este piruvato es convertido en ácidos grasos de cadena corta: acetato, propionato y butirato (Sastre, 2003; García *et al.*, 2002)

La fermentación proteolítica produce derivados nitrogenados como aminas, amonio, y compuestos fenólicos. La ingestión de fibra puede multiplicar por diez la representación numérica de las bifidobacterias (Bouhnik et al., 1996), en lo que se ha denominado efecto o propiedad prebiótica: "componentes no digeribles en los alimentos, que resultan beneficiosos para el huésped porque producen el crecimiento selectivo y/o la actividad y/o de una o un número limitado de bacterias del colon" (Gibson y Roberfroid, 1995 y Gibson, 2004). Los géneros bacterianos como *Bifidobacterium* y *Lactobacillus* se han asociado con efectos benéficos. Las bifidobacterias liberan grandes cantidades de ácido láctico que disminuye el pH del colónico, controla el crecimiento de bacterias perjudiciales y ayuda al huésped a eliminar el amonio tóxico. También produce vitaminas, principalmente del grupo B (Hartemik et al., 1997).

Por todo lo anteriormente señalado, la fibra también es considerada un sustrato energético, pues aporta en promedio 2 Kcal/g (FAO, 2003).

2.2.4 Aplicaciones de la fibra en la industria

Además del efecto de los polisacáridos estructurales en la fisiología humana, son importantes comercialmente, pues son materia prima para la fabricación de productos diversos en la industria alimentaria, farmacéutica, cosmetológica, forrajera, entre otras (Nefzaoui y Ben S. 2001).

Las principales aplicaciones de las fibras como aditivos alimentarios se basan en su acción como agentes gelificantes y espesantes. En el caso de la aplicación de la industria farmacéutica y cosmética se usan para la preparación de pastas y cremas gelificadas, como dispersante y en general para reducir la presencia de azúcar (May, 1999).

2.3 Bebidas lácteas fermentadas

El consumo y la demanda de derivados lácteos fermentados, en numerosos países, incluyendo a las bebidas lácteas, se han incrementado; debido al aporte nutricional de la leche y a los beneficios que estos productos proporcionan a la salud del consumidor (Salari, 2001).

La leche, materia prima fundamental de las bebidas lácteas fermentadas, constituye una fuente rica en nutrientes, como proteínas, calcio, fósforo y riboflavina. En adición, el consumo de bebidas lácteas fermentadas mejora la absorción del hierro, debido a la producción de ácido láctico y otros ácidos orgánicos, que al disminuir el pH del estómago refuerzan la absorción del hierro (Richlandtown, 2003).

Una leche fermentada es un producto lácteo preparado a partir de leche fluida o concentrada, sometida a pasteurización, esterilización o ebullición; inoculación y fermentación con bacterias ácido lácticas (BAL o LAB) pertenecientes a una o varias especies, dependiendo del producto (Steventon, *et al.*, 1990). La

transformación de la leche en una bebida láctea fermentada involucra las siguientes operaciones:

- a) Estandarización. Consistente en el ajuste del contenido de sólidos grasos y no grasos, para asegurar la consistencia final del producto.
- b) Tratamiento térmico. El calentamiento de la leche a temperaturas superiores a los 80 °C por períodos de entre 15 y 30 minutos, tiene entre otros objetivos desnaturalizar las proteínas del lactosuero, causando una interacción entre la K-caseína, con la β -lactoglobulina y la α -lactoalbúmina, a fin de que este complejo se integre en la estructura gelificada de la red proteínica.
- c) Fermentación. La leche usualmente inoculada con un cultivo láctico mixto (v.g. *Streptococcus salivarius* ss. *Thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* ss. *Bulgaricus*), es incubada por períodos de 3 a 5 horas, a 45°C, para la obtención de una estructura proteínica gelificada. La transformación de la lactosa de la leche en ácido láctico, provoca disminución del pH del sistema, lo cual a su vez genera desestabilización y agregación continua de las micelas de caseína hasta la formación de una red de gel en cuyo interior se encuentra atrapado el lactosuero (Steventon, *et al.*, 1990).

Algunos ejemplos de leches fermentadas son: el yogur, la leche acidófila (Acidophilus milk), buttermilk y el kefir (Robinson, 2002).

2.3.1 Principales problemas que presentan las leches fermentadas

Escobar (2007), señala que los principales problemas que se presentan en las leches fermentadas son por defectos en la textura, defectos en el cuerpo y defectos en el sabor de las mismas.

Cuadro 5.
Diferentes defectos que presentan las leches fermentadas

Defectos en la textura	
Defecto	Causas
Grumoso	Inadecuadamente estabilizado, desarrollo de acidez no homogénea, deficiente enfriamiento después del empaque.
Granuloso	Desbalance del cultivo, producción de acidez muy rápida, temperatura de incubación demasiado alta, leche de pobre calidad.
Sinéresis	Pasteurización inadecuada, bajos sólidos no grasos, alto desarrollo de acidez, excesiva agitación, contaminación.
Ligoso	Contaminación microbiológica, inadecuada selección del cultivo, inadecuada selección del estabilizante (pectina, almidón, caseinato, emulsificante, etc), excesivo uso de azúcar (jarabe).
Defectos en el cuerpo	
Cuerpo débil	Inadecuada selección de cultivo, bajos sólidos (sustrato), baja proteína, insuficiente estabilizante, insuficiente tratamiento térmico.
Muy firme gelificado	Excesivo uso de estabilizante / proteína, sólidos en exceso.
Acidez alta	Temperatura de incubación elevada, desbalance del cultivo, enfriamiento muy lento.
Acidez baja	Temperatura de incubación inadecuada, nivel excesivo de azúcar / edulcorante, insuficiente tratamiento térmico, cultivo inactivo, sustancias inhibidoras, ataque fágico.
Defectos en el sabor	
Amargo	Contaminación psicrotrófica, ingredientes de pobre calidad
Muy dulce	Producción de ácido insuficiente (mayor ácido = menos dulce), muy alto en azúcares
No natural	Ingredientes de pobre calidad

Fuente: Escobar (2007).

2.4 Arreglo microestructural de las bebidas lácteas fermentadas

El estudio de la microestructura de un alimento proporciona información de una gran variedad de sus características, como composición química, distribución de sus componentes, características estructurales y la presencia de contaminantes y microorganismos. La información estructural es importante y necesaria para caracterizar y controlar las propiedades de los materiales alimenticios (Orrego, 2002).

Por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), es posible detectar diferencias sutiles en el arreglo de componentes de un alimento, originadas por alteraciones en su composición química. El microscopio electrónico de barrido (mEB) es un instrumento que permite la observación y la caracterización de la superficie de un material orgánica o inorgánica (Grageda y Montesinos, 2000; Ojeda, 1997). El mEB utiliza electrones para iluminar el objeto a explorar; dado que los electrones tienen una longitud de onda menor que la de la luz pueden mostrar estructuras más pequeñas (Grageda y Montesinos, 2000). Las principales utilidades de las imágenes obtenidas mediante MEB, son: alta resolución ($\sim 100 \text{ \AA}$), profundidad de campo que da apariencia tridimensional a las imágenes y sencilla preparación de las muestras. El análisis de las imágenes resultantes proporciona datos de la textura, tamaño y forma de la muestra (Grageda y Montesinos, 2000).

2.5 Comportamiento mecánico de las bebidas lácteas fermentadas

Las bebidas lácteas fermentadas son sistemas alimenticios que presentan tanto propiedades elásticas como viscosas; es decir muchos alimentos incluyen en su composición una matriz sólida más o menos elástica y una fase líquida que aporta un elemento viscoso a la estructura total. Estos alimentos presentan un comportamiento reológico que combina características propias de los sólidos elásticos y de los líquidos, y se denomina materiales viscoelásticos (Fizman *et al.*, 1983), por lo que para la caracterización de sus propiedades mecánicas deben contemplarse ambos comportamientos.

Los fluidos a base de leche muestran un comportamiento reológico complejo, que depende principalmente de la concentración de sólidos, temperatura, y estado físico de sus grasas y proteínas. En leche que no ha sido calentada, los glóbulos de grasa son los que mayormente contribuyen a la reología de producto; sin embargo, durante la elaboración de bebidas lácteas fermentadas, en las que la leche se somete a un sobre-calentamiento, la estructura cuaternaria de las proteínas cambia, y se producen re-arreglos que dan como resultado la formación de un gel (comportamiento elástico) compuesto por una red compleja de proteínas, que domina las propiedades reológicas resultantes (Steventon, *et al.*, 1990). Sin embargo, la acidificación de la fase acuosa de la leche convierte su dispersión coloidal (comportamiento líquido), en un agregado suave con comportamiento sólido (Dickinson, 2001).

Debido a que las bebidas lácteas son materiales viscoelásticos, se utilizan pruebas dinámicas para evaluar las propiedades de los sistemas como los geles. De una prueba en la región viscoelástica lineal destacan parámetros reológicos como el módulo de almacenamiento (G'), que representa el carácter elástico del producto y el módulo de pérdida (G''), que representa su carácter viscoso; así como la $\tan \delta$ (G''/G') o factor de pérdida (Ramos e Ibartz, 2006).

El intervalo viscoelástico lineal, es la amplitud en la cual G' es constante. Al seleccionar valores grandes de esfuerzos y deformaciones, esta amplitud de viscoelasticidad lineal queda fuera, y la muestra es deformada a tal nivel que las uniones secundarias de las moléculas son destruidas. Este intervalo puede determinarse a través de muestras de barridos de esfuerzos o deformaciones, y la información recabada sirve para realizar otro tipo de análisis, como las pruebas de frecuencia y flujo (Gunasekaran, y Mehmet 2000).

2.6 Evaluación sensorial

La evaluación sensorial es el análisis de los alimentos u otros materiales por medio de los sentidos e incluye distintas etapas como son la definición del problema, la preparación de las pruebas, la ejecución de las pruebas y la interpretación de los resultados (Picallo, 2002).

Los caracteres o características sensoriales de los alimentos surgen a partir de su composición, arreglo estructural y/o proceso de elaboración utilizado para su obtención (Chamorro, 2002).

La evaluación sensorial se ocupa de la medición y cuantificación de las características de un producto, ingrediente o modelo, las cuales son percibidas por los sentidos humanos. Entre estas características están, por su importancia: *Apariencia* (color, tamaño, forma, conformación, uniformidad), *Olor* (miles de compuestos volátiles que contribuyen al aroma), *Gusto* (dulce, amargo, salado y ácido), *Textura* (las propiedades físicas como dureza, viscosidad, granulosis), y *Sonido* que aunque de poca aplicación en alimentos, se correlaciona con la textura; por ejemplo, crujido, tronido, efervescencia (Pedrero y Pangborn, 1989).

Según la información que se desea obtener, la evaluación sensorial de los alimentos puede realizarse a través de diferentes pruebas:

- Pruebas discriminativas ó analíticas. Utilizadas cuando no se requiere conocer la sensación subjetiva que produce un alimento en una persona, sino que se desea establecer si hay o no diferencia entre dos o más muestras (en su sabor, olor, textura, etc.) y, en algunos de los casos, la magnitud o importancia de esa diferencia. Las pruebas discriminativas más usadas son: las de comparación apareada simple, triangular, dúo-trío, comparaciones múltiples y de ordenamiento.

- Pruebas descriptivas ó de análisis cualitativo. Usadas para describir y medir las propiedades del alimento de la manera más objetiva posible. Aquí el interés radica en conocer la magnitud o intensidad de los atributos del alimento, en vez de saber las diferencias entre muestras.
- Pruebas afectivas, de preferencia o hedónicas. Aquí se hace referencia a la atracción subjetiva del individuo por el producto que se está evaluando. El objetivo de este tipo de prueba es obtener una respuesta personal, ya sea de aceptación o de preferencia, de un consumidor - potencial o real-, sobre un producto concreto (Pedrero y Pangborn, 1989; Anzaldúa, 1994). Generalmente estas pruebas se realizan con paneles inexpertos o solamente con consumidores. Entre las pruebas afectivas se encuentran las de preferencia, las de medición del grado de satisfacción y las de aceptación (Chamorro, 2002).

2.6.1 Prueba triangular

Esta prueba se encuentra entre las pruebas discriminativas o analíticas y se utiliza para seleccionar y monitorear panelistas por su habilidad para discriminar diferencias dadas (ISO 16820, 2004). Consiste en presentar al panelista tres estímulos, indicándole que dos de ellos son iguales y el otro diferente, el panelista debe examinar las muestras y seleccionar la que es impar. Generalmente participan de 20 a 40 personas, pero puede emplearse un mínimo de 12 cuando las diferencias son fáciles de detectar. O'Mahony et al.,

(1995) establecieron que el panelista debe tener algún conocimiento de los productos para saber qué señales buscar.

Esta prueba es útil en los trabajos de control de calidad y se utiliza también para determinar si la sustitución de ingredientes o algún otro cambio en el sector manufacturero se traducen en una diferencia detectable en el producto (Larmond, 1977).

3. BIBLIOGRAFÍA

1. AACC.2003. American Association of Cereal Chemists. Report of the Dietary Fiber Definition Committee to Board of Directors of the American Association Of Cereal Chemists.. Submitted January.Vol. 43. No. 3.
2. Alabaster A. 1993. The Bran Plan Diet. Rodale Press, Meaux, P:A.
3. Aanzaldúa, M. A. 1994. La Evaluación Sensorial de los Alimentos en la Teoría y la Práctica. Ed. Acribia, Zaragoza, España.
4. Ascherio, A., Willet, W. (1995). New directions in dietary studies of coronary heart disease. *Journal of Nutrition* 125, 647S-655S.
5. Asp, N. G.; T. F. Schweizer; D.A.T. Southgate; O. Theander. 1992. Dietary fibre analysis. In: T.F. Schweizer and C.A. Edwards (eds.). Dietary fibre. A component of food. Nutritional function in health and disease. Springer, London, pp. 57-102.
6. Beristain, C.I., Cruz-Sosa, F., Lobato-Calleros, C, Pedroza-Islas, R., Rodríguez-Huezo, M.E. y Verde-Calvo, J.R. (2006). Applications of soluble dietary fibers in beverages. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(1), 81-95.
7. Bouhnik, Y; Flourié, B; Rottot, M. 1996. Effects of fructooligosacharides ingestion on fecal bifidobacteria and selected metabolic indexes of colon carcinogenecis in healthy humans. *Nutr Cance*.26:21-29.
8. Brett, C. K. Waldron. 1990. Physiology and biochemistry of plant cell walls. Unwin Hyman. London, UK. 194 p.
9. Chamorro, C; Losada, M. M. 2002 *El análisis sensorial de los quesos*. Editorial AMV Ediciones, 2002
10. Covarrubias R., A.; G. I. Cassab L. 2003. Matriz extracelular de las plantas. En: Jiménez, L. F.; H. Merchant (coordinadores). *Biología Celular y Molecular*. Prentice Hall. México. pp. 547-591.
11. Dickinson, E., 2001. Milk protein interfacial layers and the relationship to emulsion stability and rheology *Colloids and surfaces B*, 20: 197-210.
12. Duke J.A. 1981. Handbook of Legumes of World Economic important. Ed. Plenum Press. New York and London. United Status of America. 345 p.
13. Duxbury, D. (2004). Dietary fiber: Still no accepted definition. *Food Technology* 58(5), 70-71, 80.

14. Eastwood MA, Morris ER. 1992. Physical properties of dietary fiber that influence physiological function: a model for polymers along the gastrointestinal tract. *Am J Clin Nutr* 55:436-42.
15. Englyst, H. N.; J. H. Cummings. 1990. Non-starch polysaccharides (dietary fiber) and resistant starch. In: Furda, I.; C. J. Brine, (eds.). *New Developments in Dietary Fiber. Physiological, Physicochemical, and Analytical Aspects*. Plenum Press, New York and London, pp. 205-225.
16. Englyst, H. N.; S. M. Kingman; J. H. Cummings. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition* 46:S33-S50.
17. Escobar, P. J. 2007. Principios tecnológicos (yoghurt). DANISCO. México/Colombia. pp. 1-65.
18. Fizman, S. M; Costell, E y Durán, L. 1983. Medida del comportamiento reológico de alimentos sólidos. *Revista Agroquímica, tecnología alimentaria*. 23(3):303-309.
19. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1997. Base datos estadísticos.
20. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2002. Base datos estadísticos.
21. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2003. Perfil Nutricional.
22. García H., E. del R.; C. B. Peña-Valdivia. 1995. La pared celular. Componente fundamental de las células vegetales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 96 p.
23. García, P., Bretón, L., De la Cuerda, C., y Cambor, A. 2002. Metabolismo colónico de la fibra. *Nutrición Hospitalaria*. 17: 11-16.
24. Grain, J. (2006). Dietary fibre. Definition, analysis, physiology & health. ILSI Europe concise monograph series. International Life Sciences Institute (ILSI). Bélgica, 38 pp.
25. Gunasekaran, S. and Mehmet, M. 2000 Dynamic oscillatory shear testing of foods –Selected applications. *Food science and technology*, 11:115-127.
26. Gibson, G.R; Roberfroid, M.B. 1995. Dietary modulation of the human colonic microbiota: Introducing the concept of prebiotics. *J Nutr*. 125: 1401-1412.

