



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Propiedades de flujo y estabilidad de una bebida
láctea sabor chocolate con carragenina y fructanos
de agave**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS**

P R E S E N T A :

DIANA SOLIS PADILLA

**ASESORAS:
DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA
I.A. MARITZA ROCANDIO PINEDA**

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

U.N.A.M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis.**

Propiedades de flujo y estabilidad de una bebida láctea sabor chocolate con carragenina y fructanos de agave

Que presenta la pasante: **Diana Solís Padilla**

Con número de cuenta: **312098603** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de Febrero de 2020.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

| | NOMBRE | FIRMA |
|----------------------|--|--------------|
| PRESIDENTE | M.A.D. Fernando Flores Benítez | |
| VOCAL | Dra. Laura Patricia Martínez Padilla | |
| SECRETARIO | I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa | |
| 1er. SUPLENTE | I.A. Patricia Muñoz Aguilar | |
| 2do. SUPLENTE | Dra. María Guadalupe Sosa Herrera | |

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis familia, mi pilar más grande en esta vida, mis héroes; mis padres Arturo Solis y Yolanda Padilla, quienes me inspiraron y me ayudaron a llegar donde estoy y me han hecho la persona que soy, mis valores, mis principios, mi perseverancia y empeño se los debo a ellos; gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí, por su amor, apoyo incondicional y sacrificios realizados sin pedir nunca nada a cambio. A mi hermano, por siempre apoyarme en cada decisión y proyecto, gracias por el amor recibido, paciencia, por ser mi amigo y consejero; son y serán siempre parte esencial de mis logros, gracias por siempre anhelar lo mejor para mi vida y por cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida. A Max, por ser siempre mi fiel compañero durante esas largas noches de desvelo. No hay suficientes palabras para agradecerles por todo, siempre estaré agradecido por la fortuna de tenerlos en mi vida, los amo y son mi vida entera.

A mis abuelos, Alicia Hernández, Nicolasa Mendoza y Panfilo Padilla, gracias por todas sus enseñanzas de vida, por esas interminables historias y anécdotas, que volvería a escuchar una y mil veces, gracias por su amor y por siempre estar junto a mí en todo momento y siempre ser siempre una inspiración, apoyo y fortaleza.

A Gonzalo Solis †, gracias por ser un pilar en la familia y un ejemplo de esfuerzo, perseverancia y amor, por siempre ver el lado bueno de las personas a pesar de las circunstancias, gracias por ser un ejemplo que seguir; a Graciela Dorantes†, por siempre impulsarme a ser mejor y lograr todo lo que me propusiera, por ser como una segunda madre, por siempre estar para mí, gracias por todo lo que aprendí de ti y por siempre estar orgullosa de mí, siempre tendrán una parte de mi corazón, en donde quiera que se encuentren estoy segura de que comparten la misma felicidad por este logro alcanzado.

A mis amigas, Alma Jiménez y Daniela Gómez, gracias por siempre ser una amiga incondicional por siempre formar un gran equipo y ser mi compañeras incondicional en cada materia, gracias por enseñarme tanto no solo en el ámbito

estudiantil sino en la vida, pero sobre todo gracias por su amistad, sabía que siempre podría contar con ustedes, muchas por todas esas risas y anécdotas vividas, Yoshi Alvarado, gracias por tantos años de amistad, por siempre estar en las buenas y en las malas, por gracias por cada consejo, cada risa y cada anécdota que quedara para la historia.

Montze Hernandez, gracias por ser mi mejor amiga y siempre estar para mí, por ser como una hermana y mi siempre amiga incondicional, gracias por siempre escucharme, por tantas alegrías, tristezas e historias, por siempre apoyarme, por tu amistad, confianza y apoyo, gracias por hacer de la universidad una de las mejores etapas de mi vida.

Mi sincero agradecimiento a mis asesoras de tesis, Dra. Laura Patricia e I.A. Maritza Rocandio por compartir sus conocimientos, por su paciencia, tiempo y la confianza que tuvieron en mi durante el desarrollo de este proyecto y el apoyo para participar en el congreso AMIDIQ 2020. Gracias a cada profesor que me apoyo y cuyas enseñanzas constituyen una base importante en mi vida, gracias especialmente, Dra. María Guadalupe Sosa y Dra. Virginia Delgado por su brindarme su apoyo y ayuda durante la elaboración de este proyecto.

A mis sinodales por sus comentarios y compartirme sus conocimiento que ayudaron a hacer de este trabajo de investigación una mejor aportación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, Mi universidad, mi segundo hogar, por toda la oportunidades interminables que me ha brindado, ser parte de esta comunidad ha sido parte fundamental en mi desarrollo personal y profesional, gracias por años de grandes anécdotas, experiencias y grandes amistades.

Con cariño, Diana Solis

ÍNDICE

| | Página |
|---|--------|
| RESUMEN | i |
| INTRODUCCIÓN | ii |
| CAPÍTULO I. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1 Bebidas lácteas | 1 |
| 1.1.1 Formulación | 1 |
| 1.1.2 Proceso de elaboración | 2 |
| 1.2 Ingredientes principales para una bebida láctea sabor chocolate | 3 |
| 1.2.1 Leche | 3 |
| 1.2.2 Cocoa | 4 |
| 1.2.3 Azúcar | 5 |
| 1.2.4 Fructanos de agave | 6 |
| 1.2.5 Carragenina | 9 |
| 1.3 Propiedades de las bebidas lácteas | 11 |
| 1.3.1 Sistema disperso | 11 |
| 1.3.2 Propiedades reológicas | 13 |
| 1.3.3 Estabilidad | 17 |
| CAPÍTULO II. METODOLOGÍA | 20 |
| 2.1 Objetivos | 20 |
| 2.2 Materiales | 20 |
| 2.3 Actividades preliminares | 22 |
| 2.4 Formulación | 22 |
| 2.5 Métodos | 23 |

| | | |
|--------------------------|--|----|
| 2.5.1 | Proceso de elaboración | 23 |
| 2.5.2 | Determinación de humedad | 24 |
| 2.5.3 | Determinación de pH | 25 |
| 2.5.4 | Comportamiento al flujo | 26 |
| 2.5.5 | Estabilidad | 28 |
| 2.6 | Diseño experimental | 30 |
| CAPÍTULO III. RESULTADOS | | 32 |
| 3.1 | pH | 32 |
| 3.1.1 | pH de hidrocoloides en agua | 32 |
| 3.1.2 | pH de bebidas lácteas | 33 |
| 3.2 | Comportamiento al flujo | 34 |
| 3.2.1 | Comportamiento al flujo de hidrocoloides en agua | 34 |
| 3.2.2 | Comportamiento al flujo de bebidas comerciales | 36 |
| 3.2.3 | Comportamiento al flujo de bebidas lácteas con fructanos | 40 |
| 3.3 | Estabilidad | 46 |
| CONCLUSIONES | | 53 |
| RECOMENDACIONES | | 55 |
| REFERENCIAS | | 56 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1.1 | Estructura molecular propuesta para fructanos provenientes de <i>Agave tequilana</i> Weber var. <i>Azul</i> (Mancilla y López, 2006). | 8 |
| 1.2 | Estructura de las unidades básicas en los tres tipos de carragenina (Therkelsen, 1993). | 10 |
| 1.3 | Diagrama esquemático que describe el mecanismo de estabilidad de kappa-carragenina (Spagnuolo et al., 2005). | 13 |
| 1.4 | Comportamiento reológico de los fluidos: 1) Newtoniano; 2) Fluidificante a la cizalla; 3) Espesante a la cizalla; 4) Plástico de Bingham; 5) Herschel–Bulkley (Zhong y Daubert, 2013). | 14 |
| 1.5 | Reordenamientos de la estructura responsables del comportamiento fluidificante a la cizalla (Zhong y Daubert, 2013). | 17 |
| 1.6 | Interacción de kappa carragenina y micelas de caseína que propicia la suspensión de la partícula de cocoa (Bisig, 2011). | 18 |
| 2.1 | Diagrama de bloques para la elaboración de una bebida láctea de chocolate. | 24 |
| 2.2 | Curva de flujo de la muestra con Fructanos 15%, carragenina 0.015% y azúcar 6%. | 27 |
| 2.3 | Curvas de a) transmisión b) retrodispersión característica obtenida de la muestra con Fructanos 5%, carragenina 0.030% y azúcar 6%. | 29 |
| 2.4 | Curvas de a) transmisión b) retrodispersión característica obtenida de la muestra con Fructanos 5%, carragenina 0.030% y azúcar 6% en modo referencia. | 30 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.1 | Efectos principales para el pH. | 34 |
| 3.2 | Comportamiento al flujo de hidrocoloides en agua 5 °C (F= Fructanos, C=Carragenina). | 35 |
| 3.3 | Curva de viscosidad en función del tiempo de muestras comerciales en función del tiempo de cizallamiento a 150 s ⁻¹ a 5 °C. | 37 |
| 3.4 | Comportamiento al flujo de la bebida comercial Lala a 5 °C. | 38 |
| 3.5 | Curva de viscosidad en función de la velocidad de cizalla de las bebidas lácteas comerciales a 5 °C. | 39 |
| 3.6 | Curva de Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de bebidas lácteas con 0.030% de carragenina a 5 °C (F= Fructanos, C=Carragenina, A=Azúcar). | 40 |
| 3.7 | Curva de viscosidad en función de la velocidad de cizalla de bebidas lácteas con 0.015% de carragenina a 5 °C (F= Fructanos, C=Carragenina, A=Azúcar). | 41 |
| 3.8 | Gráfico de efectos principales para la viscosidad de las bebidas a 150 s ⁻¹ . | 43 |
| 3.9 | Gráfico de interacción de los parámetros de estudio en la viscosidad de las bebidas a 150 s ⁻¹ .. | 44 |
| 3.10 | Modelo estructural propuesto para la interacción de los fructanos de agave con la kappa carragenina y las caseínas; adaptación de Bisig (2011). | 45 |
| 3.11 | Comparación de una bebida comercial con una formulación propuesta con Fructanos 5%, carragenina 0.015% y azúcar 3% a 5°C. | 46 |
| 3.12 | Curva de transmisión (arriba) y retrodispersión (abajo) en función de la altura (mm) del tubo cilíndrico que contiene la | 47 |

muestra con 15% de fructanos de agave, 0.015% carragenina y 6% de azúcar.

| | | |
|------|--|----|
| 3.13 | Cinética de espesor absoluto, modelo sigmoideal de la formulación fructanos 15%, Carragenina 0.015% y Azúcar 6%. | 48 |
| 3.14 | Gráfico representativo de la formación de un clarificado en la bebida láctea. | 48 |
| 3.15 | Efectos principales (a) e interacción (b) para la velocidad de clarificado. | 52 |

ÍNDICE DE CUADROS

| Cuadro | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 1.1 | Modelos reológicos para describir el comportamiento de fluidos no newtonianos (Steffe, 1996). | 15 |
| 2.1 | Formulación para la bebida láctea sabor chocolate con carragenina y fructanos de agave. | 23 |
| 2.2 | Nomenclatura | 31 |
| 2.3 | Diseño experimental. | 31 |
| 3.1 | pH de la mezcla en sistemas acuosos de fructanos-carragenina. | 32 |
| 3.2 | pH de bebidas lácteas comerciales. | 33 |
| 3.3 | pH de las formulaciones para bebidas lácteas. | 33 |
| 3.4 | Parámetros reológicos del modelo de la potencia hidrocoloides en agua a 5 °C | 36 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.5 | Parámetros reológicos del modelo de la potencia para bebidas lácteas comerciales a 5 °C. | 39 |
| 3.6 | Parámetros reológicos del modelo de la potencia de las bebidas lácteas a 5 °C. | 42 |
| 3.7 | Velocidad de la disminución de la retrodispersión de luz en función del tiempo, a diferentes concentraciones de fructanos de agave, carragenina y azúcar. | 49 |
| 3.8 | Valores de tiempos en que las bebidas lácteas elaboradas se mantuvieron estables. | 50 |

RESUMEN

En esta investigación se evaluó la adición de dos diferentes concentraciones de fructanos de agave a una bebida láctea sabor chocolate, elaborada con diferentes concentraciones de carragenina y azúcar, a través de su comportamiento al flujo y estabilidad, para proporcionar una alternativa a la aplicación de fructanos de agave en la elaboración de una bebida láctea estable, que conserve las características típicas de una bebida sabor chocolate y que le proporcione sus beneficios como prebiótico. En cuanto al estudio de las propiedades reológicas, las bebidas lácteas desarrolladas mostraron un comportamiento fluidificante a la cizalla tipo potencia, similar al de las bebidas comerciales sabor chocolate sin fructanos de agave; siendo las mezclas con mayor concentración de fructanos y azúcar las que presentaron una mayor viscosidad, sin embargo, al utilizar concentraciones de 15% de fructanos y 6% de azúcar se presentó una bebida más inestable, con la formación de un sedimento de partículas de cocoa y la formación de un clarificado en la parte superior de la bebida. Se encontró que la inclusión de 5% de fructanos en la bebida no presenta diferencias significativas en comparación con las muestras a las cuales no se les adicionaron fructanos, esto es favorable ya que el agregar 5% de fructanos en la bebida láctea, permite obtener todos los beneficios que proporcionan los fructanos, sin modificar las características del producto. La evaluación de la estabilidad de la bebida mostró que en el caso de las bebidas con concentraciones de 15% de fructanos y 6% de azúcar propiciaron una disminución de ésta, mientras que, las bebidas adicionadas con una concentración de 3% de azúcar, 0.03% de carragenina y 5% de fructanos, se mantuvieron estables durante un mayor periodo de tiempo, en comparación con las bebidas sin la adición de fructanos; mostrando

que el uso de fructanos de agave a esta concentración favorece la estabilidad de la bebida proporcionándole características similares a un producto comercial.

INTRODUCCIÓN

Las bebidas lácteas son ampliamente consumidas alrededor del mundo gracias al valor nutricional que aportan por su contenido de leche y sus características sensoriales; sin embargo, algunos consumidores no disfrutan el sabor típico de la leche, por lo que las bebidas saborizadas proporcionan una alternativa para poder consumirla, ofreciendo una gran variedad de sabores y conservando el mismo valor nutricional, siendo las bebidas lácteas que tienen sabor chocolate y café las más populares (Bisig, 2011).

Dentro de su formulación pueden incluir leche, azúcar u otro edulcorante, cocoa en polvo, jugo de frutas, café, agentes aromáticos y otros ingredientes y aditivos (Bisig, 2011); la interacción de estos ingredientes puede afectar la estabilidad del sistema disperso formado, suspensión, emulsión o ambos, dentro de la bebida láctea. La estabilidad del sistema formado es importante, ya que puede repercutir en propiedades de la bebida como características sensoriales y comportamiento reológico, por lo que es una práctica común agregar hidrocoloides para evitar la inestabilidad, por ejemplo, la sedimentación de partículas de cocoa; además de mejorar la consistencia de la bebida (Yañes et al., 2002a).

Las características de los ingredientes utilizados puede causar variaciones en las propiedades físicas y sensoriales de las bebidas lácteas (Yañes et al., 2002a), como ocurre en el caso de la presencia de la sacarosa en la fase acuosa de alimentos que contienen hidrocoloides, puede cambiar su comportamiento al flujo del alimento, debido al incremento o disminución de la viscosidad de dicha fase al

reducir la hidratación del hidrocoloide; el efecto de la interacción sacarosa-hidrocoloide depende de la composición del producto, concentración y las propiedades del hidrocoloide (Yañes et al., 2002b; Costell y Durán, 2000).

El uso de distintos tipos de hidrocoloides en las bebidas lácteas ha sido estudiado, tal es el caso de la carragenina, que es un polisacárido utilizado por sus propiedades espesantes. La interacción que ocurre entre las caseínas presentes en la leche y la carragenina se ha empleado para estabilizar productos lácteos como emulsiones, helados y bebidas (Langendorff et al., 1997). Cabe mencionar que la mayoría de las carrageninas utilizadas en la industria de alimentos son mezcla de los tres tipos que existen; en las bebidas lácteas se ha utilizado mezcla de carragenina tipo kappa y lambda (Prakash et al., 2010), así como en mezcla con otros hidrocoloides como alginato y carboximetil celulosa (Yañes, et al., 2002a).

No obstante, la industria de alimentos ha cambiado sus exigencias y el crecimiento de la industria de alimentos funcionales ha ido en aumento, debido a la demanda de los consumidores por productos alimenticios que aparte de los beneficios nutricionales, proporcionan un efecto benéfico a la salud (Bruzos et al., 2012). Por esta razón se ha buscado el uso de materias primas que proporcionen un mayor beneficio al consumidor; se ha encontrado que el empleo de fructanos en la industria ha comenzado a tener relevancia en los últimos años, además de ser una fuente de fibra se ha demostrado su utilidad como prebióticos; los prebióticos son definidos como ingredientes que estimulan la actividad de las bacterias de la microbiota; especialmente los fructanos de agave han atraído el interés de la industria de alimentos, no solamente debido a su beneficio nutricional, si no por sus aplicaciones tecnológicas (Roberfroid et al., 2010).

En un estudio reciente de un yogur batido se comprobó que el uso de fructanos de agave fortalece la red de proteínas que se forma, depositándose en la superficie de las micelas (Crispín et al., 2015), las aplicaciones tecnológicas de los fructanos dependen directamente de sus características estructurales. Hasta ahora, el enfoque de diversas investigaciones ha estado centrado en los fructanos no

ramificados del tipo inulina, este tipo de fructanos lineales tienden a formar geles; por otro lado, se ha comprobado que los fructanos de agave presentan propiedades de superficie que son de utilidad al desarrollar sistemas dispersos alimenticios (Sosa-Herrera et al., 2016). La estructura ramificada que estos presentan puede conferirle distintas propiedades tecnológicas, en comparación con los fructanos de estructura lineal tipo inulina siendo una alternativa importante para la industria de alimentos (Espinosa y Urias, 2012).

México es considerado como el centro de origen y biodiversidad de las plantas del género *Agave* (Espinosa y Urias, 2012), existiendo un particular interés en los fructanos que se obtiene de las plantas del género *Agave tequilana Weber var. Azul*, la cual es una especie económicamente importante en el país, no sólo por ser la única planta autorizada para la producción de tequila sino porque es una fuente potencial de fructanos (Mancilla y López, 2006). El uso potencial de fructanos de agave debido a sus funciones tecnológicas es limitado y puede resultar de gran interés en la industria, actualmente existe muy poca información documentada entorno a su funcionalidad (Sosa-Herrera y Delgado-Reyes, 2016).

En bebidas lácteas, la concentración de carragenina y azúcar durante el procesamiento a altas temperaturas han sido estudiados (Prakash et al., 2010), así como el efecto del tipo y concentración de hidrocoloide en el comportamiento al flujo y propiedades sensoriales (Yañes et al., 2002b) y la adición de fructanos provenientes de la achicoria como sustituto de grasa (Villegas y Costell, 2007), por lo que la aplicación de los fructanos de agave en la industria de alimentos tiene un futuro prometedor, sin embargo, hasta ahora el estudio de sus propiedades reológicas es escaso y se desconoce su efecto en la estabilidad de las bebidas lácteas, por esta razón, se propone el estudio del comportamiento al flujo y estabilidad de una bebida láctea sabor chocolate con carragenina adicionada con fructanos de agave.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1 Bebidas lácteas

Las bebidas lácteas saborizadas se definen como “un producto listo para beber hecho de leche sin fermentar de diferentes contenidos de grasa, mezclados con ingredientes como azúcar u otro edulcorante, cocoa en polvo, jugo de frutas, café, agentes aromáticos y/u otros ingredientes y aditivos” (Bisig, 2011). De acuerdo con la NOM-155-SCFI-2012, la leche saborizada es aquella a la que se han incorporado otros ingredientes como saborizantes, edulcorantes y colorantes naturales o artificiales, y que contiene al menos 85 % de leche apta para consumo humano. El consumo de bebidas láctea saborizadas está creciendo rápidamente, una gran variedad de sabores y presentaciones están disponibles en el mercado, siendo las de chocolate de las más populares (Yañes et al., 2002b).

Existen distintas variedades de leche sabor chocolate en el mercado, las características varían ampliamente en sabor, color y viscosidad, debido a los ingredientes utilizados en su elaboración; el ingrediente principal en las bebidas sabor chocolate es la cocoa en polvo, sin embargo las partículas de cocoa tienden a sedimentar, por lo que la adición de hidrocoloides es una práctica común en este tipo de bebidas para incrementar la viscosidad del producto final evitando este fenómeno (Holkar et al., 2019; Prakash et al., 2010).

1.1.1 Formulación

La formulación básica de las bebidas sabor chocolate incluye leche, azúcar, cocoa en polvo e hidrocoloides; la elección de algunos de estos ingredientes tiene mayor influencia en las características finales del producto, por ejemplo la alcalinidad de la cocoa en polvo, el tipo y la concentración de hidrocoloide que producen diferencias

en las características finales, así como en las propiedades sensoriales; además del contenido de leche y el contenido de grasa presente, que tienen influencia en la viscosidad, color y los fenómenos de inestabilidad presentes en las bebidas sabor chocolate (Bisig, 2011; Yañes et al., 2002a).

En estudios de desarrollo de productos se propuso una formulación para elaborar una bebida de chocolate, en la cual se usó 12% de leche en polvo, 1.5 % de cocoa en polvo, 7% de azúcar y 0.03% de kappa-carragenina; se encontró que dicha formulación la concentración utilizada de carragenina, azúcar y leche propició un incremento en la viscosidad de la bebida, lo que contribuyó a mantener en suspensión a las partículas de cocoa (Prakash et al., 2010); Villegas y Costell (2007) estudiaron la influencia del contenido de grasa en la leche y la concentración de fructanos provenientes de la achicoria en una bebida láctea de vainilla, encontrando que la formulación con la que obtuvieron una viscosidad similar a las bebidas lácteas hechas con leche entera fue al usar 10% de fructanos de achicoria y 0.02% de kappa-carragenina.

Se han utilizado concentraciones mayores de fructanos de agave en productos alimenticios, en un estudio realizado para conocer el efecto de los fructanos provenientes de la achicoria y de agave en un yogur reducido en grasa se utilizaron concentraciones de fructanos de 20% para ambos tipos de fructanos (Crispín et al., 2015). La dosis máxima que generalmente reconoce como segura la Agencia de medicamentos y bebidas de EE. UU. (FDA por sus siglas en inglés) para el consumo de fructanos de agave para todas las personas mayores de 1 año es de 20 g al día, aunque también se han sugerido dosis más altas, de entre 20-30 g al día como seguras (Douglas y Sanders, 2008).

1.1.2 Proceso de elaboración

Generalmente, la leche saborizada se elabora mezclando los ingredientes líquidos presentes en su formulación, seguido de los ingredientes en polvo, esta mezcla se

homogeniza y se pasteuriza, se recomienda que cuando se realiza la adición de los ingredientes en polvo en los ingredientes líquidos, la mezcla se somete a un aumento de temperatura para conseguir una mayor disolución de los ingredientes en polvo. El control de la temperatura y las condiciones del proceso de elaboración son de vital importancia en las características del producto final; mezclar a temperaturas mayores a 60 °C, que es una temperatura superior a la de la transición a hélice de la carragenina, favorece la interacción de la carragenina con la caseína (Bisig, 2011).

1.2 Ingredientes principales para una bebida láctea sabor chocolate

1.2.1 Leche

En la elaboración de una bebida láctea uno de los ingredientes principales es la leche, la cual es un sistema biológico complejo en el que se encuentra una dispersión coloidal y una emulsión, su composición es de: proteínas 3.25%, grasas 3.76%, carbohidratos 4.84%, sales 0.80% y el resto es agua (Badui, 2006). De acuerdo con la NOM-222-SCFI/SAGARPA-2018 se denomina leche en polvo al producto obtenido mediante la eliminación del agua de la leche en secado por aspersion, donde el contenido de grasa y/o proteínas puede ajustarse únicamente para cumplir con los requisitos de composición. En el caso de las bebidas lácteas se utiliza comúnmente leche en polvo descremada.