27. Gibson, G.R. 2004. Fiber and effects on probiotics (the prebiotic concept). Clin Nutr. 23 (Supl 2).
28. Grageda, Z. M. y Montesinos, S. 2000. *Aplicaciones de microscopia de barrido*. Disponible en: <http://cabierta.uchile.cl/revista/28/articulos>.
29. Jiménez C.D. 1999. Algunos efectos de la domesticación de la jícama (*Pachirrizhus erosus* (L) Urban) Tesis de maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillos, México. pp 14-24.
30. Hartemink, R; Van Laere K; Rombouts, F. 1997. Growth of enterobacteria on fructo-oligosacharides. J Appl Microbiol. 83:367-374.
31. ISO 16820. 2004. International Standard. Sensory analysis-methodology-sequential analysis.
32. Kimm, S. (1995). The role of dietary fiber in the development and treatment of childhood obesity. *Pediatrics*, 96, 1010-1014.
33. Kin, Y. I. 2000. A technical review. Impact of dietary fiber on colon cancer occurrence. *Gastroenterology*. 118: 1235-1257.
34. Larmond, E. 1977. Laboratory methods for sensory evaluation of food. Department of agriculture. Ottawa, Canada. pp: 1-72.
35. Mataix, J; Gassull, M. 2002. Fibra alimentaria: Nutrición y alimentación humana. Ergón. Madrid. 119-137.
36. May, C.D. 1999. Pectins. *Thickening and Gelling Agents for Food*. A. Imeson Ed. 2nd ed. Aspen Publishers, Inc. Gaithersburg, MA. USA. 230-261.
37. Mejía, I. A., H. Bourges y J.L. Rosado. 1992. Memoria del III Simposio Internacional sobre Fibra Dietética, Instituto nacional de la Nutrición Salvador Zuribán-Kellogg's de México, México.
38. Montaldo, A. 1972. Cultivo de raíces y tubérculos tropicales. IICA-OEA. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Perú. pp 199- 216.
39. Nakamura, A., Yoshida, R., Maeda, H., Corredig, M. (2006). The stabilizing behaviour of soybean soluble polysaccharide and pectin in acidified milk beverages. *International Dairy Journal*, 16, 361-369.
40. Nantel, G. 1999. Carbohydrates in human nutrition. In: J. L. Albert; L. Craffi-Cannizzo. Food nutrition and agriculture. Vol. 24. FAO. Rome, Italy.

41. Nefzaoui, A.; H. Ben S. 2001. Opuntia- a strategic fodder and efficient tool to combat desertification in the Wana region. En: Mondragón-Jacobo, C. (ed.). Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. FAO, Roma, Italia. pp. 73-89.
42. O'Mahony, M. 1995. Who told you the triangle test was simple?. Food Quality and Preference 6 (1995): 227-238.
43. Ojeda, S. J. 1997. *Método de Microscopía Electrónica de Barrido en Biología*. Universidad de Cantabria, Argentina.
44. Orrego, C. 2002. Microestructura y nanoestructura de alimentos. Revista Colombiana de Física. 34(1):214-218.
45. Pedrero, D. y Pangborn, R. M. 1989. *Evaluación Sensorial de los Alimentos*. Alhambra. México, D. F.
46. Picallo, A. 2002. *El análisis sensorial como herramienta de calidad carne y productos cárnicos de cerdo*. Jornadas Regionales de Actualización en el Sector Lácteo y Porcino. Tandil, Argentina.
47. Ramos, A. e Ibartz, A. 2006. Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles. Cienc. Tecnol. Aliment. 26(1):214-219.
48. Richlandtown G.S. 2003. Fermented Foods and Healthy Digestive Functions. Danone World Newsletter, Ed. Jonh Libbet Eurotext.
49. Rodríguez-Palenzuela, P; García, J; De blas, C. 2000. Fibra soluble y su implicación en nutrición animal: enzimas y probióticos. Departamento de Biotecnología y Producción animal. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. pp. 1-17.
50. Robinson R. K. 2002. Dairy Microbiology Handbook. Editorial. Wiley Interscience, Tercera Edición.
51. SAGARPA. 2001. Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. <http://www.sagarpa.gob.mx/>
52. Salari, C. 2001. producción de bebidas y productos lácteos ácidos. Bergamo, Italia. 41-46 pp
53. Saray. 1979. Jorunal Academy of Sciences. Tropical legumes: Resources for the future. pp - 21-27.
54. Sastre, G. A. 2003. Fibra y prebióticos: conceptos y perspectivas. 26: 6-12

55. SEMARNAT, 2006. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Pachyrhizus erosus* (L.) Urban. Especies con Usos No Maderables en Bosques de Encino, Pino y Pino-Encino en los Estados de Chihuahua, Durango, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Información en línea: <http://www.semarnat.gob.mx/pfnm/PachyrrhizusErosus.html>
56. Sendra, E., Fayos, P., Lario, Y., Fernández-López, J., Sayas-Barberá, E., Pérez-Alvarez, J.A. (2008). Incorporation of citrus fibers in fermented milk containing probiotic bacteria. *Food Microbiology*, 25, 13-21.
57. SIACON, 2005. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. SIAP-SAGARPA. Consulta en la base de datos para el cultivo de jícama. La base de datos se bajo de la página de internet: <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/sistemas/siacon/SIACON.html>
58. Sorensen, M. 1996. Yam Bean (*Pachyrhizus* D.C.) Promoting the Conservation and use of underutilized and neglected crop. 2 Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gaterlieber International Plant Genetic Resources Institute Rome.
59. Schneeman, B.O. (1999). Fiber, inulin and oligofructose: similarities and differences. *Journal of Nutrition* 129, 1424S-1427S.
60. Steventon, A.J. 1990. The rheology of yogurt. En *Rheology of Food, Pharmaceutical and Biological Materials whit general Rheology*. R.E. Carter Ed. Elsevier Applied Science. Pp: 197-210.
61. Tunland, B.C., Meyer, D. (2002). Nondigestible oligo- and polysaccharides (dietary fiber): their physiology and role in human health and food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 1, 73-92.
62. Trumbo, P., Schliker, S., Yates, A., Poos, M. (2002). Dietary references intakes for energy carbohydrate, fiber, fatty acids, cholesterol, protein, and amino acids. *Journal of the American Dietetic Association*, 102 (11), 1621-1630.
63. Zarzuelo, A, y Gálvez J. 2005. Fibra dietética: Tratado de Nutrición. España. 336-368.

CAPITULO I.
MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES REOLÓGICAS DE UNA BEBIDA
LACTEA FERMENTADA ADICIONADA CON FIBRA SOLUBLE DE JÍCAMA
(*Pachyrhizus erosus*)

MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES REOLÓGICAS DE UNA BEBIDA LÁCTEA FERMENTADA ADICIONADA CON FIBRA SOLUBLE DE JÍCAMA (*Pachyrhizus erosus*)

MICROSTRUCTURE AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF A FERMENTED LACTIC BEVERAGE CONTAINING SOLUBLE JICAMA FIBER (*Pachyrhizus erosus*)

LAURIANO RAMOS SOLÍS
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Bajo la dirección de la Dra. Consuelo Lobato Calleros

RESUMEN

Se investigaron las contribuciones reológicas y estructurales de fibra soluble de jícama en bebidas lácteas fermentadas (LB). Los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') como una función de la deformación (%), el comportamiento de flujo, sinéresis y micrografías electrónicas de barrido de una LB conteniendo fibra soluble de jícama ($BL_{FJ1.0}$) y una LB sin la adición de fibra (BL_{CSF}) fueron determinados. La bebida BL_{CSF} exhibió valores más elevados de G' y G'' en la región viscoelástica lineal, en comparación con aquellos exhibidos por la bebida $BL_{FJ1.0}$. El comportamiento de flujo de las bebidas fue descrito por el modelo de Herschel-Bulkley. La adición de fibra soluble de jícama resultó en una bebida $LB_{FJ1.0}$, cuya estructura estuvo formada por agregados de micelas de caseína cubiertos con estructuras fibrosas atribuidas a los componentes de la fibra soluble de jícama, la cual mostró mayor carácter pseudoplástico y consistencia, pero menor esfuerzo de fluencia que la estructura originada en la bebida BL_{CSF} . Esta última constituida por agregados de micelas de caseína más compactos que los observados en la bebida $BL_{FJ1.0}$. La fibra soluble de jícama redujo el nivel de sinéresis de la LB.

Palabras claves: reología, bebida láctea fermentada, fibra soluble, jícama

ABSTRACT

The structural and rheological contributions of soluble jicama fiber in fermented lactic beverage (LB) were investigated. The storage (G') and loss (G'') moduli as a function of strain (%), flow behavior, syneresis, and scanning electron micrographs of a fermented lactic beverage containing soluble jicama fiber ($BL_{FJ1.0}$) and of a control fermented lactic beverage without added fiber (BL_{CSF}) were determined. The BL_{CSF} beverage exhibited higher G' and G'' values in the linear viscoelastic region in comparison with those exhibited by the $BL_{FJ1.0}$ beverage. The flow behavior of the beverages was described using the Herschel-Bulkley model. Added soluble jicama fiber resulted in a $LB_{FJ1.0}$ beverage whose structure was formed by casein micelles aggregates covered with fibrous structures attributed to the soluble jicama fiber components, which showed higher pseudoplastic character and consistency, but lower yield stress than the structure originating in the BL_{CSF} beverage. The latter had more compact casein micelle aggregates than those observed in the $LB_{FJ1.0}$. The soluble jicama fiber reduced the syneresis level of the fermented lactic beverages.

Key words: rheology, fermented lactic beverage, soluble fiber, jicama

I. INTRODUCCIÓN

La fibra de los alimentos apoya la conservación de la salud y la prevención de enfermedades en los seres humanos. Diversos estudios epidemiológicos han establecido que existe una relación entre el consumo de fibra de los alimentos y la reducción de riesgo de varias enfermedades crónicas, incluyendo cáncer de colon, enfermedades cardiovasculares, obesidad, diabetes, diverticulosis de colon y constipación, entre otras (Ascherio y Willet, 1995; Kim, 1995; Schneeman, 1999). Dietas altas en fibra generalmente reflejan un estilo de vida más saludable; sin embargo, mundialmente la ingesta de fibra es menor respecto a la cantidad recomendada de 38 g para los hombres y 25 g para las mujeres (Trumbo *et al.*, 2002; Beristain *et al.*, 2006). Incrementos del consumo de fibra ha sido un reto difícil, ya que las fuentes de fibra comúnmente usadas en la formulación y preparación de alimentos enriquecidos con fibra, no contribuyen a mejorar el sabor y propiedades texturales (Beristain *et al.*, 2006). Es importante entonces, que los ingredientes con altos contenidos en fibra utilizados en la obtención de alimentos fortificados o enriquecidos con este componente, sino que también exhiban ciertas propiedades funcionales que mejoren la calidad de esos alimentos (Tunland and Meyer, 2002). La fibra dietética ha sido definida por la American Association of Cereal Chemist (2001), como la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado de los seres humanos, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso. La fibra dietética incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y algunas otras

sustancias asociadas a las plantas (Tunland y Meyer, 2002). La fibra está presente en todas las plantas que son ingeridas como alimentos, incluyendo frutas, hortalizas, granos y legumbres; sin embargo, sus composición varía con la fuente; así la celulosa es más abundante en los granos de cereales, mientras que las pectinas son constituyentes importantes de la fibra proveniente de frutas, papa y betabel (Grain, 2006). Las diferencias en composición de la fibra son importantes al considerar las propiedades funcionales de los alimentos preparados industrialmente, puesto que durante el procesamiento los componentes de la fibra pueden interaccionar con aquellos originalmente contenidos en el alimento y modificar el sabor y textura (Sendra *et al.*, 2008). Para obtener alimentos con mayor calidad se sugiere usar fibras obtenidas de vegetales distintos a los convencionalmente usados, de esta manera se contribuirá a una mayor diversidad de propiedades funcionales en los alimentos enriquecidos con fibra. En este estudio la fuente no convencional de fibra, que se está proponiendo es la jícama (raíz modificada de las plantas de la especie *Pachyrhizus erosus*).

Las bebidas lácteas fermentadas son consideradas benéficas para la salud debido a la acción de sus bacterias viables; son pobres en fibra, por lo que se propone enriquecerlas con este componente para incrementar su valor alimenticio. Además, los componentes de la fibra pueden prevenir la agregación de la proteína de estas bebidas durante su vida de anaquel, debida a la inestabilidad de las caseínas en el pH entre 3.4 y 4.6 (Nakamura *et al.*, 2006). El enriquecimiento de un alimento requiere diversas evaluaciones para conocer

la influencia de la incorporación de los nuevos constituyentes al alimento. Este es el caso de un producto de leche fermentada, que aquí se propone enriquecer con fibra, y conocer sus características mecánicas, sensoriales y conocer estabilidad. Con base en lo antes expuesto, el objetivo de este trabajo fue conocer las modificaciones en la microestructura y las características reológicas debidas a la adición de fibra soluble de jícama (*Pachyrhizus erosus*) en una bebida láctea fermentada; así como la relación entre el arreglo estructural generado entre los componentes de la bebida láctea con sus propiedades reológicas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Extracción y purificación de fibra soluble e insoluble de jícama (*Pachyrhizus erosus*)

Previo a la extracción de la fibra, se determinó el contenido de humedad de jícama (*Pachyrhizus erosus*) cultivar Morelos, mediante secado por liofilización (método analítico 930.15, AOAC, 2000); con base en los resultados obtenidos se calculó la concentración de sólidos de esta raíz tuberosa.

Los polisacáridos constituyentes de la fibra de jícama (pectina, hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas y celulosa) fueron extraídos y subsecuentemente cuantificados, mediante la metodología descrita por Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2006), la cual involucra la combinación de métodos de extracción en secuencia, purificación por diálisis y liofilización. De acuerdo a la metodología señalada, se realizó una extracción secuencial de los polisacáridos en el siguiente orden: extracción de pectina (Fig. 1) con una solución acuosa de oxalato de amonio (Reasol^{MR}, México, D.F.) (0.5 g/100 mL); extracción de hemicelulosas débilmente unidas (Fig. 2) y hemicelulosas fuertemente unidas (Fig. 3) con soluciones acuosas de KOH (Reasol^{MR}, México, D.F.) con concentraciones de 5 g/100 mL y 24 g/100 mL, respectivamente, y extracción acuosa de celulosas (Fig. 4) a partir del residuo obtenido de las extracciones antes mencionadas. Los polisacáridos extraídos fueron purificados por diálisis (membranas de diálisis, número 6, Spectrum Laboratories, Inc. CA,

EUA) contra agua destilada (Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2006), congelados (- 5°C) y liofilizados (liofilizador modelo 195, Lanconco, Inglaterra) a una temperatura de - 49 °C y una presión de 0.420 mBar).

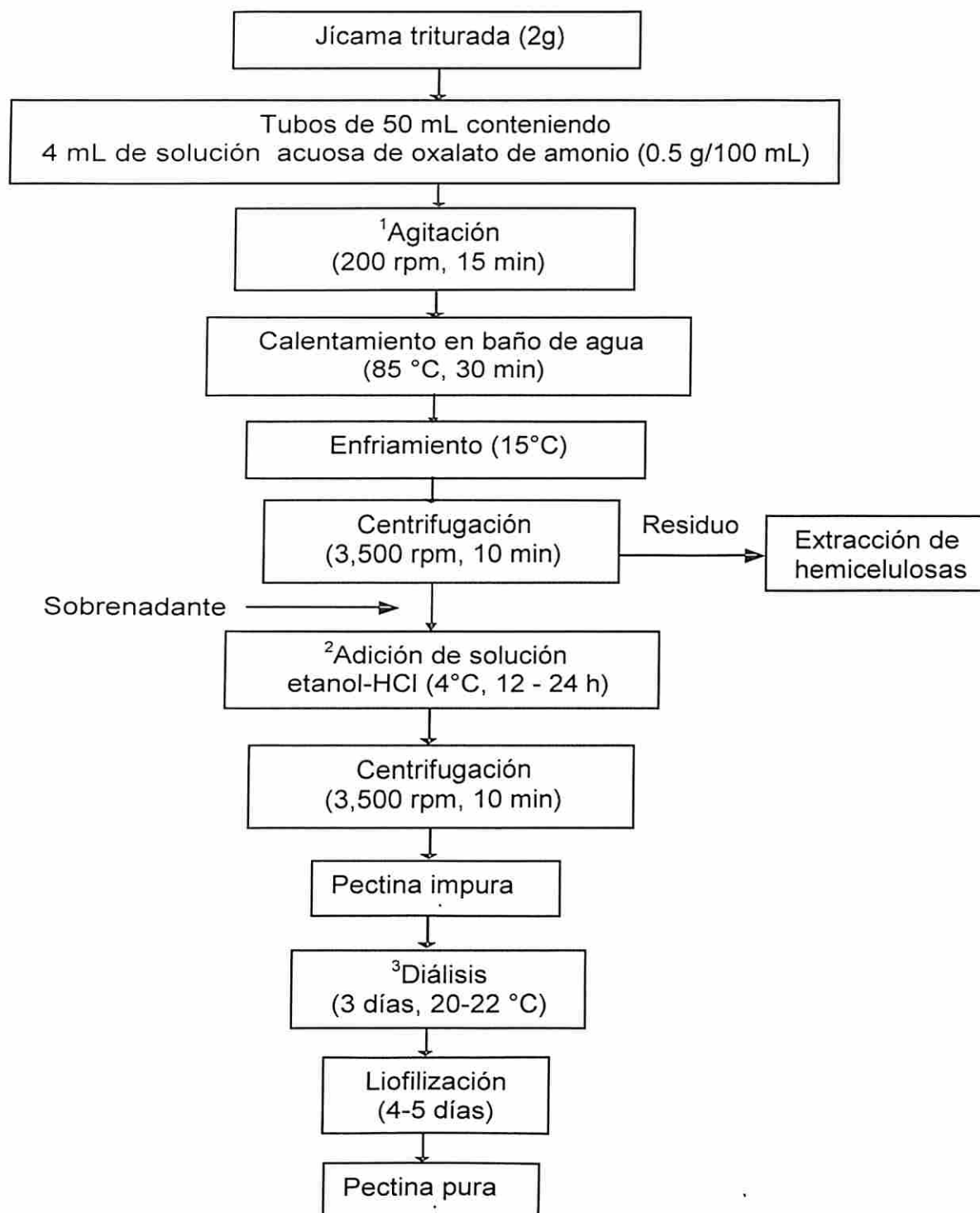


Figura 1. Extracción y purificación de pectina de jícama (*Pachyrhizus erosus*).¹

Usando un agitador orbital (Instrumental Pasteur SRL®, PRO Scientific, Modelo Vsos-4p, Serie No. 57-01046, EUA). ²Adición al sobrenadante de una disolución etanol-HCl (99 mL: 0.1 mL), en una relación de volumen de 3:1. ³ Diálisis contra agua destilada, usando membranas de diálisis (Spectrum Laboratories, Inc., CA, EUA) y cambiando el agua cada 2 h.

Fuente: Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2006).

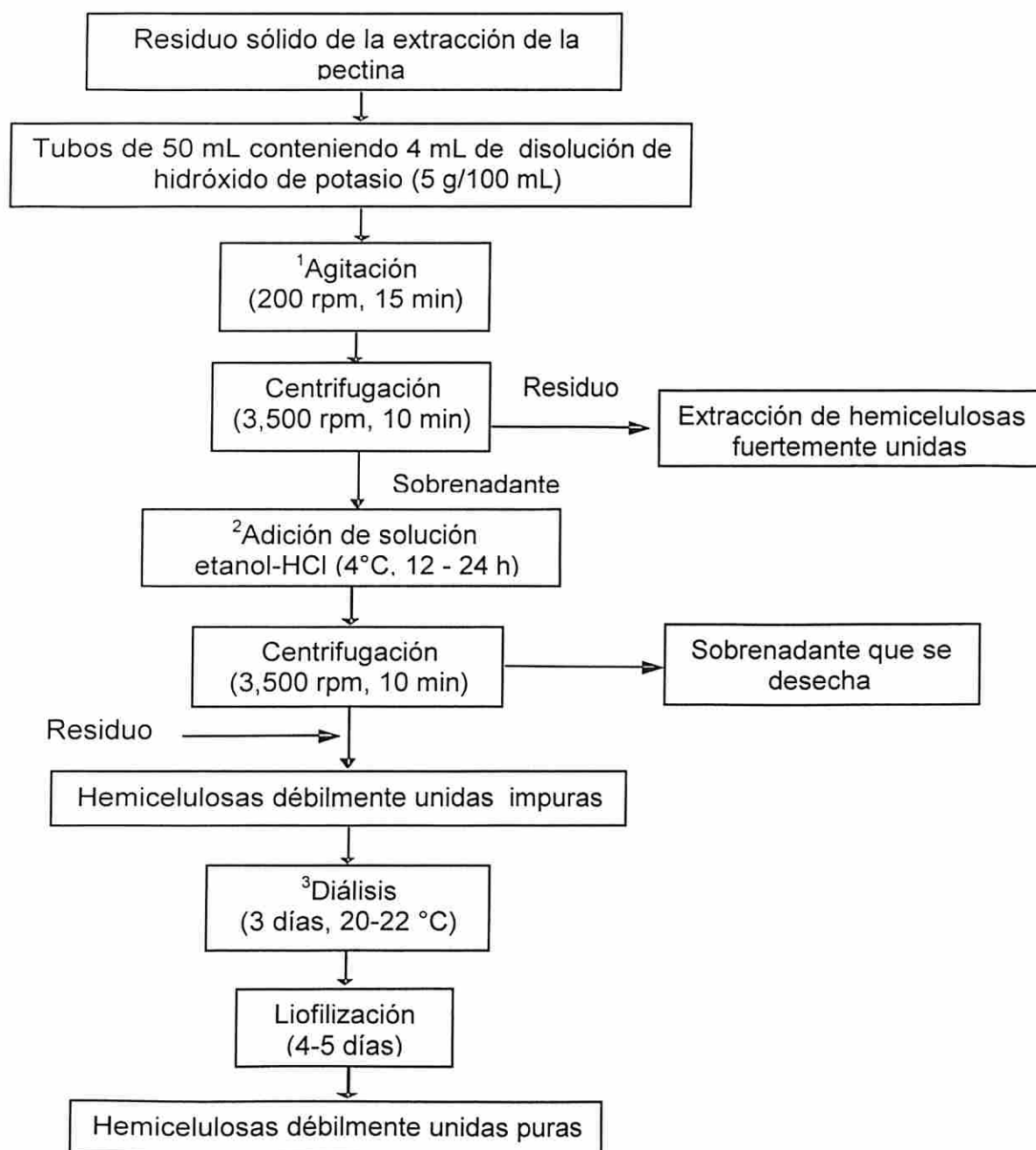


Figura 2. Extracción y purificación de hemicelulosas débilmente unidas de jícama (*Pachyrhizus erosus*). ¹Usando un agitador orbital (Instrumental Pasteur SRL®, PRO Scientific, Modelo Vsos-4p, Serie No. 57-01046, USA). ²Adición al sobrenadante de una disolución etanol-HCl (99 mL: 0.1 mL), en una relación de volumen de 3:1. ³ Diálisis contra agua destilada, usando membranas de diálisis (Spectrum Laboratories, Inc., CA, USA) y cambiando el agua cada 2 h.
Fuente: Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2006).

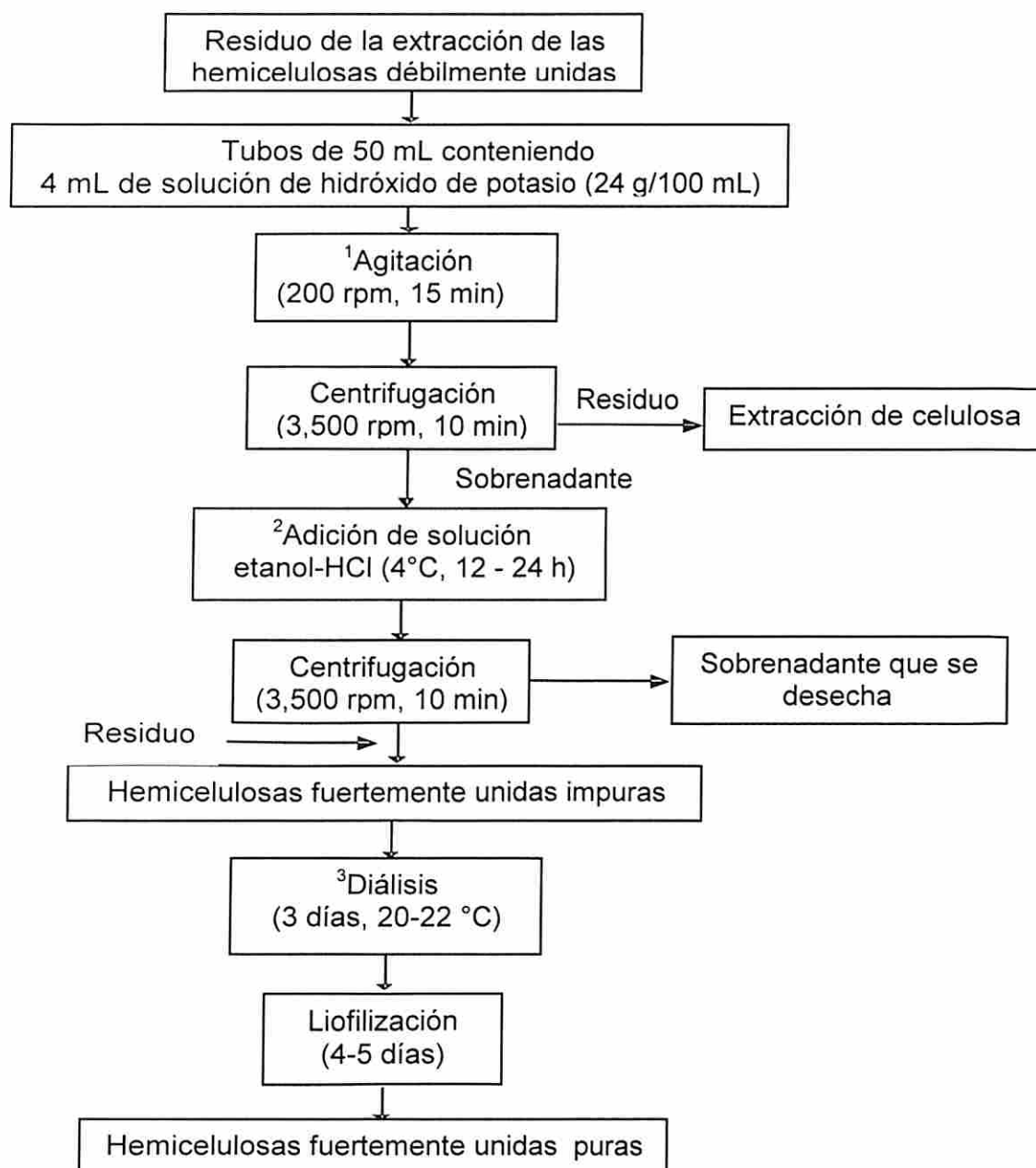


Figura 3. Extracción y purificación de hemicelulosas fuertemente unidas de jícama (*Pachyrhizus erosus*). ¹Usando un agitador orbital (Instrumental Pasteur SRL®, PRO Scientific, Modelo Vsos-4p, Serie No. 57-01046, USA). ²Adición al sobrenadante de una disolución etanol-HCl (99 mL: 0.1 mL), en una relación de volumen de 3:1. ³ Diálisis contra agua destilada, usando membranas de diálisis (Spectrum Laboratories, Inc., CA, USA) y cambiando el agua cada 2 h. Fuente: Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2006).

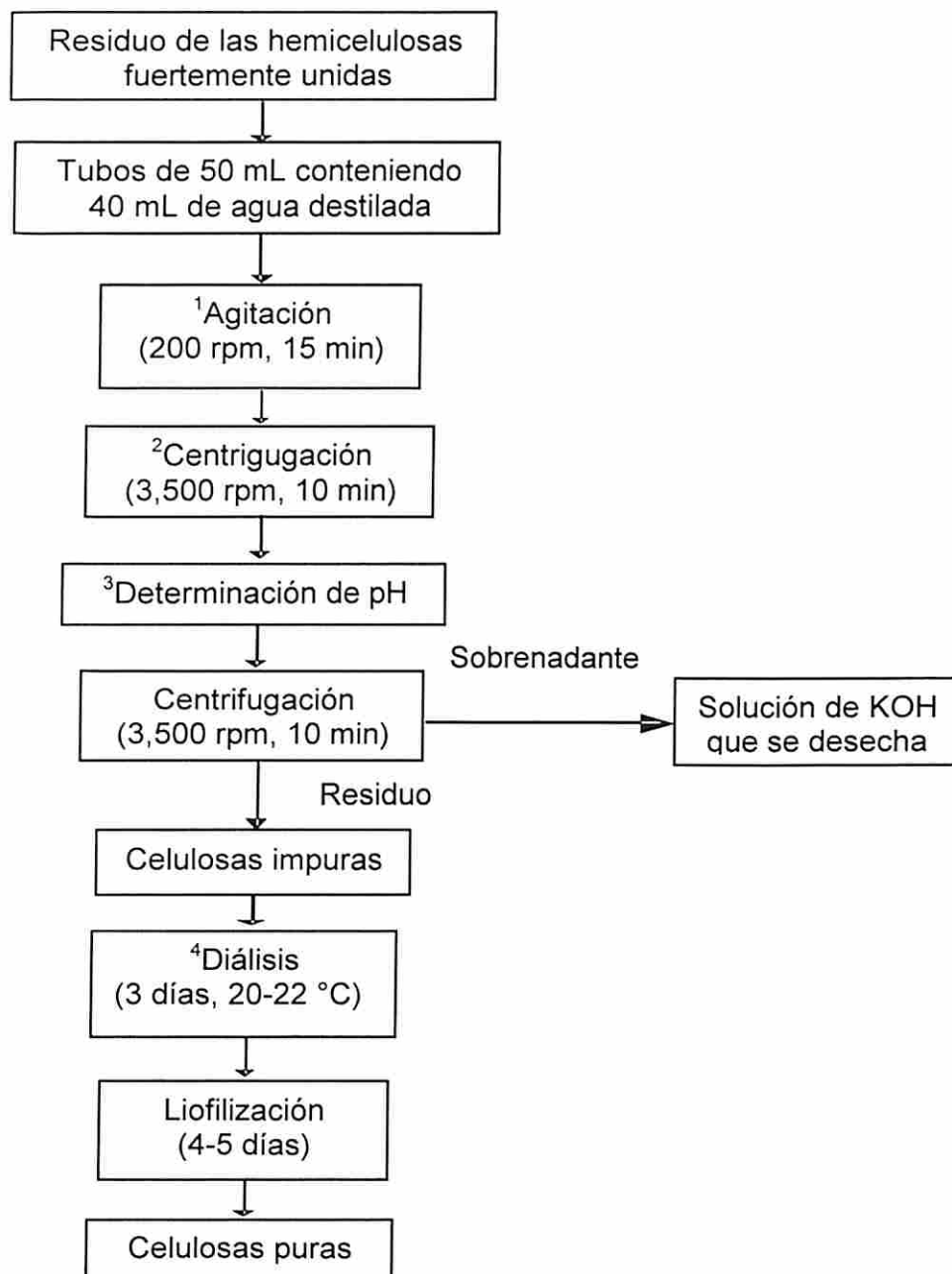


Figura 4. Extracción y purificación de celulosas de jícama (*Pachyrhizus erosus*).

¹Agitación usando (PRO, Modelo Vsos-4p, Serie No. 57-01046, USA). ^{2 y 3} se realizaron hasta alcanzar un pH de 7, en caso de no ser así se realizan los enjuagues necesarios, con agua destilada (5 a 7 enjuagues) hasta llegar al pH neutro. ⁴Diálisis contra agua destilada, usando membranas de diálisis (Spectrum Laboratories, Inc., CA, USA) y cambiando el agua cada 2 h.

Fuente: Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2006).

Las cantidades de los diferentes tipos de polisacáridos se pesaron secos en una balanza analítica, para determinar la cantidad de cada uno y se expresaron en g por cada 100g de tejido húmedo y seco de jícama.

2.2. Determinación del índice de metoxilo de la pectina de jícama

La determinación del índice de metoxilo de la pectina de jícama se realizó de acuerdo al método propuesto por McCready (1999): muestras de pectina (alrededor de 500 mg) se adicionaron con 25 mL de NaOH 0.25 N y dejaron reposar durante 1 h a temperatura ambiente (20-22 °C); posteriormente, se adicionaron 25 mL de HCL 0.25N a las muestras y dejaron reposar durante 30 min a temperatura ambiente; finalmente, se procedió a realizar una titulación con NaOH a 0.1 N y 3 gotas de fenolftaleína como indicador. El porcentaje de metilación o índice de metoxilo se calculó con la siguiente relación:

$$\text{MeO (\%)} = \frac{\text{meq de NaOH} \times 31 \times 100}{\text{mg de muestra}}$$

2.3. Proceso de elaboración de las bebidas lácteas fermentadas

Se elaboraron dos variantes de bebidas lácteas fermentadas (BL): BL_{CSF}, exenta de fibra de jícama y usada como control, y BL_{FJ1.0}, enriquecida con 1 g de fibra soluble [pectina-hemicelulosas débilmente unidas (1:1)] de jícama/100 mL. Ambas bebidas se prepararon a partir de leche hidratada que contenía 2.2 g de grasa láctea/100 mL y 9.8 g de sólidos lácteos no grasos/100 mL. Lotes de

1 L de leche hidratada se prepararon a partir de cantidades adecuadas de leche entera en polvo (NIDO®, Nestlé, S.A. de C.V. México) y leche descremada en polvo (Lactomix®, DILAC, S.A. de C.V. México), las cuales se dispersaron en agua a una temperatura de 40 °C, con agitación continua (4000 rpm, durante 3 min) con un homogenizador Ultra-Turra T-50 basic. (IKA Works, Inc., Wilmington, EUA). Los lotes de leche se dejaron reposar a 4 °C durante 24 h para lograr completa hidratación. Posteriormente, 6 g de azúcar se incorporaron por cada 100 mL de leche mediante agitación (Figura 5). A la leche destinada para la preparación de la bebida BL_{FJ1.0} se le adicionó 1 g de fibra soluble/100 mL. Previamente, la fibra se hidrató en agua a una temperatura de 35 °C, aplicando agitación con una barra magnética durante 30 min. La leche con y sin fibra, fue pasteurizada (85 ± 1 °C, 15 min), enfriada (45 ± 1 °C) e inoculada con un cultivo láctico liofilizado, de inoculación directa (*Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus bulgaricus* y *Lactobacillus lactis*, CHOOZIT MY 800 – 5 DCU, Danisco Francia SAS 220 Dange Saint Romain, Francia). La fermentación de la leche se llevó a cabo a 45 ± 1 °C, hasta obtener una acidez titulable de 80 a 85 °D. Una vez obtenida la acidez requerida, las bebidas lácteas se enfriaron y almacenaron a 4 °C durante 24 h; después de este tiempo las bebidas se retiraron de refrigeración y se batieron aplicando agitación suave con una varilla de vidrio. Las bebidas lácteas se almacenaron bajo refrigeración (4 °C) hasta su caracterización química, microestructural y reológica. Cada variación de BL se elaboró por triplicado, usando un diseño experimental completamente al azar.