El contenido de grasa de la leche influye en las características sensoriales de una bebida láctea, en el caso de las bebidas lácteas sabor chocolate, la grasa de la leche enmascara el sabor del cocoa, siendo las bebidas sabor chocolate elaboradas con leche descremada las que desarrollan un sabor más intenso a chocolate (Bisig, 2011); por lo que el utilizar dicho tipo de leche contribuye a adquirir las características deseadas en el producto final; de acuerdo con la NOM-155-SCFI-2012 la leche descremada en polvo debe tener una composición de proteínas de 34% mínimo, grasas 1.5% máximo y de agua 4% máximo.

Las proteínas que contiene la leche son de vital importancia en la estabilidad de las bebidas sabor chocolate, de su contenido total de proteína (3.3%) la mayor proporción de estas (2.6%) son caseínas (alfa, beta y kappa) (Langendorff et al., 2000). Las caseínas tienden a asociarse en micelas y se ha demostrado que ocurre una interacción entre la kappa-carragenina y la kappa-caseína a un pH cercano al neutro, lo cual se da debido a la atracción de la carga negativa que presenta la molécula de carragenina hacia la carga positiva que presenta la caseína (Bisig, 2011).

1.2.2 Cocoa

La función de la cocoa en una bebida láctea es proporcionarle sabor, color y olor a la bebida, según la NOM-186-SSA1/SCFI-2013, la cocoa es el producto que se obtiene a partir de la presión de la pasta de cacao transformada en polvo. Para las bebidas de chocolate, la cocoa es uno de los ingredientes más importantes, sin embargo, uno de los fenómenos de inestabilidad de las bebidas lácteas se da por la sedimentación de las partículas de cocoa, debido a esto el tamaño de partícula debe ser el menor posible, se recomienda que sea de 10 a 30 μm y menos del 0.5% mayor a 75 μm (Bisig, 2011).

Las cocoes alcalinas son generalmente preferidas en este tipo de productos, entre mayor alcalinidad tengan, el color que otorgan es más oscuro y el sabor es más intenso; sólo el 30-40% de la cocoa es soluble, mientras que el resto se mantiene en suspensión. Adicionalmente, la fuerza del enlace entre las micelas de caseína y la cocoa incrementa a niveles más altos de alcalinización, debido al pH, que se favorecen en la bebida (Bisig, 2011). El primer paso en la producción de cocoa alcalina en polvo es tostar las habas de cacao, se remueve la cáscara de las habas para obtener fragmentos de cacao, se les aplica un tratamiento con carbonato potásico o hidróxido de sodio (proceso que se llama alcalinización) para desarrollar

el color y sabor deseado. La temperatura que se usa en este proceso depende de los requerimientos del producto (Saltini et al., 2013).

La cocoa en su forma natural es ligeramente ácida, con un pH que varía de 5.0 a 5.6. La alcalinización neutraliza la acidez normal de la cocoa, eleva el pH a 7-8, le concede un color más oscuro y reduce el sabor ácido (Li et al., 2012). Los polisacáridos son los componentes principales en la cocoa (que oscilan entre el 34 y el 60%), entre los cuales solamente unos pocos son azúcares (<2,5%); los azúcares principales que se encuentran en los granos de cacao son la fructosa y la sacarosa, de su contenido total de proteínas el 52% son albuminas y 43% globulinas, el contenido de grasa es de alrededor de 11% (Holkar et al., 2019; Li et al., 2012).

1.2.3 Azúcar

El uso principal del azúcar en una bebida láctea es debido a su poder edulcorante (Badui, 2006), además de aumentar la viscosidad (Prakash, et al., 2010). La NMX-F-084-2003 define el azúcar como el producto sólido derivado de la caña de azúcar, constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa; la sacarosa llamada comúnmente “azúcar”, está integrada por una glucosa unida a la fructosa, estableciendo un enlace glucosídico (1-2). Las propiedades funcionales del azúcar son consecuencia de su estructura química, su alto contenido de hidroxilos altamente hidrófilos les proporciona la capacidad de hidratarse y de retener agua al establecer puentes de hidrógeno (Badui, 2006).

El adicionar azúcar en un alimento favorece un aumento en la viscosidad; en el caso de las bebidas lácteas, cuando se usa en conjunto con carragenina, se ha encontrado que concentraciones altas de azúcar conducen a la agregación de micelas de caseína, haciéndolas más susceptibles a la coagulación cuando se exponen al calor; se ha comprobado que las bebidas lácteas sabor chocolate

presentan una mayor formación de sedimento a concentraciones de azúcar de entre 9-11% (Prakash et al., 2010).

1.2.4 Fructanos de agave

La funcionalidad de los fructanos de agave en los alimentos se basa en sus aplicaciones como prebióticos, principalmente son considerados como alimentos funcionales, y son reconocidos por sus efectos benéficos para la salud (Mancilla y López, 2006). No obstante, nuevas investigaciones le han atribuido otras funcionalidades, se ha encontrado que pueden participar como ingredientes activos en la red de caseína formada en un yogur, depositándose en la superficie de las micelas, además de ser una fuente de fibra (Crispín et al., 2015; Espinosa y Urías, 2012). La funcionalidad de los fructanos depende de factores como su origen, estructura y obtención (Sosa-Herrera y Delgado-Reyes, 2016).

Los fructanos son un grupo de oligosacáridos y fructooligosacáridos, presentes en la naturaleza, pueden ser sintetizados por bacterias de los géneros *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc* y *Bacillus subtilis* o se pueden encontrar acumulados en distintas plantas como carbohidratos de reserva. La habilidad de las plantas para sintetizar fructanos se relaciona con su habilidad para sobrevivir a climas fríos y secos. Después del almidón, los fructanos son los polisacáridos más abundantes en la naturaleza; en el caso de la industria de alimentos sólo unas pocas plantas que contienen fructanos se utilizan, incluyendo a la achicoria (*Cichorium intybus*), la alcachofa de Jerusalén (*Helianthus tuberosus*), y el agave (*Agave tequilana*) (Sosa-Herrera y Delgado-Reyes, 2016; Ritsema y Smeekens, 2003).

La fuente de fructanos de agave más comerciales en México proviene de las plantas del género *Agave tequilana* Weber var. *Azul*, conocido comúnmente como agave azul; se cultiva en el estado de Jalisco y es mejor conocido por ser la fuente del tequila. Sin embargo, la planta de *Agave tequilana* se utiliza también para la

producción del jarabe de agave y fructanos. Los fructanos de agave se pueden usar para fortificar alimentos con fibra y para mejorar el sabor, además de mejorar la sensación en la boca al consumirlos; al ser altamente solubles en agua pueden incorporarse fácilmente en bebidas, productos de panadería y productos lácteos (Urías et al., 2008).

El jugo recién extraído de la planta de agave es una fuente de fructanos, que se puede preparar como líquido concentrado o como polvo para usar como un aditivo en los alimentos. Los fructanos de agave en polvo tienen una mejor solubilidad en agua fría y caliente que la inulina obtenida de la achicoria, proporcionando una mayor homogeneidad, haciéndolos ideales para su aplicación en bebidas. De acuerdo con la patente WO 2002066517 A1 (Regordeta y Ogura, 2002), el proceso de obtención de los fructanos de agave en polvo consiste en someter a las cabezas o piñas del agave a una serie de etapas, entre las que destacan: molido, dilución con agua a una temperatura de entre 80-99 °C, seguido de un tratamiento con carbón activado, un tratamiento con intercambiadores iónicos y finalmente la eliminación de calcio. El producto final es una solución de fructanos purificada y con muy bajo contenido en calcio, esta solución se somete a un proceso de secado para obtener fructanos en polvo o en forma de escamas.

Los fructanos del tipo inulina que se obtienen de la achicoria y tienen una estructura lineal son muy usados en alimentos; debido a sus propiedades gelificantes y espesantes, cuando se emulsiona con agua, la inulina forma un gel que tiene una textura similar a la grasa, pero con mucho menor valor calórico; se utiliza en yogur, productos para untar y helados como un reemplazo bajo en calorías para la grasa (Mancilla y López, 2006).

Los fructanos derivados del agave, poseen una configuración ramificada a diferencia de la configuración lineal presente en la inulina, lo que les otorga diferentes aplicaciones tecnológicas y propiedades, por ejemplo, propiedades de superficie las cuales son de utilidad al desarrollar sistemas dispersos en alimentos

(Ponce et al., 2008; Sosa-Herrera et al., 2016). Los fructanos tienen una alta solubilidad, que podría indicar que los grupos hidroxilo están ampliamente disponibles para las interacciones con las moléculas de agua que estén presentes a su alrededor (Demel et al., 1998).

La estructura de los fructanos varía dependiendo del origen, están constituidos por unidades de fructosa y una glucosa unidas por enlaces β del que se identifican cinco tipos de enlace: inulina, levana, graminados, neo-inulina y neo-levana (Sosa-Herrera y Delgado-Reyes, 2016). En 2006, Mancilla y López propusieron por primera vez la estructura molecular (Figura 1.1) para fructanos del género *Agave tequilana Weber var. Azul* señalando que los fructanos del género pueden tener un grado de polimerización de 3 a 29 y la molécula presenta 3 tipos de enlace glucosídico:

- Inulina con enlace β (2-1) lineales
- Levana con enlace β (2-6)
- Neo-inulina contiene una glucosa entre dos unidades de fructosa con enlaces β (2-1)

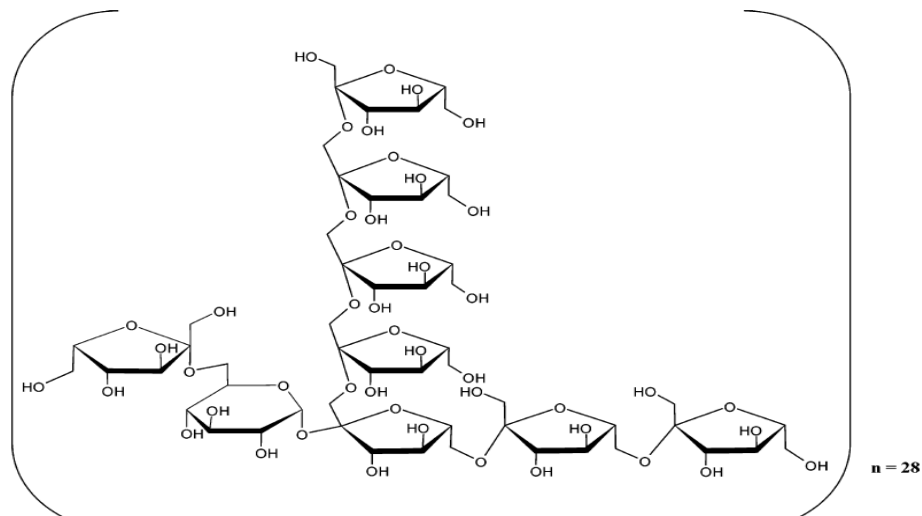


Figura 1.1 Estructura molecular propuesta para fructanos provenientes de *Agave tequilana Weber var. Azul* (Mancilla y López, 2006).

1.2.5 Carragenina

La carragenina es un polisacárido ampliamente utilizado en la industria de alimentos, al usarse a temperaturas por encima de su intervalo de gelificación produce una solución viscosa, por lo que tiene diversas aplicaciones como estabilizante y agente gelificante; su principal aplicación es en productos lácteos como bebidas de chocolate, helados y flanes, en el caso de las bebidas lácteas se usa como estabilizante. La carragenina se extrae de algas rojas, su proceso de manufactura consiste en la extracción con una fuerte solución alcalina, seguido de una purificación donde la disolución de carragenina se filtra y se concentra por una evaporación y se precipita al adicionar alcohol y finalizando con un secado (Therkelsen, 1993).

La carragenina es un polímero lineal conformado por unidades repetidas de galactosa y 3-6-anhidro galactosa, unidas por enlaces α 1-3 y β 1-4, son moléculas que contienen una gran cantidad de grupos sulfato, los diferentes tipos de carragenina varían en el número y posición de los grupos sulfatos que contienen. Existen tres tipos de carragenina que son especialmente importantes en la industria de alimentos, kappa-carragenina, iota-carragenina y lambda-carragenina (Figura 1.2). La carragenina tipo kappa contiene alrededor de 25% de grupos sulfatos, la tipo iota alrededor de 28-35% de grupos sulfatos y la lambda contiene alrededor de 32-39% de grupos sulfatos (Therkelsen, 1993; Langendorff et al,1997).