2.4. Determinación de la microestructura de la jícama y de las bebidas lácteas fermentadas

Tiras de jícama, de aproximadamente 2 cm de altura, 1 cm de grosor y 10 cm de longitud, se liofilizaron (liofilizador modelo 195, Lanconco, Inglaterra) durante 5 días a una temperatura de - 49 °C y una presión de 0.420 mBar. Posteriormente, las tiras de jícama se cortaron en cuadros de 1 cm por lado, se recubrieron con una capa delgada de oro en un Fine Coat Ion Sputter JFC1100 (Jeol Ltd., Akishima, Japón) (Sandoval-Castilla *et al.*, 2004) y observaron en un microscopio electrónico de barrido de alto vacío, JEOL Scanning Microscope - 5410 (Jeol Ltd., Akishima, Japón), a 10 KV. Se tomaron micrografías representativas de muestras correspondientes al menos a tres piezas de jícama, a ampliaciones de 200, 500, 1 500 y 5 000×.

Para la determinación de la microestructura de las bebidas lácteas fermentadas, el arreglo estructural del gel se fijó mediante el uso de una dispersión de agar estéril (1 g de agar/100 mL de agua, sometida a 121 °C durante 15 min y enfriada a 30 °C). Se colocó una capa muy delgada de agar (de alrededor de 1 cm de grosor) en una caja petri, seguida de una capa de bebida láctea (de alrededor de 1.5 cm de grosor) y nuevamente una capa de agar (de alrededor de 1 cm de grosor). La bebida láctea y agar se agitaron suavemente, se dejaron gelificar a temperatura ambiente (20-22 °C) y cortaron en cubos de 1 cm por lado aproximadamente, con una navaja de acero inoxidable. Las muestras de bebida láctea-agar se fijaron en una disolución de glutaraldehído al 2 % en

buffer de fosfatos (0.1 M, pH 7.2) por 2 h y se deshidrataron mediante su inmersión en disoluciones acuosas de etanol de concentraciones crecientes (30, 50, 60, 70, 80, 90 y 100%) y permanencia por 30 min en cada una. Al finalizar el proceso de deshidratación en etanol absoluto las muestras, se secaron a punto crítico en un equipo Sample Drying at Critical Point Samdri 780 A (Tousimis, Rockville Research Corporation, MD, EUA) y se recubrieron con una capa delgada de oro en un Fine Coat Ion Sputter JFC1100 (Jeol Ltd., Akishima, Japón) (Sandoval-Castilla *et al.*, 2004). Finalmente, las muestras se observaron en un microscopio electrónico de barrido de alto vacío, JEOL Scanning Microscope -5410, (Jeol Ltd., Akishima, Japón), a 10 KV. Se tomaron micrografías representativas de tres muestras de cada tratamiento, con dos niveles de amplificación 1 000 y 5 000×.

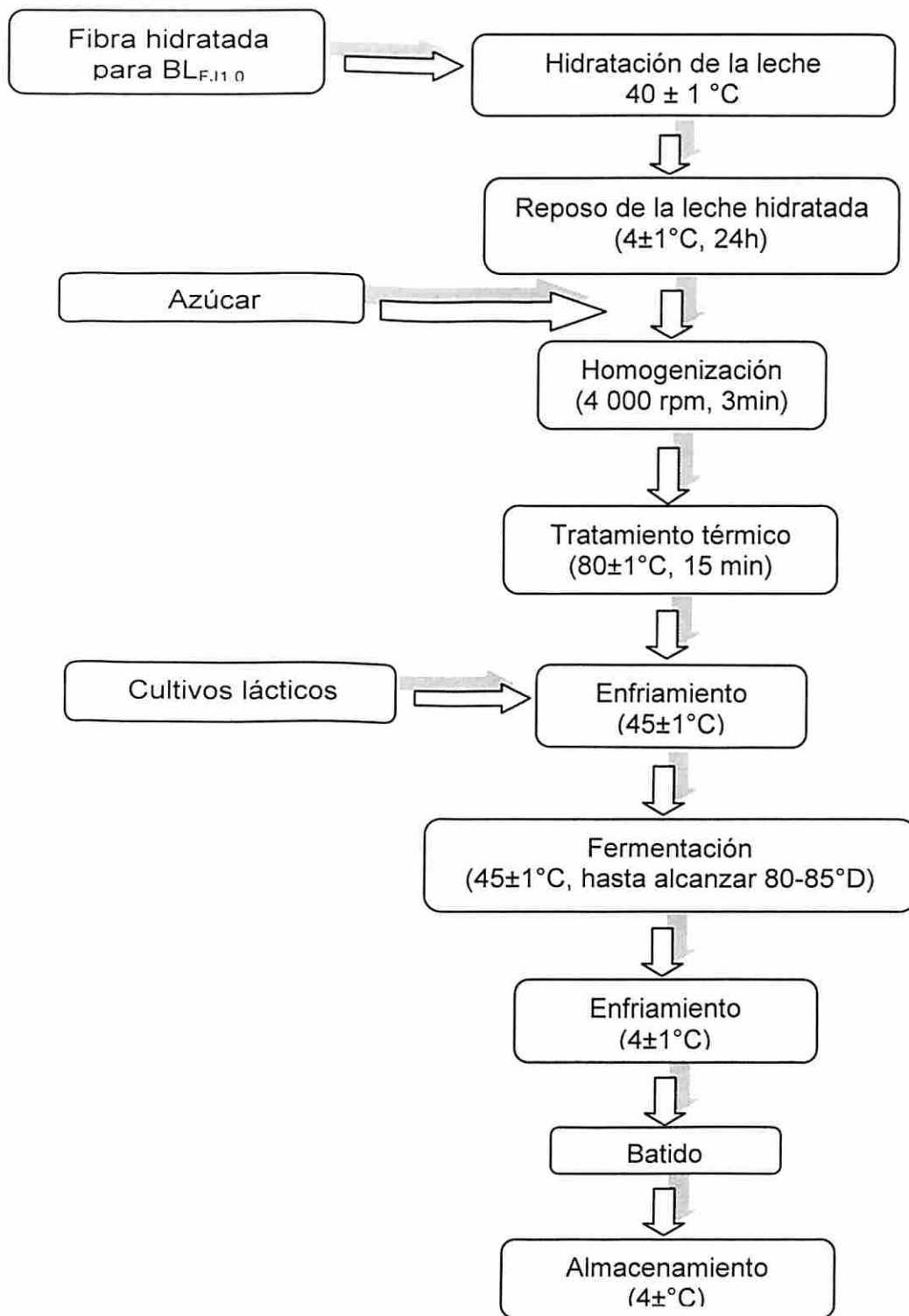


Figura 5. Proceso de elaboración de las bebidas lácteas
Fuente: Sandoval-Castilla *et al.* (2004)

2.5. Determinación de las propiedades reológicas de las bebidas lácteas fermentadas

Las bebidas lácteas fermentadas se sometieron a barridos de amplitud en un reómetro dinámico (Physica MCR 301 Dynamic Shear Rheometer, Anton Paar Messtechnik, Stuttgart, Alemania), con una geometría de cono-plato, en la cual el cono rotatorio tuvo 50 mm de diámetro y un ángulo de 1° (CP50-1-SN5550). El gap se fijó en 0.051 mm. Muestras de las bebidas lácteas (0.5 mL) se colocaron cuidadosamente en el plato y dejaron reposar por 30 min para la recuperación de su estructura y la homogenización de la temperatura. Posteriormente, las muestras de las bebidas se sometieron a deformaciones en el rango de 0.05 a 100 %, a una frecuencia de 1 Hz y una temperatura de 4°C (Recillas-Mota, 2005). El mantenimiento de la temperatura se logró mediante un sistema de medición y control de temperatura Physica TEK 150P (Physica Messtechnik, Stuttgart, Alemania). Mediante el software RheoPlus/32 V2.62, se obtuvieron los valores del módulo de almacenamiento o elástico (G'), módulo de pérdida o viscoso (G'') y factor de cedencia ($\tan \delta$) (G''/G') de las bebidas lácteas fermentadas. Además, se realizaron pruebas rotatorias de flujo a las bebidas, mediante la aplicación de velocidades de cizalla de 1 hasta 300 s^{-1} . Los datos generados en las curvas de flujo (velocidad de cizalla contra viscosidad y velocidad de cizalla contra esfuerzo cortante) se analizaron con el paquete RheoPlus/32 V2.62. Las determinaciones reológicas antes mencionadas se realizaron por triplicado a uno, siete y 14 días después de que las bebidas fueron preparadas.

2.6. Evaluación sensorial de las bebidas lácteas fermentadas

Para determinar si los consumidores distinguirían diferencias en los atributos sensoriales de las bebidas lácteas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$, se realizó una prueba triangular con consumidores, a los doce días de elaboración. Esta prueba se efectuó con 80 consumidores de bebidas lácteas fermentadas, a los cuales se les proporcionó la bebida control B_{CSF} y la bebida $BL_{FJ1.0}$ enriquecida con la fibra (una de ellas por duplicado), y se les solicitó que indicaran cuál de ellas era distinta. Los consumidores que participaron en estas pruebas incluyeron estudiantes, personal administrativo y profesores de la Universidad Autónoma Chapingo, con edades entre los 18 y 53 años. Las bebidas lácteas se codificaron con tres dígitos aleatorios y se proporcionaron de manera aleatoria a los consumidores, en porciones de 30 g en vasos de polietileno. También se solicitó a los consumidores que indicaran la característica sensorial, en caso de haberla, que les permitió diferenciar las bebidas. Los resultados se analizaron de acuerdo a lo propuesto por Meilgaard (1999).

2.7. Análisis de datos

Los datos de composición química, sinéresis y características reológicas de las bebidas lácteas fermentadas se sometieron a análisis de varianza de clasificación simple ($p \leq 0.05$); y en los casos pertinentes se aplicó la prueba de Tukey de comparación de medias ($p \leq 0.05$). El análisis de datos se efectuó con

el paquete estadístico Statgraphics versión 7 (Statistical Graphics Corp.
Manugistic, Inc. M.A., EUA).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Contenidos de fibra soluble e insoluble de la jícama

La jícama (*Pachyrhizus erosus*) objeto de este estudio, mostró un contenido de humedad de 90.29 ± 0.4 % y en consecuencia un contenido de sólidos de 9.71 ± 0.4 %. Valores similares se encuentran en la literatura. Por ejemplo, El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, (USDA, 2006), informó un contenido de humedad de la jícama de 90.07 % y un contenido de materia seca de 9.93 %. Sorensen (1990) y Heredia (1996) señalaron que la humedad de la jícama es sumamente variable y dependiente de factores externos como la región, labores de cultivo y la época de siembra; de esta manera el contenido de humedad de la jícama puede variar desde 78 hasta 94 %.

Los contenidos de fibra total de la jícama, determinados mediante extracciones y purificaciones secuenciales, se presentan en el cuadro 1. La jícama contiene 3.5 g de fibra dietética total/100 g de tejido fresco; mientras que en base seca el contenido es de 36 g/100 g. El primer dato se encuentra cercano al valor de 3.33 g de fibra total/100 g de tejido fresco de jícama, informado por Brito y Espín (1999), pero difiere del valor de 2.02 g de fibra total/100 g de tejido fresco de jícama indicado por Alanís *et al.* (1996). Diferencias en los contenidos de fibra de la jícama han sido atribuidos a variaciones en su contenido de humedad y de materia seca, encontrándose en la literatura que estos últimos pueden

variar desde 8.89 a 13.72 g/100g, en dependencia de la variedad de la jícama Brito y Espín (1999). Es importante señalar que otros factores, aparte de la variabilidad genética, como las prácticas culturales, el clima y el tipo de suelo, pueden influir en el contenido de materia seca de la jícama y en consecuencia en su contenido de fibra dietética (INIAP, 2000).

Cuadro 6.
Contenidos de fibra dietética total, fibra insoluble y fibra soluble
(medias $\pm$ desviación estándar) en jícama

Componente	g/100g (base húmeda)	g/100g (base seca)
Fibra insoluble:	2.10	21.63
Hemicelulosas fuertemente unidas	1.4 $\pm$ 0.00	14.4 $\pm$ 0.00
Celulosa	0.7 $\pm$ 0.01	7.2 $\pm$ 0.01
Fibra soluble:	1.40	14.42
Pectinas	0.6 $\pm$ 0.00	6.2 $\pm$ 0.00
Hemicelulosas débilmente unidas	0.8 $\pm$ 0.01	8.2 $\pm$ 0.01
Fibra dietética total	3.50	36.05

La fibra total de la jícama estuvo constituida por 60 % de fibra insoluble en agua (2.1 g de fibra insoluble/3.5 g de fibra total, en base húmeda) y 40 % de fibra soluble en agua (1.4 g de fibra soluble/3.5 g de fibra total, en base húmeda) (Cuadro 1). El mayor contenido de fibra insoluble respecto al de fibra soluble en la jícama, es acorde a lo informado para la composición de la fibra de vegetales. Li *et al.* (2002) determinaron los contenidos de fibra total, fibra soluble y fibra insoluble de varios vegetales crudos; entre ellos brócoli, coliflor, zanahorias, lechuga y espinacas. Estos autores informaron que el contenido de fibra total de

los vegetales estudiados (g/100 g en base húmeda) varió de 0.98 en la lechuga a 3.5 en el brócoli; mientras que el contenido de fibra soluble (g/100 g en base húmeda) varió de 0.1 en la lechuga a 0.77 en las espinacas y el contenido de fibra insoluble (g/100 g en base húmeda) varió de 0.88 en la lechuga a 3.06 en el brócoli. En todos los casos el contenido de fibra insoluble fue mayor al contenido de fibra soluble; por ejemplo, la zanahoria contuvo 79.5 % de fibra insoluble y 20.5 % de fibra soluble.

Aunque se considera que deben desaparecer de la nomenclatura sobre fibra términos como soluble/insoluble, fermentable/no fermentable y viscosa/no viscosa, estas propiedades son la base de su funcionalidad, por lo que desde un punto de vista práctico continúan utilizándose (Escudero y González, 2006). Los componentes de la fibra soluble en contacto con el agua forman un retículo donde queda atrapada, originándose soluciones de gran viscosidad. Los efectos derivados de la viscosidad de la fibra son los responsables de sus acciones sobre el metabolismo lipídico, hidrocarbonado y en parte de su potencial anticarcinogénico. Los componentes de la fibra insoluble por su parte, son capaces de retener el agua en su matriz estructural y forman mezclas de baja viscosidad; esto produce un aumento de la masa fecal que acelera el tránsito intestinal. Lo anterior es la base para utilizar la fibra insoluble en el tratamiento y prevención de la constipación crónica. También contribuye a disminuir la concentración y el tiempo de contacto de potenciales carcinogénicos con la mucosa del colon (Kim, 2000).

3.2. Grado de metilación (índice de metoxilo) de la pectina de jícama

El grado de metilación o índice de metoxilo de la pectina de jícama fue de 10.42 $\pm$ 0.2 %. Este valor permite la clasificación de la pectina de jícama como de bajo metoxilo. El grado de metilación o índice de metoxilo es definido como el porcentaje de grupos carboxilo esterificados con metanol. Si más del 50 % de los grupos carboxilo se encuentran metilados, las pectinas son denominadas como de alto metoxilo; si menos del 50 % están metilados, las pectinas son llamadas de bajo metoxilo. Cuando menos del 10 % de los grupos están metilados, se trata de ácido péctico (Voragen *et al.*, 1995).

3.3. Microestructura de la jícama

Mediante la técnica de microscopia electronica de barrido fue posible observar la microestructura de la jícama (*Pachyrhizus erosus*) liofilizada, a distintas magnificaciones (Fig. 6). La microestructura de la jícama consistió de células de tamaños variables con paredes celulares delgadas (Figs. 6a y 6b) (Mudahar y Jen, 2006), con superficies lisas y uniformes (Fig. 6c). En el interior de las células se encontraron numerosos gránulos de almidón (Figs. 6a y 6b), los cuales tuvieron en general forma poligonal con diámetros transversal y longitudinal que variaron de 2.1 a 8.2 μm y de 2.5 a 9.6 μm , respectivamente. Stevenson *et al.* (2007), informaron que los gránulos de almidón de jícama cultivada en Texas y en dos localidades de México, fueron esféricos o poligonales, con diámetros que variaron de 1 a 13 μm . El tamaño y forma de los

gránulos de almidón son característicos de cada especie y su estructura rígida está formada por capas concéntricas de amilosa y amilopectina, que se encuentran distribuidas radialmente y que permanecen inalterables durante la molienda, el procesamiento y la obtención de los almidones comerciales utilizados en alimentos (Espín *et al.*, 2004).

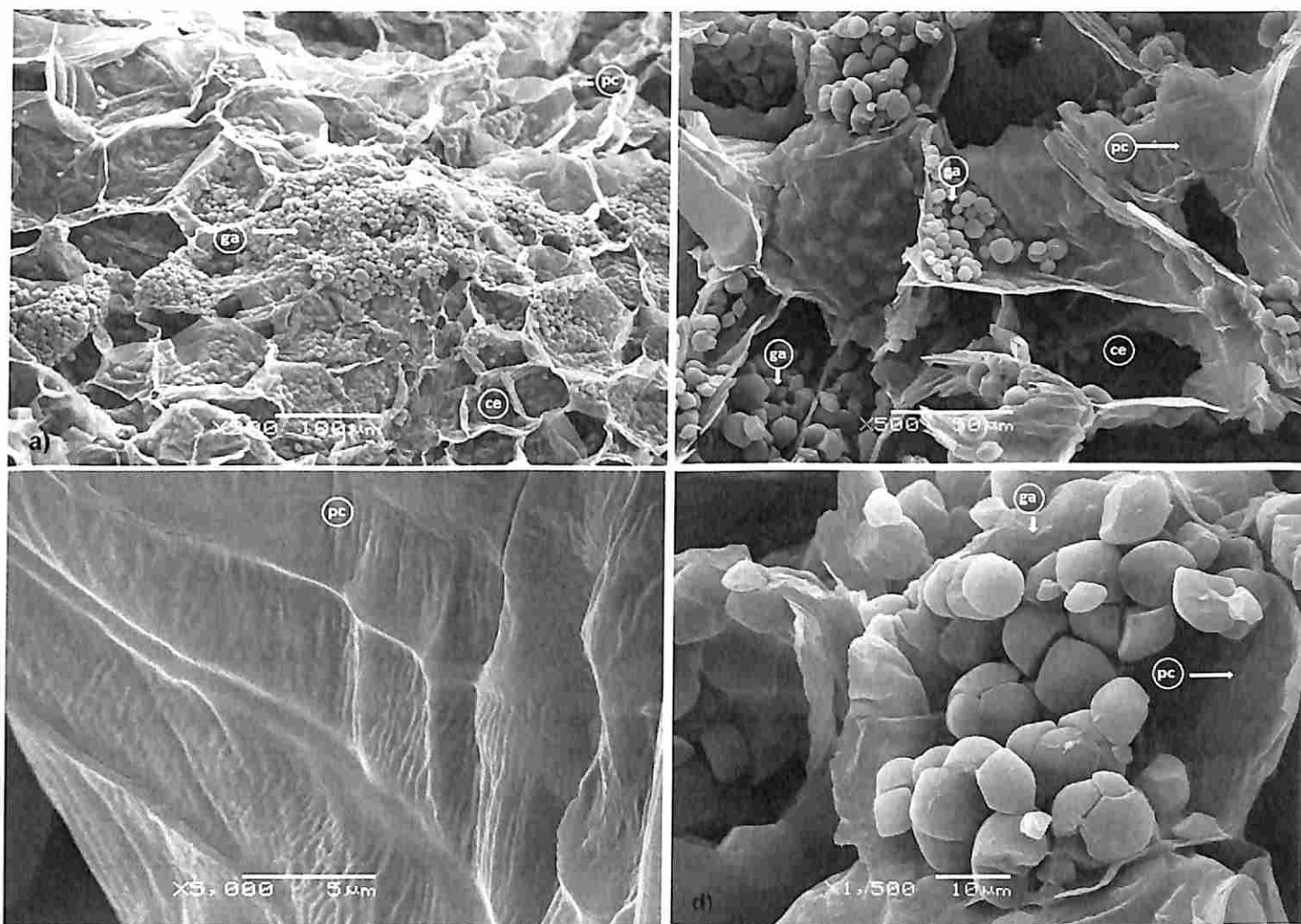


Figura 6. Micrografías electrónicas de barrido del corte transversal de jícama (*Pachyrhizus erosus*) liofilizada: (a) y (b) células de jícama (ce) con paredes celulares delgadas (pc) y numerosos gránulos de almidón (ga), magnificadas a 200 x y 500 x, respectivamente; (c) acercamiento de la estructura de la pared celular, magnificación de 5000 x y (d) gránulos de almidón (ga) con forma poligonal y tamaño variable, magnificación de 1500 x.

3.4. Composición química de las bebidas lácteas fermentadas

La composición química proximal de las bebidas lácteas fermentadas evaluadas en este estudio se presenta en el cuadro 2. La bebida control sin fibra BL_{CSF} y la bebida enriquecida con fibra soluble $BL_{FJ1.0}$, mostraron contenidos de humedad similares ($p > 0.05$), pero difirieron significativamente en sus contenidos de proteína y grasa. La adición de los sólidos correspondientes a la fibra soluble (hemicelulosas débilmente unidas y pectina) causó disminución porcentual en los contenidos de proteína y de grasa de la bebida $BL_{FJ1.0}$ (Cuadro 7).

Las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$ después de un día de preparadas, presentaron valores de acidez similares ($p > 0.05$): (84.3 ± 0.6 y 84.7 ± 0.7 °D) (Cuadro 2); sin embargo, después de 14 días de almacenamiento, la bebida $BL_{FJ1.0}$ alcanzó una acidez (93.0 ± 0.2 °D) significativamente mayor a la encontrada en la bebida BL_{CSF} (90.8 ± 0.5 °D) (Cuadro 7). Los resultados antes expuestos, indicaron mayor acidez desarrollada en la bebida láctea enriquecida con fibra soluble de jícama, respecto a aquella observada en la bebida BL_{CSF} sin fibra. Aumentos en la acidez de las bebidas lácteas fermentadas durante su almacenamiento, se relacionan directamente con la transformación progresiva de la lactosa en ácido láctico. Ramírez-Santiago (2008) informó que los valores de acidez de yogures, en los que se sustituyó la grasa láctea por emulsiones múltiples y la sacarosa por un esteviósido, aumentaron de 88.7 a 90.3 °D después de 15 días de almacenamiento. Díaz *et al.* (2004) señalaron que los valores de acidez de yogures bajos en grasa y enriquecidos con fibra

aumentaron de 65 a 110 °D, después de tres semanas de almacenamiento y concluyeron que los incrementos en acidez de los yogures no fueron afectados por la composición del yogurt (grasa y fibra), pero sí por el tiempo de almacenamiento, y a la vez con la actividad de las bacterias lácticas. Otros autores, por el contrario, han mencionado que componentes de las fibras, como oligosacáridos, pueden aumentar el crecimiento de las poblaciones microbianas del yogurt. Sendra *et al.* (2008) encontraron que la presencia de fibra cítrica en leches fermentadas, aumentó el crecimiento y supervivencia de bacterias probióticas.

Los valores de pH de las bebidas, relacionados negativamente con los valores de acidez, disminuyeron ligeramente durante el almacenamiento. Así el pH de la bebida BL_{CSF} disminuyó de 4.4 ± 0.1 después de un día de preparación a 4.2 ± 0.2 después de 14 días de almacenamiento y el pH de la bebida BL_{FJ1.0} disminuyó de 4.2 ± 0.2 después de un día de preparación a 4.0 ± 0.1 después de 14 días de almacenamiento.

Cuadro 7.
Composición química y grado de sinéresis (medias $\pm$ desviación estándar)
de las bebidas lácteas fermentadas

Código de la bebida	Humedad (g/100 g)	Proteína (g/100 g) b.h.	Grasa (g/100 g) b.h.	Sinéresis (g/100 g) (día uno)	Sinéresis (g/100 g) (día 14)	Acidez (°D) (día uno)	Acidez (°D) (día 14)
BL _{CSF}	83.5 $\pm$ 0.2 ^a	3.1 $\pm$ 0.1 ^b	2.2 $\pm$ 0.1 ^b	17.5 $\pm$ 0.1 ^b	23.3 $\pm$ 0.1 ^b	84.3 $\pm$ 0.6 ^a	90.8 $\pm$ 0.5 ^a
BL _{FJ1.0}	83.1 $\pm$ 0.5 ^a	2.6 $\pm$ 0.1 ^a	1.9 $\pm$ 0.1 ^a	11.3 $\pm$ 0.0 ^a	15.4 $\pm$ 0.0 ^a	84.6 $\pm$ 0.7 ^a	93.0 $\pm$ 0.2 ^b

BL_{CSF}: bebida láctea control sin fibra; BL_{FJ1.0}: bebida láctea con 1% de fibra soluble de jícama. Superíndices distintos en una misma columna indican diferencia significativa entre las medias. b.h: base húmeda

Los valores de sinéresis de la bebida BL_{FJ1.0}, $11.3 \pm 0.3 \%$ y $15.4 \pm 0.2 \%$, después de uno y 14 días de almacenamiento, respectivamente, fueron significativamente menores a los encontrados en la bebida BL_{CSF}, $17.5 \pm 0.1 \%$ y $23.3 \pm 0.4\%$ en los mismos períodos de almacenamiento (Cuadro 7). Los resultados antes expuestos indican que la presencia de fibra soluble de jícama contribuyó a disminuir el grado de sinéresis de la bebida BL_{FJ1.0}, tanto al inicio como al final del tiempo de almacenamiento. Conforme el pH disminuye en la leche durante la fermentación de la lactosa, disminuye la repulsión electrostática y la estérica entre micelas de caseína adyacentes, lo que ocasiona la floculación-agregación de dichas micelas (Fox y McSweeney, 1998; de Kruif, 1999). Rearreglos y sinéresis de la red de caseína inducida por acidificación ocurren durante el almacenamiento (van Vliet *et al.*, 1997). Aún cuando este proceso no ha sido comprendido completamente, la sinéresis puede ser reducida mediante: a) incrementos en el contenido de caseína de la leche (Fizman *et al.*, 1999), b) reducciones en la temperatura de incubación y en la velocidad de acidificación (Lucey, 2002) o c) adición de estabilizadores que interactúan con la red de caseína (Everett y McLeod, 2005). En esta investigación el efecto de disminución del grado de sinéresis observado en la bebida BL_{FJ1.0}, en comparación con el observado en la bebida BL_{CSF}, se atribuye a la presencia de pectina de jícama. Se ha informado que las moléculas de pectina interactúan con la caseína a través de iones calcio y previenen su agregación, sedimentación y en consecuencia la separación de lactosuero por estabilización iónica y estérica (Lucey *et al.*, 1999).

La efectividad observada de la pectina de jícama para disminuir el grado de sinéresis en una bebida láctea fermentada fue elevada, si se considera, que su concentración en la bebida BL_{FJ1.0}, fue de solo 0.5 g/100 mL y por otra parte, su acción estabilizante se conservó durante el tiempo de almacenamiento. Díaz *et al.* (2004) estudiaron el efecto de fibra de salvado, en concentraciones que variaron de 3 a 9 g/100 mL, sobre el grado de sinéresis en yogures cuyos contenidos grasos estuvieron entre 2 y 4 g/100 mL, los citados autores encontraron porcentajes de sinéresis entre 45 y 65 %. Asimismo, estos autores informaron que entre mayor fue el contenido de grasa láctea y el de fibra, menor fue el grado de sinéresis; de esta forma, el yogur conteniendo 4 g de grasa/100 mL y niveles de 7 y 9 g de fibra/100 mL presentó valores de sinéresis menores que en el resto de los sistemas. Aportela-Palacios *et al.* (2005), determinaron el grado de sinéresis de yogures adicionados con 1.5, 3.0 y 4.5 g de fibra de salvado natural y tostado/100 mL y 50 mg de citrato de calcio/100 mL y compararon los valores obtenidos con el correspondiente a un yogur control exento de fibra y de citrato de calcio. Estos autores informaron que en un inicio todos los yogures exhibieron sinéresis satisfactoria (menor de 39 %), y además la presencia de fibra mostró un efecto de reducción en la sinéresis de los yogures; sin embargo, con el tiempo de almacenamiento el grado de sinéresis incrementó y algunos de los yogures adicionados con fibra presentaron valores mayores al mostrado por el yogur control.

3.5. Microestructura de las bebidas lácteas

La microestructura de la bebida BL_{CSF} (Figs. 7 y 8) consistió de una red tridimensional de agregados de micelas de caseína, en los que la forma globular de estas últimas es detectable (Fig. 8). Los agregados de caseína estuvieron intercalados por espacios vacíos ocupados originalmente por el lactosuero, en los que también se puede distinguir la presencia de bacterias lácticas involucradas en la elaboración de las bebidas lácteas. Los lactobacilos son los principales responsables de la acidez de las bebidas y se les atribuyen propiedades funcionales para el mejoramiento y la conservación de la salud humana; mientras que los estreptococos confieren textura y sabor a las bebidas lácteas fermentadas (Baron, *et al.*, 2000).

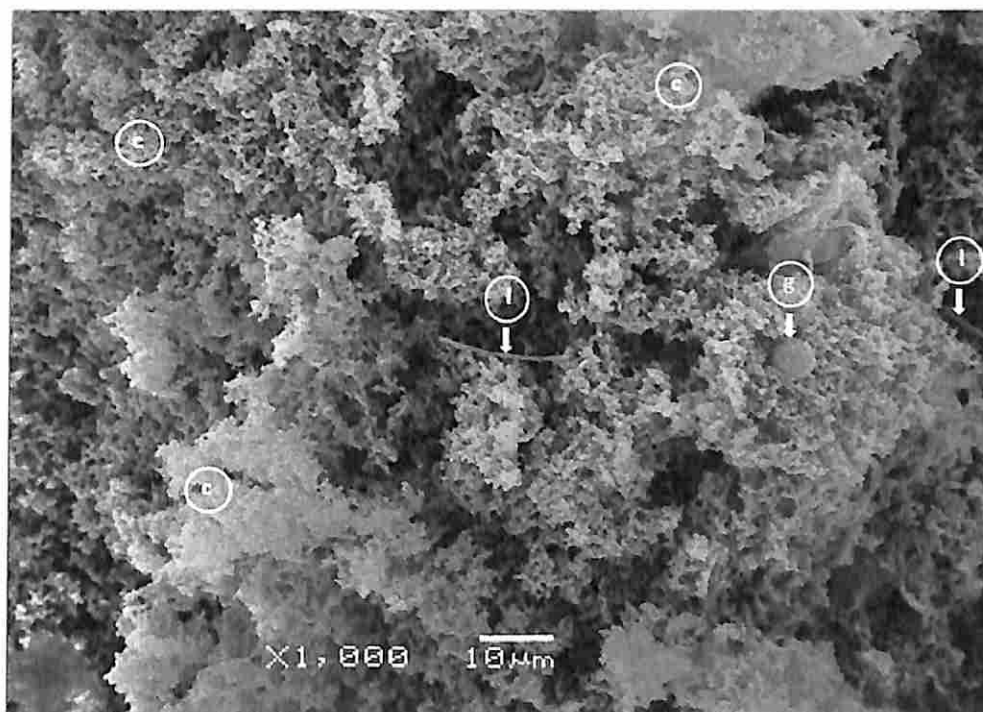


Figura 7. Micrografía electrónica de barrido de la bebida control BL_{CSF}, en la que puede apreciarse la formación de una red tridimensional de caseína (c); la estructura de un glóbulo de grasa láctea (g) y la presencia de lactobacilos (l). Magnificación 1 000 ×, barra de escala = 10 μm.

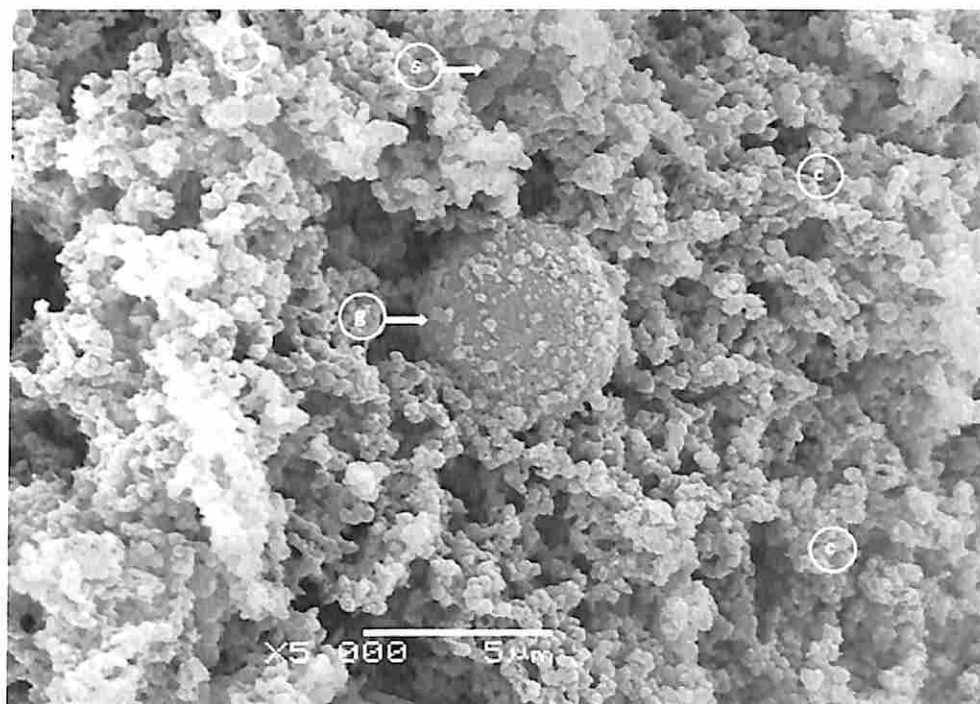


Figura 8. Micrografía electrónica de barrido de la bebida control BL_{CSF}, en la que puede observarse la red proteínica formada por agregados de micelas de caseína (c); un glóbulo de grasa láctea (g) embebido en la red de proteína y la presencia de estreptococos (s). Magnificación 5 000 ×, barra de escala = 5 μm.