Dos tipos de carragenina son capaces de formar geles, la iota y la kappa; los geles formados con las carragenina iota son débiles en comparación con geles formados con carragenina kappa; mientras que, la carragenina tipo lambda es incapaz de formar geles debido a la cantidad de grupos sulfatados que contiene (Langendorff et al,1997; Bisig, 2011). Cuando la temperatura se aumenta lo suficiente, el polisacárido experimenta una transición de su estado desordenado a una hélice (estado ordenado). El uso de kappa-carragenina en concentraciones de entre 0.02-0.03%, en una bebida láctea sabor chocolate, puede contribuir a evitar fenómenos

de inestabilidad como el cremado o sedimentación de las partículas de cocoa (Therkelsen, 1993).

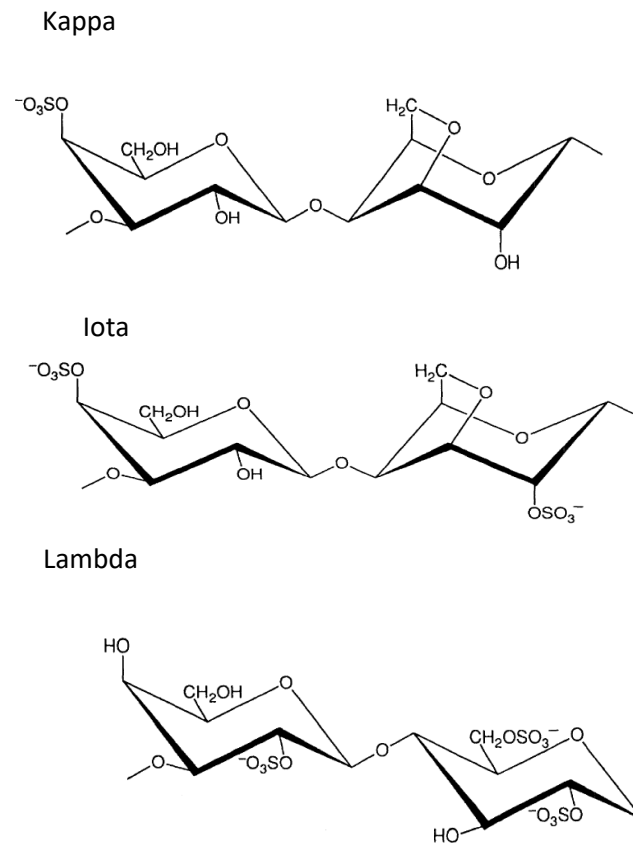


Figura 1.2 Estructura de las unidades básicas en los tres tipos de carragenina (Therkelsen, 1993).

Comercialmente es más común encontrar carragenina que contiene mezcla de los tres tipos; existe otra clasificación para las kappa-carragenina denominada kappa I y kappa II. Las carragenina que se producen a partir de las algas del género *Gigartinaceae*, son las denominadas kappa II, son importantes comercialmente, ya que éstas son híbridos de carragenina iota y kappa (Bixler et al., 2001). La

carragenina kappa II se caracteriza por una alta reactividad con las proteínas de la leche, posee un contenido de grupos sulfatos de 25% a 28% (Gelymar, 2019). La kappa I tiene una mayor capacidad de gelificación en agua, en comparación con la kappa II, sin embargo, la kappa II al conservar una reactividad alta con las proteínas de la leche es principalmente aplicada en productos lácteos (Bixler et al., 2001).

1.3 Propiedades de las bebidas lácteas

Los criterios importantes de calidad para la leche con chocolate incluyen tener un aspecto homogéneo sin separación de fases o sedimento, un color marrón atractivo, un buen sabor a chocolate auténtico, evitando un exceso de dulzor, una viscosidad lo suficientemente alta como para dar cremosidad y una sensación agradable en la boca al consumirlo; se debe evitar la formación de un gel fuerte en la bebida; de igual forma debe tener una buena capacidad de dispersión de la cocoa y evitar un posible sedimento, un valor de pH en un intervalo de 6.2–7.0 y debe ser estable durante el almacenamiento (Bisig, 2011). La composición, así como las propiedades físicas y sensoriales finales de una bebida láctea de chocolate dependen de diversos factores como el contenido de grasa, el tipo de cocoa, el tipo de hidrocoloide utilizado y las condiciones de procesamiento (Yañes et al., 2002a).

1.3.1 Sistema disperso

Debido a los ingredientes utilizados en la elaboración de bebidas lácteas se forman sistemas dispersos complejos que son difíciles de estabilizar, como emulsión, suspensión o ambos; la mayoría de estas bebidas son consideradas emulsiones por el contenido de grasa de la leche (Sánchez, 2017). Cuando se utiliza leche descremada en la formulación solamente se forma una suspensión en la bebida, donde las proteínas de la leche y los estabilizantes utilizados mantienen estable el sistema disperso formado, conservando las partículas de cocoa en suspensión (Pakrash, et al., 2010). Es muy importante cuidar la estabilidad de la bebida y el uso de carragenina contribuye a mantener las partículas en suspensión, debido a que

las interacciones electrostáticas que ocurren en el sistema permiten a la carragenina mantener las partículas insolubles, como cocoa, en suspensión (Sánchez, 2017).

Se han propuesto dos teorías para explicar las interacciones de kappa-carragenina con las micelas de caseína; las caseínas presentes en la leche tienen la particularidad de auto asociación en "micelas", la primera teoría propone que la carga negativa de la kappa-carragenina interactúa con una región cargada positivamente de kappa-caseína (entre los aminoácidos 97–112), adsorbiéndose así a la superficie de la micela de caseína; la segunda teoría propone que la kappa-carragenina forma una red tridimensional, creando un gel débil en el sistema que aumenta la viscosidad de la bebida y reduce la sedimentación, además de mantener las micelas de caseína en suspensión. No obstante, las concentraciones de carragenina usadas en la elaboración de bebidas lácteas se encuentran por debajo de una concentración de 0.05%, la cual es la concentración requerida para gelificar (Bisig, 2011; Langendorff et al., 2000; Holkar et al., 2019).

El uso de kappa-carragenina en productos lácteos es muy común, se ha comprobado que presenta sinergismo con las proteínas lácteas, principalmente por su interacción con las caseínas. Se ha planteado que el mecanismo de estabilidad entre las caseínas y la kappa-carragenina, comienza a darse en el proceso de pasteurización de estos sistemas; a altas temperaturas la kappa-carragenina se encuentra en una forma lineal y se distribuye en toda la suspensión mientras que la kappa-caseína se encuentra principalmente en la periferia de las micelas (Langendorff et al., 2000; Spangulo et al., 2005). Como se muestra en la parte superior de la Figura 1.3. En el intermedio de la Figura 1.3, se puede apreciar como las submicelas de caseína comienzan a agruparse en micelas, mientras las partículas de carragenina comienzan a interactuar entre ellas; en la parte inferior se observa que una vez que la temperatura disminuye la carragenina comienza a presentar una conformación de doble hélice y se produce la interacción entre las hélices de kappa-carragenina y las micelas de caseína, provocando que otras

partículas que se encuentran en la mezcla comienzan a quedar atrapadas dentro de los dominios de las micelas y la carragenina, estabilizando el sistema y previniendo la separación de fases (Spagnuolo et al., 2005).

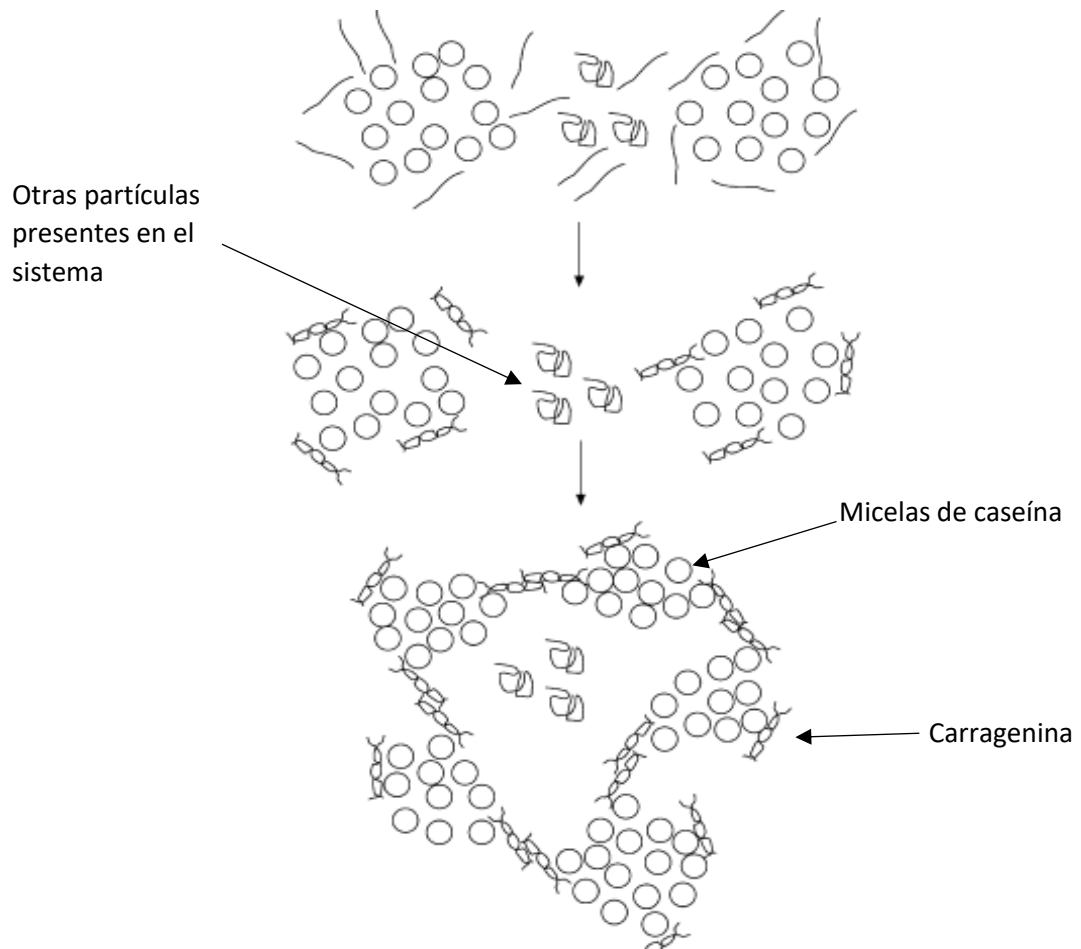


Figura 1.3 Diagrama esquemático que describe el mecanismo de estabilidad de kappa-carragenina (Spagnuolo et al., 2005).

1.3.2 Propiedades reológicas

Las propiedades reológicas de un material están relacionadas con su estructura interna, por lo cual, en el caso de los alimentos, que son sistemas dispersos complejos las propiedades reológicas que presentan son particulares y específicas para cada uno; para conocer dichas propiedades se hace uso de la reología. Steffe

(1996) define la reología como “la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales”. En una prueba reológica bajo cizalla, un material se somete a una velocidad de deformación y se mide el esfuerzo, o viceversa. Conocer el comportamiento al flujo es importante para el procesamiento de alimentos, así como para comprender las interacciones entre los componentes de los alimentos y la dinámica de la formación de sus estructuras internas (Zhong y Daubert, 2013).

Para estudiar este comportamiento, se han propuesto distintos modelos para describir el comportamiento de los fluidos, estableciendo una relación entre el esfuerzo de cizalla (σ) y la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$); el caso más simple se presenta cuando se tiene un fluido newtoniano, donde la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) tiene una relación lineal con respecto al esfuerzo de cizalla (σ) (Figura 1.4), y la viscosidad es proporcional a la relación entre estos. No obstante, muy pocos fluidos tienen este comportamiento, entre ellos el agua, aceites y la leche; sin embargo, como la mayor parte de los alimentos no exhiben este comportamiento y son clasificados fluidos no newtonianos (Mackenna y Lyng, 2013; Steffe, 1996; Zhong y Daubert, 2013).