La microestructura de la bebida BL_{FJ1.0} (Figs. 9 y 10) fue muy distinta a aquella de la bebida BL_{CSF} (Figs. 7 y 8), pues consistió de una red de proteína, formada por agregados de micelas de caseína, cubierta por otra red conformada por estructuras filamentosas atribuidas a la fibra de jícama. Es posible también observar que la red proteínica de la bebida BL_{FJ1.0} (Fig. 10) fue más abierta y relajada que la de la bebida BL_{CSF} (Fig. 8), evidenciado esto por la presencia de espacios vacíos, originalmente ocupados por lactosuero, de mayor tamaño. La presencia de lactobacilos y estreptococos inmersos en la red de la bebida BL_{FJ1.0} es fácilmente observable (Figs. 9 y 10). Las características estructurales particulares de la bebida BL_{FJ1.0} surgieron como resultado de las propiedades funcionales y estructurales de la fibra soluble de jícama incorporada, en

particular de la pectina de bajo metoxilo. Tromp *et al.* (2004) estudiaron el mecanismo de estabilización de bebidas lácteas, al adicionar 1 % de pectina de alto metoxilo después de la fermentación y homogenizar la mezcla, concluyendo que: (a) complejos de micelas de caseína con pectina adsorbida forman una red que proporciona estabilidad a las bebidas; (b) la pectina no adsorbida contenida en el suero se une a la red y carece de movilidad; a pesar de que la pectina no adsorbida no es necesaria para mantener la estabilidad de las bebidas, es indispensable para que exista suficiente adsorción de pectina durante el proceso de mezclado del yogurt y la solución de pectina y (c) la pectina es adsorbida irreversiblemente en términos prácticos. Marozienne y de Kruif (2000) señalaron que con bajas concentraciones de pectina de bajo metoxilo ocurre adsorción e interconexión de micelas de caseína a pH 5.3. Tuinier *et al.* (2002) mencionaron que la pectina se adsorbe a la superficie micelar de las caseínas a valores de pH entre 3.5 y 4.8, a través de la combinación de interacciones electrostáticas e hidrofóbicas. Se ha informado que pectinas de bajo metoxilo secuestran iones calcio presentes en la leche, formando partículas de pectato de calcio de tamaño relativamente grande, que disminuyen la agregación de caseínas en queso tipo Manchego; así, se forma una red de proteína más abierta (Lobato-Calleros *et al.*, 1999). La pectina de bajo metoxilo también ha sido utilizada como sustituto de grasa en queso Mozzarella, donde promueve la formación de una red proteínica abierta y relajada, semejante a una esponja (McMahon *et al.*, 1996).

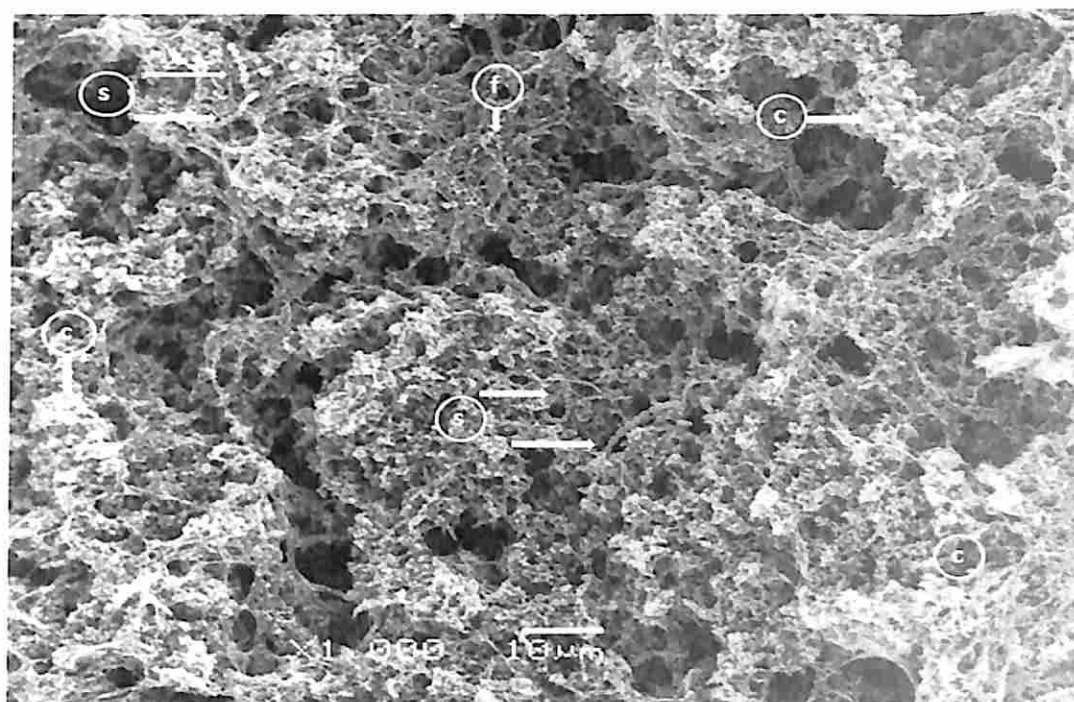


Figura 9. Micrografía electrónica de barrido de la bebida fermentada que contiene fibra de jícama BL_{FJ1.0}, se muestra una red de proteína (c), formada por agregados de micelas de caseína, cubierta por estructuras filamentosas atribuidas a la fibra de jícama (f) y la presencia de estreptococos (s). Magnificación 1 000 ×, barra de escala=10 μm.

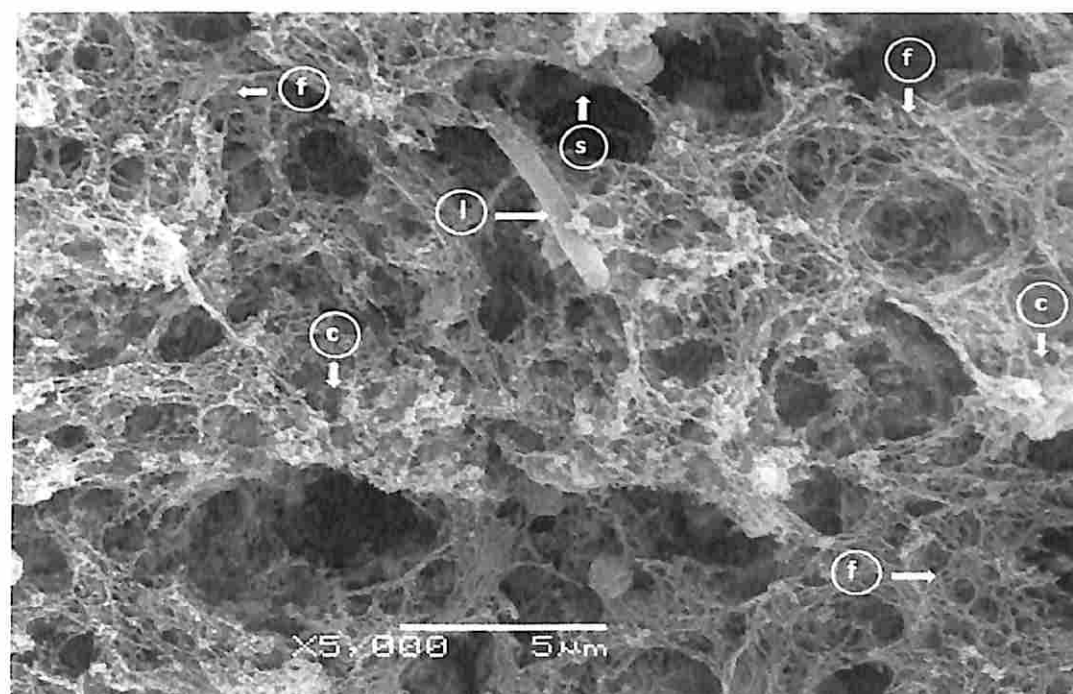


Figura 10. Micrografía electrónica de barrido de la bebida fermentada que contiene fibra de jícama BL_{FJ1.0}. Se aprecia una red proteínica (c) formada por la agregación de micelas de caseína y cubierta por otra red, al parecer independiente, constituida por estructuras filamentosas atribuidas a la fibra de jícama (f), así como la presencia de lactobacilos (l) y estreptococos (s). Magnificación 5 000×, barra de escala = 5 μm.

3.6. Comportamiento reológico de las bebidas lácteas

3.6.1. Barridos de amplitud

El yogur y las bebidas lácteas fermentadas son materiales viscoelásticos, por lo que su comportamiento reológico puede ser descrito por dos parámetros: el módulo de almacenamiento o elástico (G' , el cual es una medida de su elasticidad) y el módulo de pérdida o viscoso (G'' , el cual es una medida de su naturaleza viscosa) (Penna *et al.*, 2001).

La figura 11 muestra las variaciones en los valores de G' y G'' de las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$ en función de la deformación aplicada, para los tres períodos de almacenamiento estudiados (uno, siete y 14 días). Los datos de G' y G'' , dependientes de la deformación, indicaron que la región de comportamiento viscoelástico lineal para ambas bebidas estuvo comprendida entre 0.1 y 0.3 % de deformación. Las curvas G' y G'' vs deformación de las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$, mostraron un perfil similar, caracterizado por una región lineal con bajas deformaciones en la que los valores de G' y G'' fueron poco variables, seguida por una región de deformaciones mayores en la que los valores de G' y G'' mostraron inflexiones pronunciadas. El inicio de la inflexión pronunciada de los valores de G' y G'' tomó lugar aproximadamente a 0.9 % de deformación en la bebida BL_{CSF} y 0.7 % en la bebida $BL_{FJ1.0}$ (Fig. 11). Tunick *et al.* (1990) informaron que la inflexión de los valores de G' en queso, sugiere decaimiento de su estructura y que la cantidad de esfuerzo soportada antes de tal

decaimiento, es evidenciada por el cambio del punto de inflexión. Lobato-Calleros *et al.* (2006) mencionaron que cuando la deformación aplicada excede a aquella de la región viscoelástica lineal, ocurre ruptura y reformación de enlaces a diferentes velocidades, dependiendo de la red estructural del alimento, por lo que exhiben diferentes valores de G' . Con base en lo antes expuesto, es posible inferir que la estructura de la bebida BL_{CSF} , con mayor densidad proteínica y mayor grado de agregación (Figs. 7 y 8) soportó una mayor deformación antes de su decaimiento en comparación con aquella más relajada, abierta y con menor densidad proteínica de la bebida $BL_{FJ1.0}$ (Figs. 9 y 10).

En la figura 11, también puede observarse una región de deformación elevada ($\geq 40\%$) en la que las curvas de G' y G'' se cruzan, indicando que el factor de cedencia o $\tan \delta = G''/G'$, alcanzó valores iguales o mayores a la unidad. El entrecruzamiento de las curvas de G' y G'' definió el inicio del comportamiento líquido de las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$, como resultado de la destrucción de su estructura de gel y ocurrencia de interacciones moleculares desorganizadas tomando lugar en condiciones de disociación de las cadenas de biopolímeros. Por el contrario, en el intervalo de deformación de 0.1 a alrededor de 20 %, las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$ exhibieron comportamiento predominantemente elástico (valores de $G' > \text{valores de } G''$).

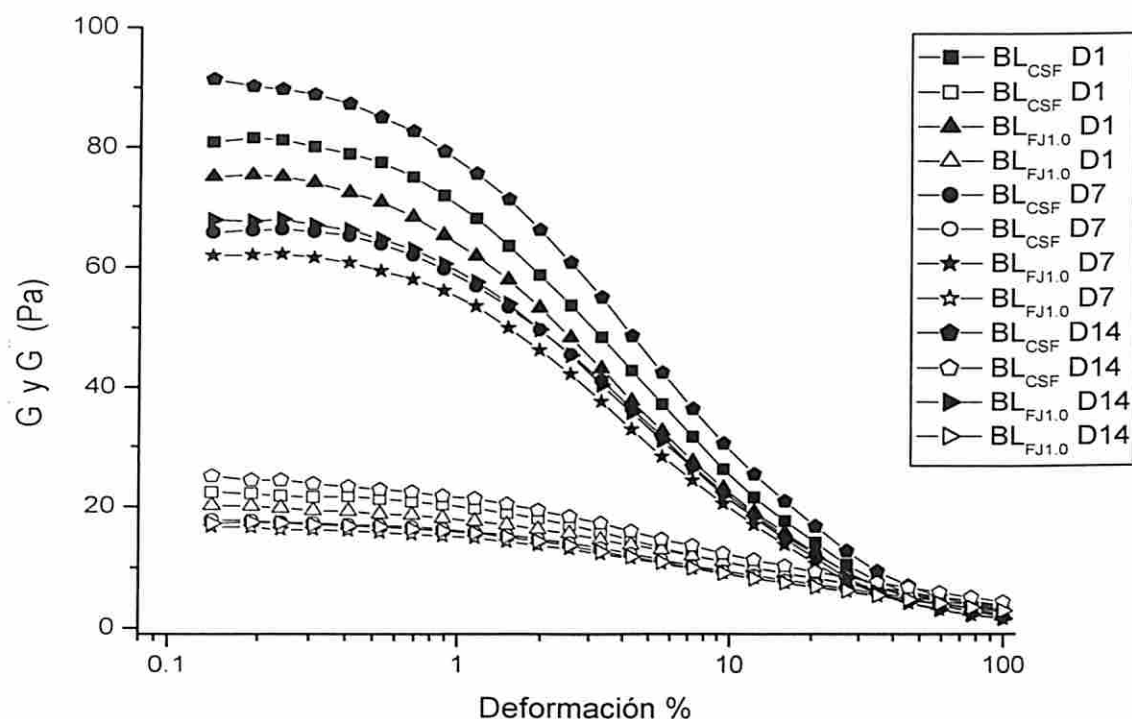


Figura 11. Comportamiento del módulo de almacenamiento (G') (curvas con figuras ■, ● y aquellas rellenas de color negro) y del módulo de pérdida (G'') (curvas con figuras □, ○ y aquellas sin relleno) de las bebidas lácteas fermentadas en función de la deformación, al día uno, siete y catorce de almacenamiento.

La bebida BL_{CSF} mostró valores de G' en la región viscoelástica lineal, que variaron entre 65.9 y 87.9 Pa durante el almacenamiento, los cuales en general fueron significativamente mayores que aquellos presentados por la bebida $BL_{FJ1.0}$ en los mismos períodos; variando estos últimos de 65.6 a 74.7 Pa (Cuadro 8). Estos resultados indican que la bebida BL_{CSF} exhibió mayor rigidez que la bebida $BL_{FJ1.0}$.

Los valores del módulo de pérdida en la región viscoelástica lineal variaron de 17.6 a 23.8 Pa para la bebida BL_{CSF} durante el almacenamiento y fueron mayores significativamente que aquellos de 16.7 a 19.8 Pa mostrados por la bebida $BL_{FJ1.0}$ (Cuadro 3).

Cuadro 8.

Valores de módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\tan \delta$) ($\pm$ desviación estándar) de las bebidas lácteas fermentadas durante el tiempo de almacenamiento.

Código de la bebida	G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$ (adim)	G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$ (adim)	G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$ (adim)
	Un día de almacenamiento			Siete días de almacenamiento			Catorce días de almacenamiento		
BL_{CSF}	80.0 $\pm$ 0.8 ^b	21.9 $\pm$ 0.3 ^b	0.26 $\pm$ 0.0 ^a	65.9 $\pm$ 0.4 ^a	17.6 $\pm$ 0.2 ^b	0.27 $\pm$ 0.0 ^a	87.9 $\pm$ 0.2 ^b	23.8 $\pm$ 0.6 ^b	0.27 $\pm$ 0.0 ^a
BL_{FJ1.0}	74.7 $\pm$ 0.6 ^a	19.8 $\pm$ 0.3 ^a	0.27 $\pm$ 0.0 ^a	65.6 $\pm$ 0.1 ^a	16.7 $\pm$ 0.0 ^a	0.26 $\pm$ 0.0 ^a	67.9 $\pm$ 0.3 ^a	17.5 $\pm$ 0.1 ^a	0.26 $\pm$ 0.0 ^a

BL_{CSF}: bebida láctea control sin fibra; BL_{FJ1.0}: bebida láctea con 1% de fibra soluble de jícama. Superíndices distintos en una misma columna indican diferencia significativa entre las medias.