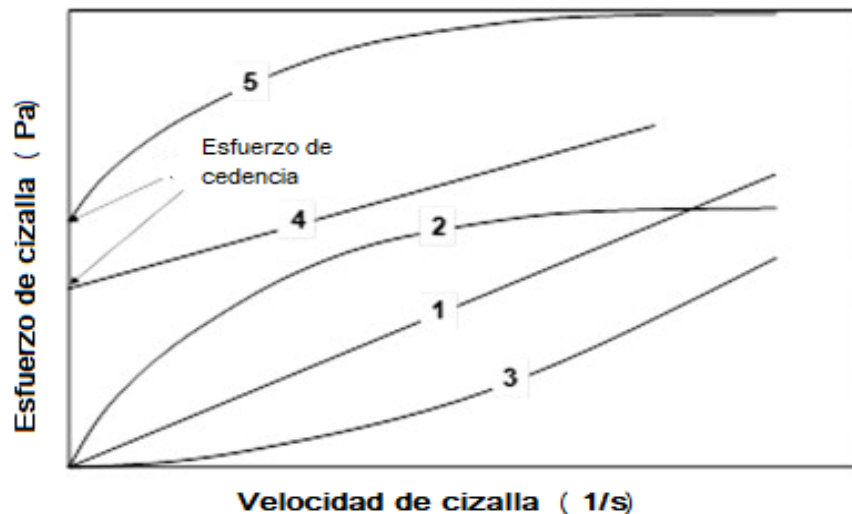


Figura 1.4 Comportamiento reológico de los fluidos

- 1) Newtoniano; 2) Fluidificante a la cizalla; 3) Espesante a la cizalla; 4) Plástico de Bingham; 5) Herschel–Bulkley (Zhong & Daubert, 2013).

En los fluidos no newtonianos la relación entre el esfuerzo de cizalla (σ), y la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) no es lineal, por lo que la viscosidad del fluido no permanece constante, como lo es en el caso de los fluidos newtonianos. En el Cuadro 1.1 se presentan los modelos propuestos para describir el comportamiento al flujo de fluidos no newtonianos. Algunos fluidos disminuyen progresivamente su viscosidad a velocidades de cizalla más altas, estos se denominan fluidificantes a la cizalla (Mackenna y Lyng, 2013); mientras que otros fluidos muestran un incremento en la viscosidad a velocidades de cizallamiento más altas, son denominados espesantes o dilatantes a la cizalla, los cuales son raramente observados en alimentos. En ambos casos la relación que presentan entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla se ajustan al modelo de la potencia, en dicho modelo se incluyen dos constantes para poder describir este comportamiento; K, que representa el índice de consistencia y n, el índice de comportamiento al flujo. Los fluidos pueden ser identificados como espesantes o dilatantes a la cizalla de acuerdo con el valor de n (Zhong y Daubert, 2013).

Cuadro 1.1 Modelos reológicos para describir el comportamiento de fluidos no newtonianos (Steffe, 1996).

| Modelo | Ecuación |
|-----------------------|--|
| Modelo de la potencia | $\sigma = K\dot{\gamma}^n$ |
| Bingham | $\sigma = \sigma_0 + \eta_{\text{plás}} \dot{\gamma}$ |
| Herschel-Bulkley | $\sigma = \sigma_0 + k \dot{\gamma}^n$ |
| Casson | $\sigma^{0.5} = (\sigma_0)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{0.5}$ |
| Carreau | $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (K_1 \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2}$ |
| Cross | $\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + K_1(\dot{\gamma})^n}$ |

Algunos materiales requieren un esfuerzo de cedencia (σ_0), es decir, requieren la aplicación de un esfuerzo para que el material comience a fluir (Sharma et al., 2003); dado que algunos fluidos al aplicar dicho esfuerzo comienzan a fluir presentando el comportamiento de un fluido newtoniano, su comportamiento se ajusta al modelo de Bingham; no obstante, hay otro tipo de fluidos que también requieren un esfuerzo de cedencia, pero al comenzar a fluir estos no presentan una relación lineal entre el esfuerzo de cizalla (σ) y la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$), siendo su comportamiento más parecido a un material fluidificante a la cizalla ajustándose al modelo Herschel-Bulkley o Casson. Si bien estos modelos pueden describir el comportamiento reológico de la mayoría de los fluidos, existen otros que no se ajustan a ninguno de estos modelos para los cuales se han propuesto modelos más complejos como el de Carreau y Cross, los cuales se caracterizan por estar en función de la viscosidad del material (Zhong y Daubert, 2013).

El estudio de las propiedades reológicas de los fructanos de agave en alimentos es escaso, se ha estudiado dispersiones acuosas en condiciones de $\dot{\gamma}=0.01-1000 \text{ s}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, y se encontró que su comportamiento es el de un fluido newtoniano; sugiriendo que la dependencia del comportamiento reológico de los fructanos se encuentra en función de la concentración de estos, presentando un comportamiento cercano al de los monosacáridos de bajo peso molecular, similar al que presentan dispersiones de fructosa o sacarosa (Sosa-Herrera et al., 2016).

En el caso de las bebidas lácteas comerciales sabor chocolate adicionadas con carragenina se encontró que su comportamiento al flujo, en un viscosímetro de cilindros concéntricos, se ajustaba a un modelo fluidificante a la cizalla en condiciones de $\dot{\gamma}=1-300 \text{ s}^{-1}$ a $5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Yañes, et al., 2002b); la concentración e interacción de los ingredientes adicionados en las bebidas lácteas sabor chocolate pueden modificar sus propiedades reológicas; con la adición de carragenina su viscosidad incrementa ya que la interacción con las micelas de caseína presentes en la leche contribuye a la resistencia al flujo (Yañes et al., 2002a).

El comportamiento reológico de un fluido está relacionado con la estructura interna de un material, en el caso de los fluidos newtonianos tienen una estructura mínima y requieren poca fuerza para comenzar a fluir, en el caso del comportamiento de un alimento fluidificante a la cizalla, se debe a una estructura debilitada por la reorganización de los elementos estructurales durante el cizallamiento. Los posibles reordenamientos de la estructura responsables del comportamiento fluidificante a la cizalla de un alimento, en la parte superior de la Figura 1.5 se observa la estructura de alimentos en reposo, mientras que en la parte inferior se observa el comportamiento del alimento durante el cizallamiento, este reordenamiento en la estructura puede ser por la existencia de una reorientación, extensión, deformación o una disgregación de las moléculas (Zhong y Daubert, 2013).

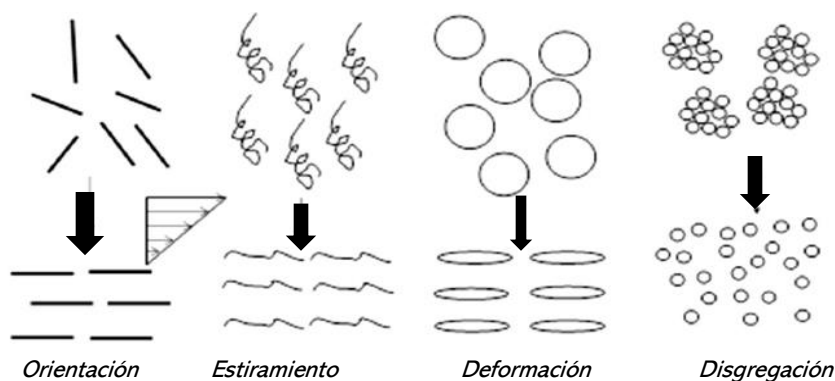


Figura 1.5 Reordenamientos de la estructura responsables del comportamiento fluidificante a la cizalla (Zhong y Daubert, 2013).

1.3.3 Estabilidad

Es un gran reto tecnológico estabilizar las bebidas lácteas, tradicionalmente la kappa-carragenina se utiliza, puesto que, además de aumentar la viscosidad en la bebida, su interacción con las proteínas lácteas favorece esa funcionalidad como estabilizante del sistema disperso formado; el efecto de un tratamiento a altas temperaturas provoca tres tipos de inestabilidad en una bebida láctea con chocolate, tales como sedimentación de las partículas de cocoa, formación de grandes flóculos

y la formación de capas de colores oscuros y claros a lo largo de la bebida (Prakash et al., 2010). La interacción entre la kappa-carragenina y las micelas de proteínas mantienen a las partículas de cocoa en suspensión como se muestra en la Figura 1.6, evitando la sedimentación (Bisig, 2011).

La concentración de carragenina que se recomienda para poder estabilizar una bebida láctea está en un intervalo de 0.02-0.04%; si se usan concentraciones mayores, carragenina puede llegar a formar un gel. Con una concentración de carragenina de 0.03% se da un incremento en la viscosidad de la bebida retrasando la sedimentación, sin embargo, aún se presenta. Las condiciones de procesamiento también pueden afectar la estabilidad del sistema, por ejemplo, con velocidades de agitación lo suficientemente altas se puede obtener un menor tamaño de partícula de los agregados haciendo más estable el sistema, mientras que si no se controla la temperatura usada puede ocurrir la desnaturalización de las proteínas (Therkelsen, 1993; Bisig, 2011).

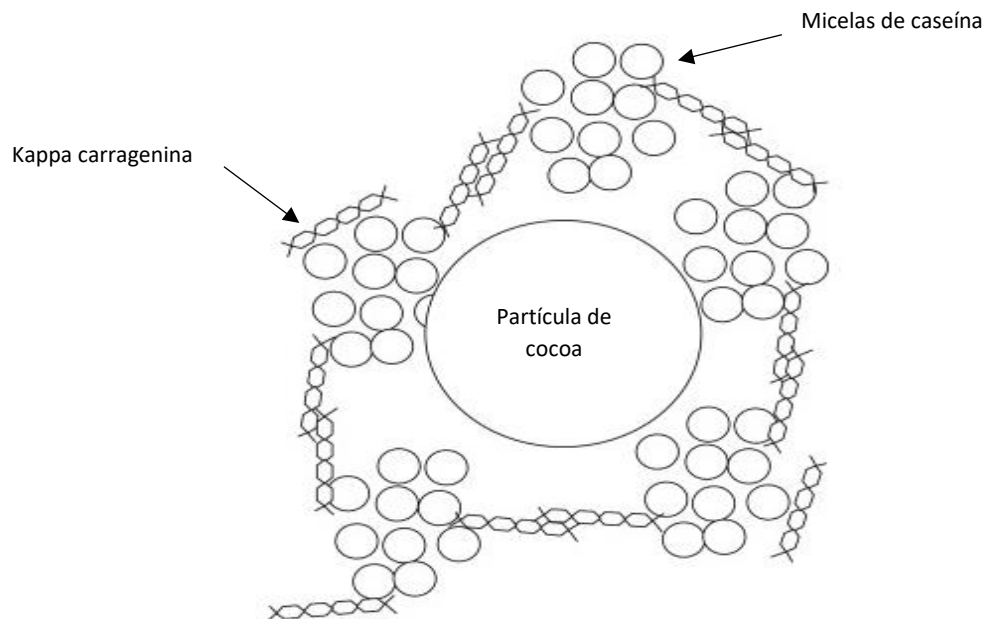


Figura 1.6 Interacción de kappa carragenina y micelas de caseína que propicia la suspensión de la partícula de cocoa (Bisig, 2011).

En intervalos de pH de 6.7-7.1 la carragenina proporciona una mejor estabilidad en productos lácteos, previniendo la precipitación de las caseínas α y β . Por otro lado, el mezclar kappa-carragenina con otros tipos de carragenina u otras gomas se hace con frecuencia para obtener las características deseadas en el alimento, como es el caso de la kappa-carragenina, la cual puede formar geles rígidos pero si se mezcla con otros tipos de carragenina puede mejorar la retención de agua y aumentar la viscosidad del sistema, sin llegar a formar un gel en el alimento; también se sabe que la carragenina tiene un efecto sinérgico con el uso del algarrobo (Therkelsen, 1993) .

El comportamiento al flujo de una bebida láctea se rige por la interacción entre las moléculas de kappa-carragenina y las micelas de caseína (Bisig, 2011); se ha encontrado que los fructanos provenientes de la achicoria se comportan como un soluto con la capacidad de unirse a las moléculas de agua, aumentando la viscosidad (Villegas y Costell, 2007) evitando la agregación de las partículas presentes en la bebida, estabilizando así a la suspensión formada (Meyer et al., 2011); en el caso de la mezcla de carragenina con fructanos de agave aún no hay algún efecto establecido.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de la adición de diferentes concentraciones de fructanos de agave, carragenina y azúcar a una bebida láctea sabor chocolate sobre su comportamiento al flujo y la estabilidad del sistema disperso formado, proporcionando una alternativa de aplicación de fructanos de agave en la elaboración de una bebida láctea estable.

Objetivos particulares

1. Determinar la influencia de la mezcla de fructanos de agave con carragenina en fase acuosa y la mezcla fructanos de agave con carragenina y azúcar, sobre el comportamiento al flujo de una bebida láctea sabor chocolate, mediante cizalla rotacional, seleccionando la formulación que proporcione una bebida láctea con características similares a las bebidas sabor chocolate comerciales.
2. Establecer el efecto de las distintas mezclas de fructanos de agave, carragenina y azúcar en los fenómenos de inestabilidad presentes en una bebida láctea sabor chocolate, mediante transmisión-retrodispersión de luz, seleccionando la formulación que proporcione una bebida estable.

2.2 Materiales

Para la elaboración de la bebida láctea sabor chocolate se utilizó agua purificada sin sodio (E-pura, PepsiCo, México), leche descremada en polvo (humedad 3.13

±0.06%, proteínas 33%, Aislados Ingredientes S.A. DE C.V, Jalisco, México), cocoa alcalina en polvo (humedad 4.09 ±0.005%, Cargill Foods Pó Alcalino AL70, sin lote, EE.UU.), azúcar estándar (humedad 0.10% , Bakers y Chefs), carragenina refinada kappa II (Carralact DGU 5419, lote 27, humedad 11.50 ±0.03%, Gelymar, Chile) y fructanos de agave (Inulina Orgánica 100% fructanos de agave, lote ILP0105170, humedad 4.22 ±0.01%, Mielles Campos Azules S.A. DE C.V., Jalisco, México).

Se utilizaron tres bebidas lácteas comerciales sabor chocolate de distintas marcas; la bebida marca Lala (lote L21) contiene: leche parcialmente descremada rehidratada, azúcar, fructosa, cocoa, carragenina y carboximetilcelulosa (estabilizantes), sal yodada, lactasa, vitamina A y vitamina D.

La bebida marca Hershey's (Lote 57N0213) contiene: leche descremada rehidratada, azúcar, cocoa, mono y diglicéridos, cocoa alcalinizada, carbonato de calcio, saborizantes artificiales, sal yodada, carragenina, goma guar, estevia, vitamina B12, vitamina B1, vitamina A, vitamina D, vitamina E, sulfato de zinc, dextrosa y xantana.

La bebida marca Alpura (Lote G21:04) contiene: leche semidescremada, azúcar, cocoa, fosfato hidrogenado, saborizantes artificiales, carragenina, lactasa, sucralosa, vitamina C, pirofosfato férrico, sulfato de zinc, vitamina E, niacina, pantotenato de calcio, vitamina B6, vitamina B2, vitamina B1, vitamina A, yoduro de potasio, ácido fólico, vitamina K1, biotina, vitamina D y vitamina B12.

Todas las bebidas comerciales evaluadas incluyen en su formulación principalmente como estabilizante la carragenina, en mezcla con otros hidrocoloides; la bebida marca Lala contiene además carboximetilcelulosa, mientras que la bebida marca Hershey's además de la carragenina goma guar y xantana, en ambos casos se utilizó leche descremada rehidratada. En cuanto a la bebida marca Alpura solamente la carragenina fue utilizada como estabilizante y utiliza leche semidescremada en su formulación.

2.3 Actividades preliminares

Se determinó la humedad (%) de los ingredientes en polvo utilizados en una termobalanza marca Ohaus (MB45, EE. UU.), con los resultados obtenidos se realizó un balance de materia en función del contenido de sólidos para determinar el porcentaje real de ingredientes que se utiliza en las formulaciones. Se realizó la caracterización reológica en el reómetro Anton Paar Physica (Rheolab QC, Austria) a tres bebidas lácteas comerciales sabor chocolate marca Lala, Alpura y Hershey's a 5 °C con el dispositivo de doble pared (DG42), donde se establecieron las condiciones de prueba; se usó un cizallamiento previo con una velocidad de cizalla de 150 s⁻¹, un ciclo de ascenso y descenso de 150-500 s⁻¹ y 500-150 s⁻¹ respectivamente con 25 puntos en el cual se tomó lectura cada 10 segundos.

Para determinar el tiempo de hidratación de los hidrocoloides se realizaron dos mediciones, la primera se realizó una vez que se terminaron de preparar las disoluciones, mientras la segunda medición se realizó 48 horas después, con lo cual se comprobó que el tiempo de hidratación de los hidrocoloides no influye el comportamiento al flujo. La caracterización reológica de los hidrocoloides en disolución acuosa se realizó en el reómetro Anton Paar Physica (MCR 301, Austria), la medición se efectuó a 5 °C con un cono CP75, con las mismas condiciones utilizadas para las bebidas comerciales.

2.4 Formulación

De acuerdo con la revisión bibliográfica y actividades preliminares se estableció una formulación para la elaboración de una bebida láctea sabor chocolate, la cual se presenta en el Cuadro 2.1, donde se mantuvo constante la concentración de leche descremada y cocoa alcalina utilizados, mientras que el contenido de agua se cambió en función de la concentración de los niveles de carragenina, azúcar y fructanos de agave.

Cuadro 2.1 Formulación para la bebida láctea sabor chocolate con carragenina y fructanos de agave.

| Ingredientes | % |
|-------------------------|-------------|
| Agua | 65-78 |
| Leche descremada | 12 |
| Fructanos de agave | 0, 5, 15 |
| Azúcar | 3, 6 |
| Cocoa alcalina en polvo | 1.5 |
| Carragenina | 0.015, 0.03 |

2.5 Métodos

2.5.1 Proceso de elaboración

Como se muestra en la Figura 2.1, para la elaboración de la bebida láctea sabor chocolate primero se realizó la disolución de carragenina, usando un agitador magnético (Cimarec, Thermo Scientific, EE. UU.) a 25 °C en agua purificada, con el 50% del agua de la formulación, se mezcló (mezclado 1) por 5 minutos; después se adiciono la leche descremada en polvo y se mezcló (mezclado 2) por 10 minutos. La disolución de fructanos de agave se realizó por separado, usando un agitador magnético (Cimarec, Thermo Scientific, EE. UU.) a 25 °C en agua purificada, con el 50% del agua restante, utilizando un agitador magnético por 5 minutos (mezclado 3), después se agregó el azúcar estándar y se mezcló (4) por 10 minutos.

Una vez que terminó el tiempo de dispersión de polvos, la mezcla 2 de carragenina-leche se adicionó a la mezcla 4 de fructanos-azúcar, continuando con agitación magnética constante; esta mezcla 5 se calentó a 40 ± 0.5 °C, una vez que se alcanzó esa temperatura, se adicionó la cocoa en polvo; la mezcla resultante se homogenizó

por 90 segundos a 3362 RPM (Silverson L4R, RU); después se realizó una pasteurización a 70 ± 1 °C por 15 minutos para después enfriar a 25 ± 1 °C.

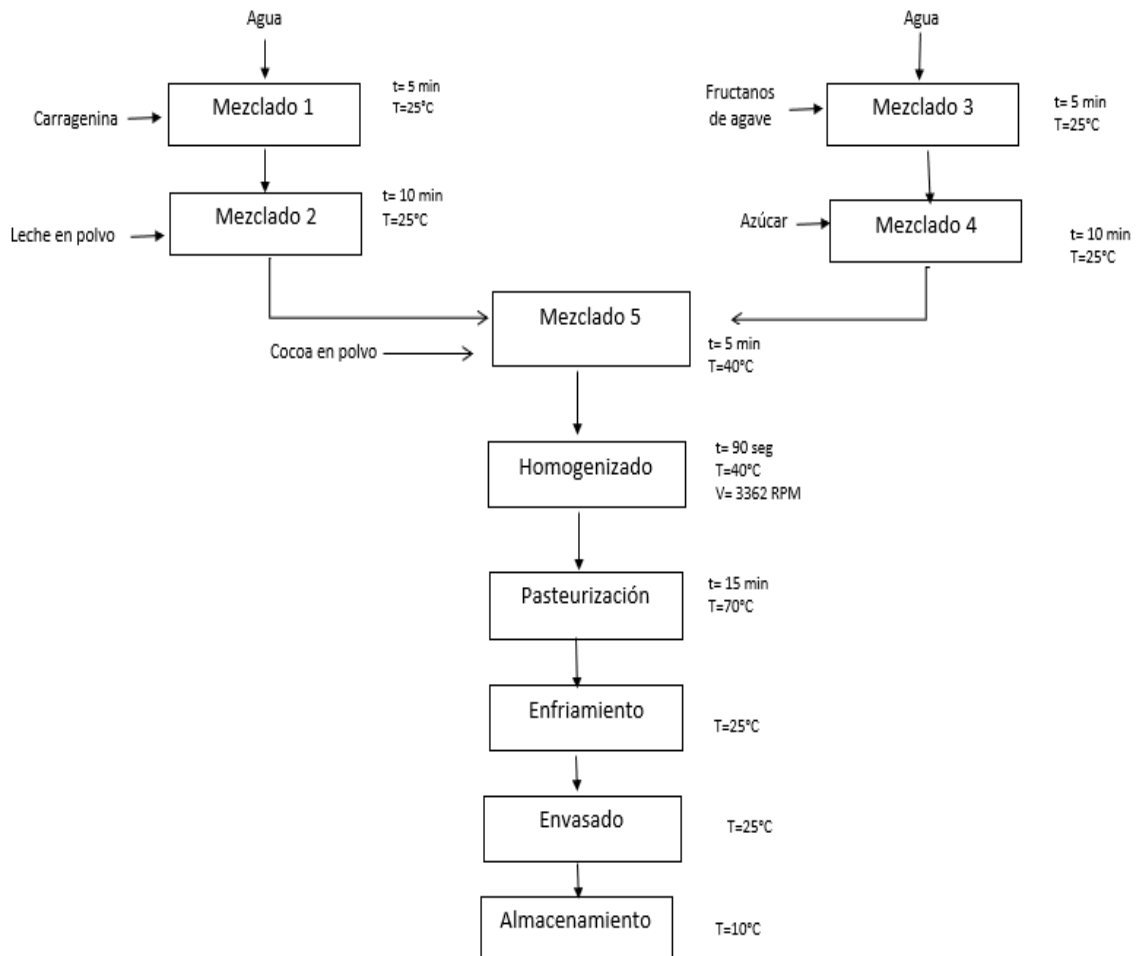


Figura 2.1 Diagrama de bloques para la elaboración de una bebida láctea de chocolate.

2.5.2 Determinación de humedad

La determinación de humedad (%) se realizó en los materiales en polvo utilizados, carragenina, fructanos de agave, azúcar, cocoa alcalina y leche descremada. Esta medición se llevó a cabo en una termobalanza marca OHAUS, modelo MB45 (EE. UU.) con la finalidad de realizar un balance de materia para conocer la cantidad de cada ingrediente que se debe agregar a la bebida láctea al momento de prepararla.

El funcionamiento del equipo se basa en el principio termogravimétrico, al comienzo de la medida, la termobalanza determina el peso de la muestra, a continuación, la muestra se calienta, rápidamente por medio de la unidad halógena desecadora y la humedad se evapora. Durante la operación de desecación, el equipo determina continuamente el peso de la muestra y presenta el resultado (Manual del analizador de humedad, 2011). Se utilizó una muestra de 1 gramo para cada prueba, con el criterio D60, en el cual el resultado presentado se da cuando el valor de peso registrado no presenta cambios mayores a 1 mg durante 60 segundos; la prueba se realizó por triplicado para cada material, de estas repeticiones se calcularon las medidas de tendencia central (promedio, desviación estándar y coeficiente de variación).