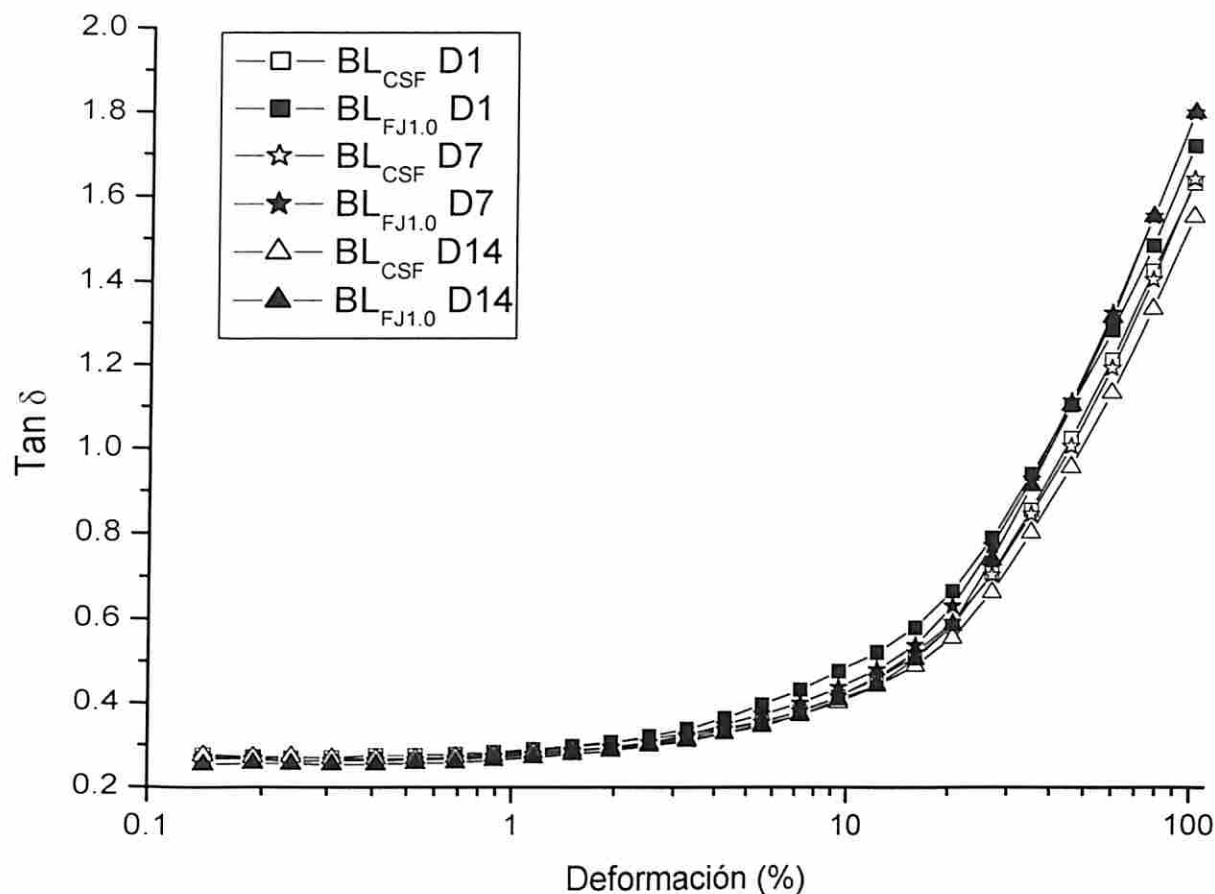


Figura 12. Comportamiento de $\text{Tan } \delta$ de las bebidas lácteas fermentadas en función de la deformación, al día uno, siete y catorce de almacenamiento

La figura 12 muestra las variaciones en los valores de $\text{tan } \delta$ de las bebidas BL_{CSF} y $\text{BL}_{\text{FJ1.0}}$ en función de la deformación aplicada, para los tres periodos de almacenamiento estudiados (1, 7 y 14 días). El comportamiento de los valores de $\text{tan } \delta$ en función de la deformación, fue semejante para ambas bebidas y para los periodos de almacenamiento estudiados. En el cuadro 8, puede observarse que los datos de $\text{tan } \delta$ en la zona viscoelástica lineal para las bebidas BL_{CSF} y $\text{BL}_{\text{FJ1.0}}$, variaron de 0.26 a 0.27 en el periodo de almacenamiento y fueron diferentes significativamente entre bebidas. A valores de deformación menores al 1 % los valores de $\text{tan } \delta$ permanecieron casi

constantes; sin embargo, a deformaciones mayores aumentaron progresivamente, y su aumento fue más pronunciado con deformaciones mayores al 10 % (Figura 12). Incrementos en los valores de $\tan \delta$ están relacionados con aumentos en el carácter viscoso y comportamiento líquido de las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$, debido a su conversión en una dispersión viscosa de partículas de caseína (Lee y Lucey, 2006), en la que los valores del módulo viscoso (G'') son mayores a aquellos del módulo elástico (G').

3.6.7. Comportamiento de flujo

Las figuras 13 y 14 muestran las variaciones en el esfuerzo cortante (σ) y la viscosidad aparente (η_{ap}) de las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$, en función de la velocidad de cizalla (γ), para los tres períodos de almacenamiento estudiados. Los datos de comportamiento de flujo de las bebidas se ajustaron, con valores de R^2 de 0.97 a 0.99, al modelo de Herschel-Bulkley, entre la velocidad de cizalla estudiada (1 a 300 s^{-1}). La ecuación del modelo de Herschel-Bulkley es (Steffe, 1996):

$$\sigma = \sigma_0 + K(\gamma)^n$$

Donde: σ es el esfuerzo cortante (Pa); γ es la velocidad de cizalla (s^{-1}); K es un índice de consistencia ($Pa \cdot s^n$); n es un número adimensional que indica la cercanía al flujo Newtoniano ($n=1$), también llamado índice de comportamiento de flujo y σ_0 es el esfuerzo de fluencia (Pa).

Los fluidos que obedecen este modelo son fluidos no newtonianos, en los que la relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación no es lineal, que requieren de un esfuerzo mínimo para fluir, llamado esfuerzo de fluencia. Una definición práctica del esfuerzo de fluencia es aquella que lo considera como el esfuerzo debajo del cual no ocurre deformación observable durante el tiempo disponible para tal efecto (Prentice, 1992).

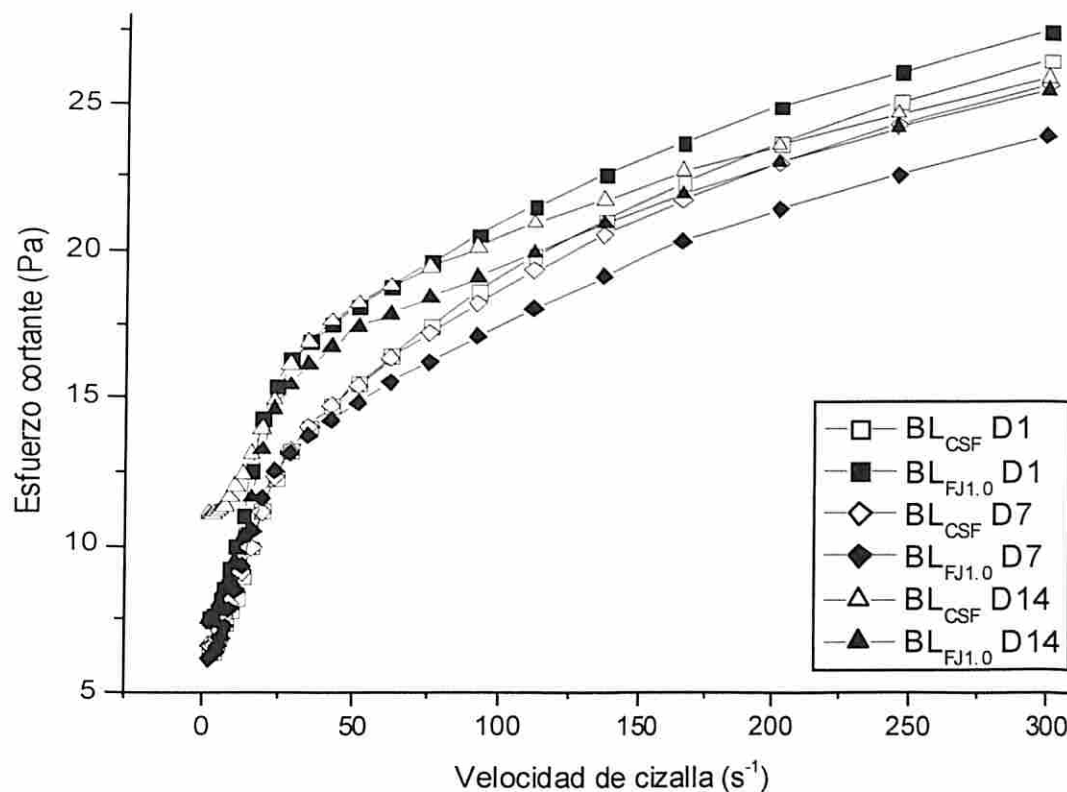


Figura 13. Comportamiento del esfuerzo cortante (σ) en función de la velocidad de cizalla (γ), de las bebidas lácteas, al día uno, siete y catorce de elaboradas.

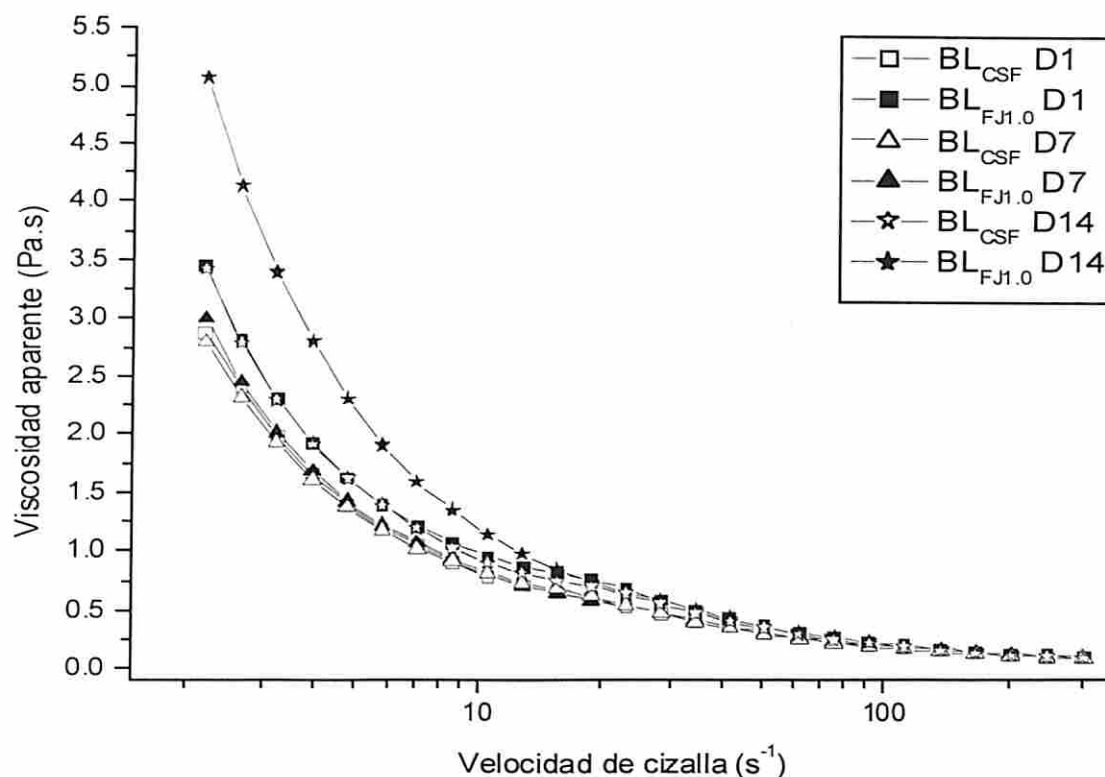


Figura 14. Comportamiento de la viscosidad aparente (Pa.s) en función de la velocidad de cizalla (γ), de las bebidas lácteas al día uno, siete y catorce de elaboradas.

Los valores de los términos del modelo de Herschel-Bulkley correspondientes a las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$, en los tiempos de almacenamiento estudiados, se presentan en el cuadro 9 se observó que la presencia de fibra soluble de jícama en la bebida láctea fermentada causó modificaciones en su comportamiento de flujo. La bebida $BL_{FJ1.0}$ fue más viscosa (mayor valor de K) y menos newtoniana (menor valor de n) que la bebida BL_{CSF} durante todo el período de almacenamiento. Los valores de esfuerzo de fluencia (σ_0) de ambas bebidas fueron similares ($p > 0.05$) después de un día de almacenamiento, pero difirieron significativamente a los 7 y 14 días de almacenamiento, en los que la BL_{CSF} mostró valores mayores ($p \leq 0.05$) de σ_0 en comparación con la bebida $BL_{FJ1.0}$ (Cuadro 9). Janhøj *et al.* (2008) caracterizaron reológica y

sensorialmente bebidas lácteas acidificadas, de las cuales algunas fueron yogures para beber, estabilizadas con pectina y/o carboximetilcelulosa; estos autores encontraron incrementos en los valores del índice de consistencia (K) de las bebidas, al aumentar la concentración de sólidos y de hidrocoloides. Keogh y Kennedy (1998) determinaron el efecto de la adición de grasa láctea, proteína e hidrocoloides (almidón, gelatina y una mezcla de gomas xantana y de tragacanto) sobre el comportamiento de flujo de yogur batido e informaron que el índice de consistencia (K) y la sinéresis fueron más influenciados por las variables de composición que el índice de comportamiento de flujo (n).

Van Marle *et al.* (1999) informaron que la adsorción de exopolisacáridos a las micelas de caseína incrementó la viscosidad del lactosuero de yogur batido. La pectina de bajo metoxilo es un hidrocoloide aniónico que se adsorbe en la superficie de las micelas de caseína cargadas positivamente, por lo que tiene la capacidad de modificar la fracción del volumen de los agregados de caseína y así contribuir a la viscosidad del sistema (Everett y McLeod, 2005). Lo anterior se refiere a la habilidad de la pectina para rodearse de moléculas de agua y así incrementar la fracción del volumen "efectivo" de los agregados de caseína (volumen ocupado cuando las moléculas o agregados se encuentran rodeados de agua). Cuando el volumen "efectivo" de las moléculas o agregados es mucho mayor que el volumen "actual" de los mismos (volumen ocupado por las moléculas o agregados cuando no se encuentran rodeados de agua) se observan aumentos importantes en la viscosidad del sistema (McClements, 1999).

Valores medios ($\pm$ desviación estándar) de los términos del modelo de Herschel – Bulkley que obedecieron las bebidas lácteas fermentadas.

Código de la bebida	Un día de almacenamiento			Siete días de almacenamiento			Catorce días de almacenamiento		
	K	n	σ_0	K	n	σ_0	K	n	σ_0
BL_{CSF}	1.4 ± 0.0^a	0.5 ± 0.0^b	$4.1 \pm 0.0_a$	1.5 ± 0.0^a	0.5 ± 0.0^b	4.5 ± 0.0^b	1.4 ± 0.1^a	0.5 ± 0.0^b	8.8 ± 0.1^b
BL_{FJ1.0}	2.8 ± 0.6^b	0.4 ± 0.0^a	4.0 ± 0.7^a	1.8 ± 0.0^b	0.4 ± 0.0^a	3.5 ± 0.2^a	2.4 ± 0.2^b	0.4 ± 0.0^a	4.3 ± 0.3^a

BL_{CSF} : bebida láctea control sin fibra; $BL_{F1,0}$: bebida láctea con 1% de fibra soluble de jícama; K : índice de consistencia; n : índice de comportamiento de flujo; σ_0 : esfuerzo de fluencia. Superíndices distintos en una misma columna indican diferencia significativa entre las medias. K : es un índice de consistencia ($Pa \cdot s^n$). n : es un número adimensional que indica la cercanía al flujo Newtoniano ($n=1$), también llamado índice de comportamiento de flujo. σ_0 es el esfuerzo de fluencia (Pa).

La bebida $BL_{FJ1.0}$ presentó también mayor carácter pseudoplástico ($p \leq 0.05$) ($n=0.4$) que la bebida BL_{CSF} ($n=0.5$). Ramaswamy y Basak (1991) mencionaron que muchos materiales poliméricos, particularmente el yogur, presentan valores de índice de comportamiento de flujo (n) reducidos conforme el valor del índice de consistencia (K) se incrementa. Los fluidos pseudoplásticos son aquellos que presentan valores de índice de comportamiento de flujo (n) menores a la unidad (Bourne, 2002).

Los fluidos pseudoplásticos presentan aumentos en el esfuerzo cortante y disminución en la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla, comportamiento exhibido por las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$ (Figs. 13 y 14). La disminución de la viscosidad de estos sistemas, conforme se incrementa la velocidad de corte se conoce como comportamiento “adelgazante de corte” (shear thinning) o pseudoplástico. Este comportamiento es exhibido por sistemas que poseen una estructura que puede ser disgregada reversiblemente cuando un esfuerzo es aplicado y entonces removido. El mecanismo de adelgazamiento para sistemas estructurados en redes de biopolímeros consiste en la separación de los agregados o cadenas de biopolímeros (McClements). A partir de los valores del índice de comportamiento de flujo (n) y la figura 14, se observa que la bebida $BL_{FJ1.0}$ mostró un comportamiento adelgazante más acentuado que la bebida BL_{CSF} , de lo cual se puede inferir que en el arreglo estructural de la bebida $BL_{FJ1.0}$ intervinieron uniones más débiles y con menor grado de reformación entre biopolímeros en comparación con aquellas que conformaron la estructura de la matriz proteínica de la bebida BL_{CSF} . A bajas

velocidades de cizalla, donde existe tiempo suficiente para la formación de nuevas uniones entre diferentes patrones de cadenas de biopolímeros, la densidad de entrecruzamiento de la red permanece constante y la viscosidad también permanece constante en un valor máximo denominado viscosidad de corte cero (η_0). A velocidades de cizalla mayores, sin embargo, donde la velocidad de re-entrecruzamientos es menor que la velocidad de ruptura de los entrecruzamientos ya existentes, la extensión del entrecruzamiento de las redes disminuye progresivamente con incrementos en la velocidad de cizalla y la viscosidad disminuye, típicamente por dos o tres órdenes de magnitud sobre el rango de velocidad de cizalla de importancia práctica (Morris, 1995; Rao y Rizvi, 1985). La viscosidad aparente de los materiales pseudoplásticos se aproxima al infinito (i.e. un sólido) conforme la velocidad de corte se aproxima a cero (McClements, 1999) (Fig. 14). Penna *et al.* (2001) señalaron que índices de consistencia elevados y pseudoplasticidad alta de bebidas lácteas fermentadas comerciales, incrementaron su aceptación sensorial.

En general el esfuerzo de fluencia de la bebida BL_{CSF} fue mayor que aquel de la bebida $BL_{FJ1.0}$ (Cuadro 9), datos que refuerzan la idea de que la estructura de la bebida BL_{CSF} presentó mayor resistencia a la deformación, probablemente por su mayor densidad proteínica, que la correspondiente a la bebida $BL_{FJ1.0}$. Un fluido actúa como un sólido elástico si el esfuerzo cortante aplicado es menor que el esfuerzo de fluencia. Si el esfuerzo excede el valor del esfuerzo de fluencia el material actúa como un fluido (McClements, 1999). Ramaswamy y

Basak (1991) evaluaron la reología de dos yogures comerciales que mostraron esfuerzo de fluencia (σ_0) y comportamiento adelgazante de corte, al igual que las bebidas lácteas de este estudio. Resultados similares fueron informados por Recillas-Mota (2005) en bebidas lácteas que contenían emulsiones múltiples estabilizadas con diferentes biopolímeros.