2.5.3 Determinación de pH

La medición de pH se realizó a la bebida láctea, esta determinación se realizó debido a que el pH es un parámetro de control que puede servir para explicar los fenómenos de inestabilidad presentes en la bebida, también se determinó el pH a la mezcla de hidrocoloides en fase acuosa en ambos casos a una temperatura de 20 °C; antes de comenzar la prueba, el potenciómetro se calibró, una vez calibrado se prosiguió con la prueba la cual se realizó por triplicado, de las repeticiones se calcularon las medidas de tendencia central (promedio, desviación estándar y coeficiente de variación). La medición se realizó en un potenciómetro, marca Oakton, modelo Bench 700 (EE. UU.).

El funcionamiento del potenciómetro se basa en que el pH que es una medida de la acidez de una solución y se define como $-\log_{10} a_{H^+}$; donde a_{H^+} es la actividad del ion hidrógeno. Las membranas del vidrio del electrodo responden a la actividad de dicho ion, desarrollando su potencial eléctrico. A temperatura constante, este potencial varía linealmente con el pH de la solución que está siendo medida. Generalmente, un electrodo de pH contiene una celda de referencia y una solución salina buffer sellada dentro del cuerpo del electrodo, la solución entra en contacto

con el interior de la membrana de vidrio. El potencial real observado será la suma de los potenciales separados del electrodo de referencia, la referencia interna y el potencial desarrollado en ambas superficies de la membrana del vidrio. Puesto que los potenciales dentro del electrodo de pH son fijados por la solución de llenado y el potencial del electrodo de referencia es constante, cualquier cambio en el potencial del sistema de electrodos a una temperatura determinada será debido a los cambios de pH del que está siendo medido (Manual del potenciómetro Corning Scientific Instrument, 1974).

2.5.4 Comportamiento al flujo

La prueba se realizó en la bebida láctea 24 horas después de su preparación, con la finalidad de conocer el comportamiento al flujo de la bebida, se realizó en un reómetro, marca Anton Paar, modelo Rheolab QC (Austria). La medición se realizó a una temperatura de 5 °C, con una muestra de 12 mL, empleando el dispositivo de doble pared (DG42). Se aplicó un programa de 3 intervalos, con un tiempo de espera de 3 minutos, el primer intervalo corresponde a un pre-cizallamiento de 150 s⁻¹, el segundo intervalo al ascenso con una velocidad de cizalla 150-500 s⁻¹ y el tercer intervalo al descenso con una velocidad de cizalla 500-150 s⁻¹, tomando la lectura cada 10 segundos (25 puntos).

El principio de medición del reómetro se basa en la transferencia de cantidad de movimiento en la muestra contenida entre los dos cilindros, desde el cilindro que gira a una velocidad de rotación, hasta la pared del cilindro que contiene la muestra (en régimen laminar). Se mide el par de torsión o torque del motor, requerido para mover el cilindro, se transforma a esfuerzo de cizalla por una constante de proporcionalidad respectiva, que también depende de las dimensiones del cilindro que rota utilizado y del diámetro del recipiente que contiene la muestra. La viscosidad (es una medida de la resistencia a trasferir cantidad de movimiento) se calcula a través del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla. Las

curvas de flujo se elaboran trazando un gráfico del esfuerzo en función de la velocidad de cizalla (Martínez-Padilla, 2015).

Del reómetro se obtuvieron tablas con valores de velocidad y esfuerzo de cizalla, a partir de ellos se construyó una curva de flujo como la que se muestra en la Figura 2.2. A las curvas de flujo se les aplicó una regresión para ajustar a un modelo reológico, de acuerdo con el modelo reológico al que se ajuste, son los parámetros que se obtienen. La prueba se realizó por triplicado y con los parámetros obtenidos se calcularon las medidas de tendencia central (promedio, desviación estándar y coeficiente de variación).

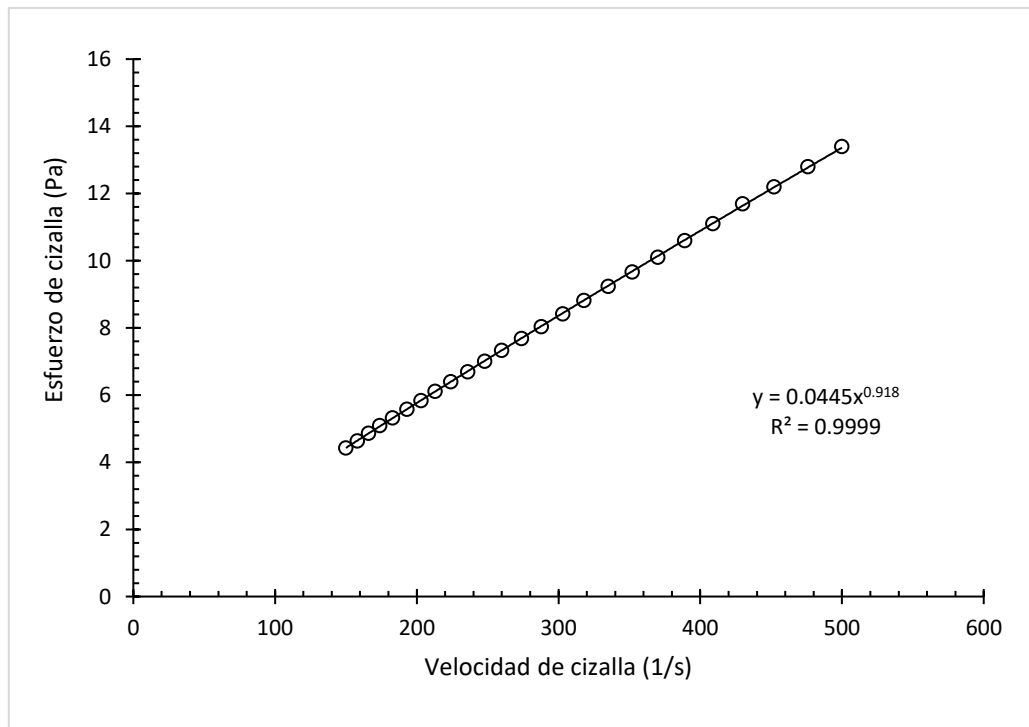


Figura 2.2 Curva de flujo de la muestra con Fructanos 15%, carragenina 0.015% y azúcar 6%.

2.5.5 Estabilidad

Para realizar el análisis que nos permitiera conocer la estabilidad de la bebida láctea se utilizó el equipo Turbiscan, de la marca Formulation, modelo MA2000 (Francia). El principio de medida del equipo consta de un cabezal de detección que se mueve hacia arriba y hacia abajo a lo largo de una celda cilíndrica de vidrio de fondo plano. El cabezal de detección está compuesto por una fuente de luz en el infrarrojo cercano (longitud de onda 850 nm) y dos detectores síncronos. El detector de transmisión recibe la luz que atraviesa la muestra (0° del haz incidente), mientras que el detector de retrodispersión recibe la luz dispersada por la muestra a 135° del haz incidente. El cabezal de detección explora toda la longitud de la muestra (aproximadamente 65 mm), adquiriendo datos de transmisión y retrodispersión cada $40\ \mu\text{m}$, 1625 transmisiones de adquisición y retrodispersión por escaneo (Mengual et al., 1999).

El análisis de estabilidad se realiza mediante un estudio de la variación de los perfiles de retrodispersión o transmisión; si el tamaño y la concentración de partículas no cambia durante las mediciones y no se detectan variaciones de transmisión o retrodispersión, se puede considerar como una muestra estable. Sin embargo, cuando existen fenómenos como sedimentación de partículas, se observan picos locales en la gráfica de retrodispersión como consecuencia del aumento de concentración de partículas; en el caso contrario, cuando las fases se desestabilizan o se separan y aparece una zona de clarificado que al principio no existía, la luz comienza a atravesar la muestra con mayor facilidad, viéndose reflejado en un aumento en la transmisión (Buron et al., 2004)

La medición se realizó a 25°C , con una muestra de bebida láctea de 6 mL, el primer escaneo se llevó a cabo cuando se preparó la bebida, las demás mediciones se realizaron cada 20 horas aproximadamente durante 5 días, la prueba se realizó por triplicado para cada formulación. Como se muestra en la Figura 2.3, a partir de las mediciones y en función de la altura del tubo se obtuvo una curva de transmisión

(*transmission*) y una curva de retrodispersión (*back scattering*) de luz, el primer escaneo siempre se evidencia por ser la curva en color morado y la última en color rojo.

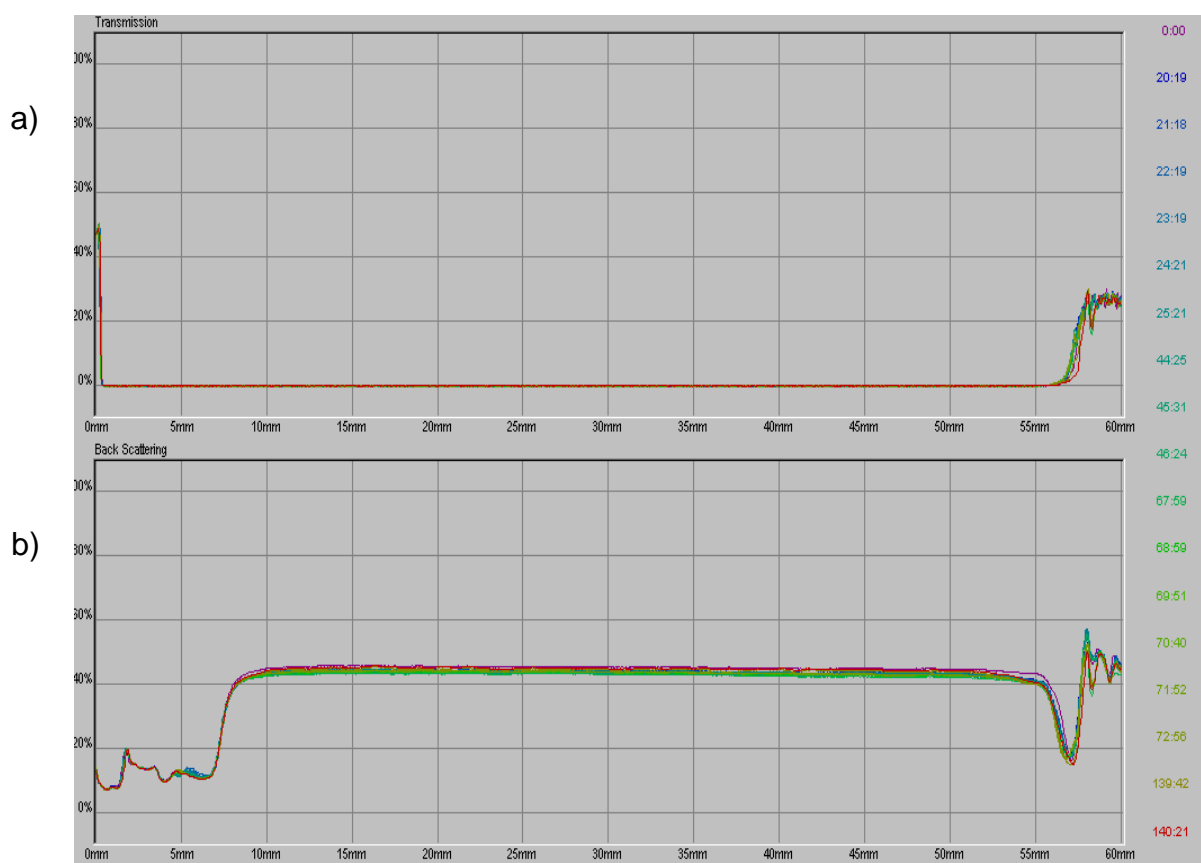


Figura 2.3 Curvas de a) transmisión b) retrodispersión característica obtenida de la muestra con Fructanos 5%, carragenina 0.030% y azúcar 6%.

La estabilidad o inestabilidad de la bebida se determina analizando los gráficos de transmisión y retrodispersión; estos se colocaron en modo de referencia para facilitar su análisis y se identificaron los fenómenos de desestabilización (clarificación y sedimentación) de acuerdo con lo observado en el tubo como se aprecia en la Figura 2.4. Una vez hecho esto, se delimitaron los frentes y las zonas de los fenómenos, para obtener las cinéticas de espesor absoluto de los fenómenos

identificados; con los datos de la cinética, se ajustaron a un modelo según el caso lineal, en el caso del clarificado y sigmooidal para el caso del sedimentado y se calcularon los parámetros correspondientes de cada modelo, en el caso de la cinética lineal se obtuvo la velocidad de clarificado en mm/min y en el caso de la sigmooidal se obtuvo el espesor máximo de sedimento (mm) y el tiempo necesario para alcanzar la mitad del máximo espesor (min).