Las diferencias observadas en la reología de las bebidas lácteas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$, pueden ser explicadas con base en distintas interacciones originadas en este sistema al adicionar fibra soluble de jícama: (a) adsorción de pectina de bajo metoxilo a la superficie de las micelas de caseína; (b) interacciones entre micelas de caseína con o sin pectina de bajo metoxilo adsorbida en su superficie y (c) interacciones entre los polisacáridos de la fibra soluble de jícama y el lactosuero. En términos generales entre mayor es el número de interacciones tomando lugar entre micelas de caseína dentro de la estructura de gel, mayor es la rigidez del gel (Everett y Olson, 2000) evidenciado por valores mayores de G' . La formación de una red débil de polímeros en la fase continua resulta en altas viscosidades e imparte propiedades viscoelásticas adicionales a los sistemas alimenticios (McClements, 1999). Con base en lo antes expuesto, puede inferirse que la estructura de la bebida BL_{CSF} mostró mayor carácter elástico que aquella conformada en la bebida $BL_{FJ1.0}$, a través de mayor entrecruzamiento de las micelas de caseína; mientras que la bebida $BL_{FJ1.0}$, exhibió mayor carácter pseudoplástico y viscoso que la bebida BL_{CSF} , como resultado de menor agregación de las micelas de caseína y la presencia de

moléculas de polisacáridos en su fase continúa, siendo capaz la pectina de bajo metoxilo de formar partículas de pectato de calcio.

3.7. Evaluación sensorial

Los resultados de la prueba triangular realizada a las bebidas BL_{CSF} y BL_{FJ1.0} (35 respuestas correctas y 45 incorrectas), demostraron que los consumidores distinguieron las bebidas en un nivel de significancia del 5 %, con una magnitud de diferencia igual a $d'=2.97$. Como atributo sensorial distintivo, seis de los consumidores señalaron mayor percepción de acidez en la bebida BL_{FJ1.0}, en comparación con aquella percibida en la bebida BL_{CSF}. Este señalamiento concuerda con los valores de acidez determinados experimentalmente a los 14 días de elaboradas las bebidas (90.8 °D para la bebida BL_{CSF} y 93.0 °D para la bebida BL_{FJ1.0}), considerando que la evaluación sensorial se realizó a los 12 días de almacenamiento.

4. CONCLUSIONES

La jícama contuvo 3.5 g de fibra dietética total por cada 100 g en base húmeda; de la fibra total, el 60 % correspondió a fibra insoluble (2.1 g) y 40 % a fibra soluble (1.4 g). La fibra soluble de la jícama estuvo constituida por 42.9 % de pectina de bajo metoxilo (10.4 %) y 57.1 % de hemicelulosas débilmente unidas. La microestructura de la jícama, consistió de células de tamaños variables con paredes celulares delgadas, de superficie lisas y uniforme, en cuyo interior se encontraron numerosos gránulos de almidón de forma poligonal y diámetros transversal y longitudinal que variaron de 2.1 a 8.2 μm y de 2.5 a 9.6 μm , respectivamente.

La adición de fibra soluble a la leche (1 g/100 mL) usada para preparar las bebidas lácteas, causó disminución porcentual en los contenidos de proteína y de grasa del producto. La presencia de fibra en la bebida BL_{FJ1.0}, contribuyó a un menor grado de sinéresis (11.3 y 15.4 %, después de uno y 14 días de almacenamiento, respectivamente), en comparación con los valores observados en la bebida control sin fibra BL_{CSF} (17.5 y 23.3 %, en los mismos períodos de almacenamiento).

La microestructura de la bebida control sin fibra BL_{CSF}, determinada mediante microscopía electrónica de barrido, consistió de una red tridimensional de agregados de micelas de caseína, intercalados por espacios ocupados originalmente por el lactosuero, en los que también se distinguió la presencia de

bacterias lácticas involucradas en la elaboración de las bebidas. En contraste, la microestructura de la bebida conteniendo fibra soluble de jícama $BL_{FJ1.0}$ consistió de una red más abierta que aquella de la bebida BL_{CSF} , formada por agregados de micelas de caseína, cubiertos por estructuras filamentosas atribuidas a la fibra de jícama. La presencia de lactobacilos y estreptococos inmersos en la red de la bebida $BL_{FJ1.0}$ fue fácilmente observable.

Diferencias en los arreglos estructurales de las bebidas, resultaron en comportamientos reológicos distintos. La bebida sin fibra BL_{CSF} mostró valores de módulo elástico (G') y módulo viscoso (G'') mayores que aquellos presentados por la bebida conteniendo fibra soluble de jícama $BL_{FJ1.0}$, exhibiendo de esta manera mayor carácter viscoelástico.

El comportamiento de flujo de las bebidas se ajustó al modelo de Herschel-Bulkley, en el rango de velocidad de cizalla estudiado. La bebida conteniendo fibra $BL_{FJ1.0}$ fue más viscosa (mayor valor de índice de consistencia) y más pseudoplática (menor valor de índice de flujo) que la bebida BL_{CSF} y en general presentó valores de esfuerzo de fluencia menores que los exhibidos por la bebida BL_{CSF} .

La evaluación sensorial de las bebidas BL_{CSF} y $BL_{FJ1.0}$, demostró que los consumidores fueron capaces de distinguir en un nivel de significancia del 5 %, señalando como atributo diferencial la percepción de mayor acidez en la bebida $BL_{FJ1.0}$ en comparación con la percibida en la bebida BL_{CSF} .

5. BIBLIOGRAFÍA

1. AACC.2003. American Association of Cereal Chemists. Report of the Dietary Fiber Definition Committee to Board of Directors of the American Association Of Cereal Chemists.. Submitted January.Vol. 43. No. 3.
2. A.O.A.C. (2000). Oficial methods of analysis. Assoc. Of Oficial Analytical Chemists, Washington, D.C.
3. Aportela-Palacios, A., Sosa-Morales, M.E., Vélez-Ruiz, J.F. (2005). Rheological and physicochemical behavior of fortified yogurt, with fiber and calcium. *Journal of Texture Studies*, 36, 333-349.
4. Ascherio, A., Willet, W. (1995). New directions in dietary studies of coronary heart disease. *Journal of Nutrition* 125, 647S-655S.
5. Alanis, *et al.* 1996. Composición química del tubérculo de jícama durante el desarrollo hasta tiempo de cosecha. Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y la Universidad de Guanajuato.
6. Baron, M., Roy, D. and Vuilleumard, J. 2000. Biochemical characteristics of fermented milk produced by mixed-cultures of lactic starters and bifidobacteria. *Lait*, 80 465-478.
7. Beristain, C.I., Cruz-Sosa, F., Lobato-Calleros, C, Pedroza-Islas, R., Rodríguez-Huezo, M.E. y Verde-Calvo, J.R. (2006). Applications of soluble dietary fibers in beverages. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(1), 81-95.
8. Bourne, M. 2002. Food Texture and Viscosity. Concept and Measurements. Academia Press, CA, EUA. pp: 59-106.
9. Brito, B. Espín, S. 1999. Variabilidad en la composición química de raíces y tubérculos andinos del Ecuador. En Raíces y Tubérculos Andinos: Avances de la Investigación Tomo 1. Centro Internacional de la Papa. Lima, Perú. p. 13-23.
10. de Kruif, C.G. (1999). Casein micelles interactions. *International Dairy Journal*, 9, 183-188.
11. Díaz, J.B., Sosa, M.M.E., Vélez, R.J.F. 2004. Efecto de la adición de fibra y la disminución de grasas en las propiedades fisicoquímicas de yogur. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 3: 287-305.

12. Escudero, A.E., González, S.P. (2006). La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria*, 21 (supl. 2), 61-72.
13. Everett, D.W., McLeod, R.E. (2005). Interactions of polysaccharide stabilisers with casein aggregates in stirred skim-milk yoghurt. *International Dairy Journal*, 15, 1175-1183.
14. Everett, D.W., Olson, N.F. (2000). Dynamic rheology of renneted milk gels containing fat globules stabilized with different surfactants. *Journal of Dairy Science*, 83, 1203-1209.
15. Espín, S., Villacrés, E., Brito, B. (2004). Caracterización físico-química, nutricional y funcional de raíces y tubérculos andinos. En *Raíces y tubérculos andinos: alternativas para la conservación y uso sostenible en el Ecuador* (Barrera, V., Tapia, C. y Monteros, A. Eds.). Instituto nacional de investigaciones agropecuarias. INIAP - Centro internacional de la papa, Lima, Perú. Capítulo IV: 91-126.
16. Fiszman, S.M., Lluch, M.A., Salvador, A. (1999). Effect of addition of gelatin on microstructure of acidic milk gels and yoghurt and on their rheological properties. *International Dairy Journal*, 9, 895-901.
17. Fox, P.F., McSweeney, P. (1998). *Dairy Chemistry and Biochemistry*. Springer, NY, EUA.
18. Grain, J. (2006). Dietary fibre. Definition, analysis, physiology & health. ILSI Europe concise monograph series. International Life Sciences Institute (ILSI). Bélgica, 38 pp.
19. Heredia Z. A. 1996. Guía para cultivar jícama en el Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y pecuarias Centro de investigación Regional del centro Campo Experimental Bajío., Celaya, Guanajuato. México.
20. INIAP. 2000. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Aplicaciones agroindustriales de raíces y tubérculos andinos. Informe técnico de avances. Línea de acción 34. Período septiembre 1999 a septiembre 2000. p. 8-45.
21. Janhøj, T., Frøst, M.B., Ipsen, R. (2008). Sensory and rheological characterization of acidified milk drinks. *Food Hydrocolloids*, 22, 798-806.
22. Kalab, M., and Sargent, A. 1975. Milk-gel structure. IV. Microstructure of yogurts in relation to the presence of thickening agents. *Journal of Dairy Research*. 42: 453-458

23. Keogh, M. K., O'Kennedy, B.T. (1998). Rheology of stirred yogurt as affected by milk fat, protein and hydrocolloids. *Journal of Food Science*, 53 (1), 108-112.
24. Kimm, S. (1995). The role of dietary fiber in the development and treatment of childhood obesity. *Pediatrics*, 96, 1010-1014.
25. Kim, Y.I. (2000). AGA technical review: Impact of dietary fiber on colon cancer occurrence. *Gastroenterology*, 118, 1235-1257.
26. Lee, W.J., Lucey, J.A. (2006). Impact of gelation conditions and structure breakdown on the physical and sensory properties of stirred yogurts. *Journal of Dairy Science*, 89, 2374-2385.
27. Li, B.W., Andrews, K.W., Pehrssonw, P.R. (2002). Individual sugars, soluble, and insoluble dietary fiber contents of 70 high consumption foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15, 715-723.
28. Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E., Vernon-Carter, E.J. (1999). Propiedades reológicas de análogos de queso: efectos de sustituto de grasa, grasa y humedad. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 2 (3), 119-124.
29. Lobato-Calleros, C., Rodríguez, E., *Sandoval-Castilla, O, Vernon-Carter, E.J. y Alvarez-Ramirez, J. (2006). Reduced-fat white fresh cheese-like products obtained from W₁/O/W₂ multiple emulsions: viscoelastic and high-resolution image analyses. *Food Research International*, 39, 678-685.
30. Lobato-Calleros, C., Reyes-Hernández, J., Beristain, C.I., Hornelas-Urbe, Y., Sánchez-García, J. E., Vernon-Carter, E.J. (2007). Microstructure and texture of white fresh cheese made with canola oil and whey protein concentrate in partial or total replacement of milk fat. *Food Research International*, 40, 529-537.
31. Lucey, J.A., Tamehana, M., Singh, H., Munro, P.A. (1999). Stability of model acid milk beverage: effect of pectin concentration, storage temperature and milk heat treatment. *Journal of Texture Studies*, 30(3), 305-318.
32. Lucey, J. A. (2002). Formation and physical properties of milk protein gels. *Journal of Dairy Science*, 85(2), 281-294.
33. Marozienne, A., de Kruif, C.G. (2000). Interaction of pectin and casein micelles. *Food Hydrocolloids*, 14, 391-394.

34. McClements, D. J. (1999). *Food emulsions: Principles, practice and techniques*. CRC Press, Boca Raton, FL, EUA.
35. McMahon, D. J., Alleyne, M. C., Fife, R. L., Oberg, C. J. (1996). Use of fat replacers in low fat Mozzarella cheese. *Journal of Dairy Science*, 79, 1911-1921.
36. Meilgaard M., Civille G.V., Carr B.T. (1999). *Sensory evaluation techniques*, 3a. edición. CRC Press. FL, EUA.
37. Morris, E.R. (1995). Polysaccharide rheology and in-mouth perception. En: *Food Polysaccharides and their applications* (Stephen, A.M. Ed.). Marcel Dekker, Inc. NY, EUA. Capítulo 16: 517-546.
38. McCready, R. M. 1999. Pectin. In: JOSELYN, M. A. *Methods in food analysis*. Academic Press, 2nd edition, cap. XIX, p. 565-599.
39. Mudahar, G.S., Jen, J.J. (2006). Texture of Raw and Canned Jicama (*Pachyrrhizus tuberosus*) and Chinese Water Chestnut (*Eleocharis dulcis*). *Journal of Food Science*, 56 (4), 977-980.
40. Nakamura, A., Yoshida, R., Maeda, H., Corredig, M. (2006). The stabilizing behaviour of soybean soluble polysaccharide and pectin in acidified milk beverages. *International Dairy Journal*, 16, 361-369.
41. Penna, A., Sivieri, K. and Oliveira, M. 2001. Relation between quality and rheological properties of lactic beverages. *Journal of Food Engineering* 49: 7-13.
42. Peña-Valdivia, C.B.; A.B. Sánchez-Urdaneta. 2006. Nopalito and cactus pear (*Opuntia* spp.) polysaccharides: mucilage and pectin. *Acta Horticulturae* 728:241-427.
43. Prentice, H. (1992). *Dairy Rheology. A concise guide*. VCH Publishers, Inc. NY, EUA.
44. Ramaswamy, H.S., Basak, S. (1991). Rheology of stirred yogurts. *Journal of Texture Studies*, 22, 231-241.
45. Ramírez Santiago, C. (2008). Propiedades estructurales, reológicas y sensoriales de yogur al sustituir la grasa láctea por emulsiones múltiples y la sacarosa por un esteviósido. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. Universidad Autónoma Chapingo.
46. Rao, M. A.; Rizvi, S. S. 1985. *Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker, Inc. U.S.A.

47. Recillas-Mota, M.T. 2005. Comportamiento reológico y estructural de bebidas lácteas fermentadas conteniendo emulsiones aceite-en-agua y agua-aceite-en-agua formuladas con diferentes agentes emulsificantes y estabilizantes. Tesis de maestría en ciencia y tecnología agroalimentaria Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco Edo. de México.
48. Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E., Vernon-Carter, E.J. 2004. Microstructure and texture of yogur as influenced by fat replacers. *International Dairy Journal*, 14: 151-159.
49. Steffe, J. 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2ª Edición. Freeman Press. MI, EUA. pp: 19-35.
50. Sendra, E., Fayos, P., Lario, Y., Fernández-López, J., Sayas-Barberá, E., Pérez-Alvarez, J.A. (2008). Incorporation of citrus fibers in fermented milk containing probiotic bacteria. *Food Microbiology*, 25, 13-21.
51. Sorensen, M. 1996. Yam Bean (*Pachyrhizus D.C.*) Promoting the Conservation and use of underutilized and neglected crop. 2 Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gaterlieber International Plant Genetic Resources Institute Rome.
52. Schneeman, B.O. (1999). Fiber, inulin and oligofructose: similarities and differences. *Journal of Nutrition* 129, 1424S-1427S.
53. Stevenson, D., Jane, J.L., Inglett, G. (2007). Characterization of jicama (mexican potato) (*Pachyrhizus erosus L. Urban*) starch from taproots grown in USA and Mexico. *Starch/Starke*, 59(3-4):132-140.
54. Tromp, R.H., de Kruif, C.G., van Eijk, M., Rolin, C. (2004). On the mechanism of stabilisation of acidified milk drinks by pectin. *Food Hydrocolloids*, 18, 565-572.
55. Trumbo, P., Schliker, S., Yates, A., Poos, M. 2002. Dietary references intakes for energy carbohydrate, fiber, fatty acids, cholesterol, protein, and amino acids. *Journal of the American Dietetic Association*, 102 (11), 1621-1630.
56. Tuinier, R., Rolin, C., de Kruif, C. G. (2002). Electrosorption of pectin onto casein micelles. *Biomacromolecules*, 3(3), 632-638.
57. Tungland, B.C., Meyer, D. (2002). Nondigestible oligo- and polysaccharides (dietary fiber): their physiology and role in human health and food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 1, 73-92.

58. Tunick, M.H. 2000. Rheology of dairy foods that gel, stretch and fracture. *Journal of Dairy Science*, 83:1892-1898.
59. USDA (2006). United States Departamento of Agriculture. <http://www.usda.gov/wps/portal/usdahome>.
60. van Vliet, T., Lucey, J.A., Grolle, K., Walstra, P. (1997). Rearrangements in acid-induced casein gels during and after gel formation. En *Food colloids: proteins, lipids and polysaccharides* (Dickinson, E., Bergenstahl, B. Eds.). Royal Society of Chemistry, Cambridge, Reino Unido (pp. 335-345).
61. van Marle, M. E., van den Ende, D., de Kruif, C. G., Mellema, J. (1999). Steady-shear viscosity of stirred yoghurts with varying ropiness. *Journal of Rheology*, 43, 1643-1662.
62. Voragen, A.G.J., Pilnik, W., Thibault, J.F., Axelos, M.A.V., Renard, C.M.G.C. (1995). Pectins. En: *Food Polysaccharides and their applications* (Stephen, A.M. Ed.). Marcel Dekker, Inc. Nueva York. Capítulo 10: 287-339.