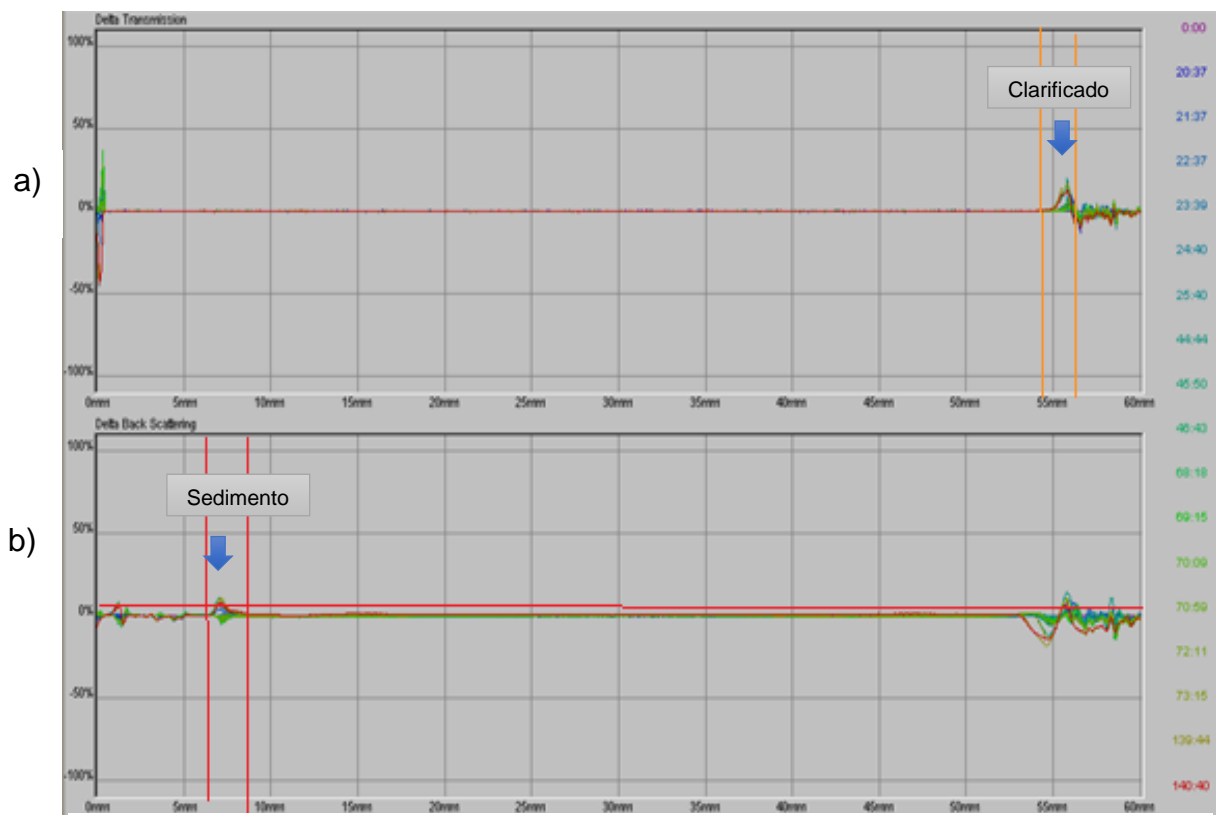


Figura 2.4 Curvas de a) transmisión b) retrodispersión característica obtenida de la muestra con Fructanos 5%, carragenina 0.030% y azúcar 6% en modo referencia.

2.6 Diseño experimental

Se estudiaron tres factores: fructanos de agave, carragenina y azúcar; con dos niveles de variación en la concentración de carragenina (0.015% y 0.03%) y azúcar

(3% y 6%) y tres niveles en el caso de los fructanos de agave (0%, 5% y 15%). En el Cuadro 2.2 se presenta con la nomenclatura que se utilizó en la presentación de resultados, además se realizó la mezcla de fructanos de agave y carragenina en sistema acuoso; de acuerdo con las variables se empleó un diseño factorial desbalanceado como se muestra en el Cuadro 2.3, el cual permite estudiar los efectos que varios factores pueden tener en una respuesta, además de estudiar las interacciones entre los factores.

Cuadro 2.2 Nomenclatura.

| Factores | Nomenclatura |
|--------------------|---------------------|
| Fructanos de agave | F |
| Carragenina | C |
| Azúcar | A |

Cuadro 2.3 Diseño experimental.

| Formulación | | |
|---------------------------|----------------------|-------------------|
| | Fructanos (%) | Azúcar (%) |
| Carragenina 0.03% | 15 | 6 |
| | 5 | 6 |
| | 0 | 6 |
| | 15 | 3 |
| | 5 | 3 |
| | 0 | 3 |
| Carragenina 0.015% | 15 | 6 |
| | 5 | 6 |
| | 0 | 6 |
| | 15 | 3 |
| | 5 | 3 |
| | 0 | 3 |

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1 pH

3.1.1 pH de hidrocoloides en agua

Se determinó el pH de los hidrocoloides en sistema acuoso como parámetro de control, los resultados se muestran en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 pH de la mezcla en sistemas acuosos de fructanos-carragenina.

| Formulación | | pH | Coeficiente de variación (%) |
|---------------|-----------------|--------------------------|------------------------------|
| Fructanos (%) | Carragenina (%) | | |
| 15 | 0.030 | 6.38 ^a ±0.006 | 0.09 |
| 5 | 0.030 | 6.23 ^b ±0.005 | 0.093 |
| 0 | 0.030 | 6.46 ^c ±0.006 | 0.08 |
| 15 | 0.015 | 6.42 ^d ±0.058 | 0.090 |
| 5 | 0.015 | 6.29 ^e ±0.005 | 0.092 |
| 0 | 0.015 | 6.51 ^f ±0.006 | 0.089 |

± Desviación estándar. Valores que comparten el mismo exponente no presentan diferencias significativas ($\alpha=0.05$).

Las mezclas de hidrocoloides en fase acuosa presentaron valores de pH en un intervalo de 6.23-6.51, con tendencia a la neutralidad, si bien, el pH de las mezclas de hidrocoloides presenta diferencias significativas, no existe una tendencia en función la concentración de los hidrocoloides. En general, los valores obtenidos de

pH son cercanos al valor recomendado para bebidas lácteas que es de 6.2-7, este intervalo de pH propicia la interacción carragenina-caseína (Bisig, 2011).

3.1.2 pH de bebidas lácteas

Se determinó el pH de las bebidas lácteas comerciales como referencia para las formulaciones, en el Cuadro 3.2 se muestran los resultados, los cuales se encuentran en los valores de pH recomendados para este tipo de bebidas de chocolate que es en un intervalo de pH de 6.2-7 (Bisig, 2011). En el Cuadro 3.3 se presentan los valores de pH obtenidos para las formulaciones realizadas.

Cuadro 3.2 pH de bebidas lácteas comerciales.

| Marca | pH | Coefficiente de variación (%) |
|-----------|-------------|-------------------------------|
| Lala | 6.62 ±0.006 | 0.08 |
| Alpura | 6.65 ±0.012 | 0.17 |
| Hershey's | 6.84 ±0.012 | 0.16 |

± Desviación estándar.

Cuadro 3.3 pH de las formulaciones para bebidas lácteas.

| | Formulación | | pH | Coefficiente de variación (%) |
|-------------------------------|---------------|------------|---------------------------|-------------------------------|
| | Fructanos (%) | Azúcar (%) | | |
| Carragenina 0.030% | 15 | 6 | 6.55 ^{ab} ±0.009 | 0.18 |
| | 5 | 6 | 6.49 ^c ±0.006 | 0.09 |
| | 0 | 6 | 6.55 ^{ab} ±0.006 | 0.09 |
| | 15 | 3 | 6.50 ^c ±0.002 | 0.15 |
| | 5 | 3 | 6.51 ^c ±0.010 | 0.15 |
| | 0 | 3 | 6.54 ^{ab} ±0.005 | 0.09 |
| Carragenina 0.015% | 15 | 6 | 6.54 ^b ±0.006 | 0.09 |
| | 5 | 6 | 6.55 ^{ab} ±0.006 | 0.09 |
| | 0 | 6 | 6.54 ^{ab} ±0.005 | 0.09 |
| | 15 | 3 | 6.55 ^{ab} ±0.003 | 0.09 |
| | 5 | 3 | 6.55 ^{ab} ±0.002 | 0.09 |
| | 0 | 3 | 6.56 ^a ±0.006 | 0.03 |

± Desviación estándar. Valores que comparten el mismo exponente no presentan diferencias significativas ($\alpha=0.05$).

Es un desafío tecnológico estabilizar las bebidas lácteas sabor chocolate, para esto se recomienda un pH próximo a 6.7, ya que en este pH las caseínas tienden a asociarse en micelas. Se ha demostrado que a este pH ocurre una interacción entre la kappa-carragenina y la kappa-caseína, lo cual se da por la atracción de la carga negativa que presenta la molécula de carragenina hacia la carga positiva que presenta la caseína (Bisig, 2011, Yañes et al., 2002a). En la Figura 3.1 se puede apreciar el efecto sobre el pH de las bebidas elaboradas al utilizar distintas formulaciones, en donde, la variación en las concentraciones de carragenina, azúcar y fructanos no tuvo efecto significativo estadísticamente sobre el pH de la bebida láctea.

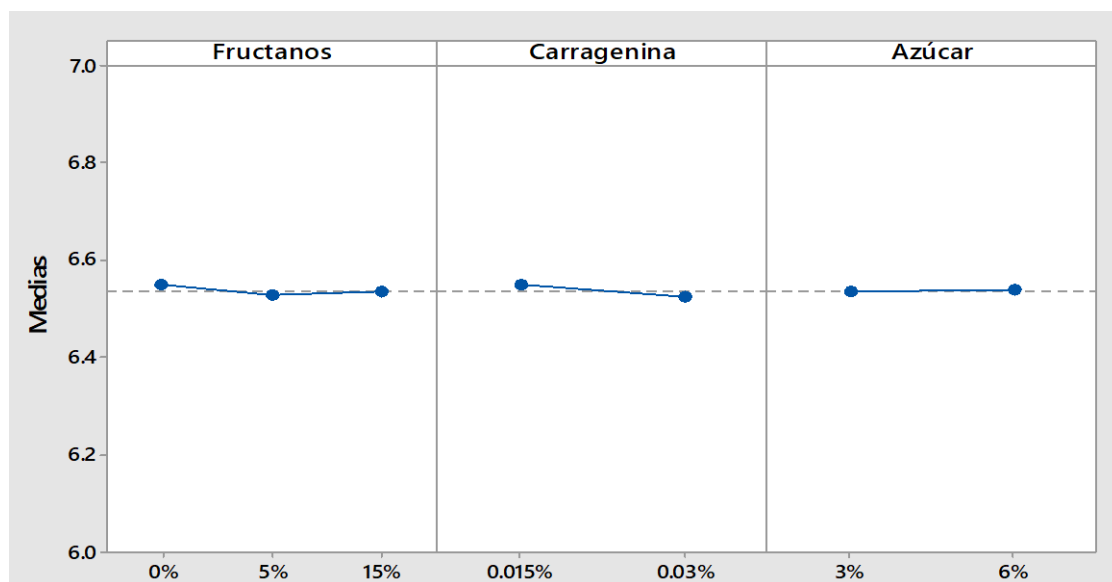


Figura 3.1 Gráfico de efectos principales para el pH.

3.2 Comportamiento al flujo

3.2.1 Comportamiento al flujo de hidrocoloides en agua

Se determinó el comportamiento reológico de los hidrocoloides en agua. En la Figura 3.2, se puede observar un comportamiento característico de un material fluidificante a la cizalla, todas las dispersiones de hidrocoloides evaluadas se

ajustaron al modelo de la potencia, en el cual no existe una relación lineal entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla (Steffe, 1996), al ajustarse a este modelo se tuvieron coeficientes de correlación mayores a 0.999.

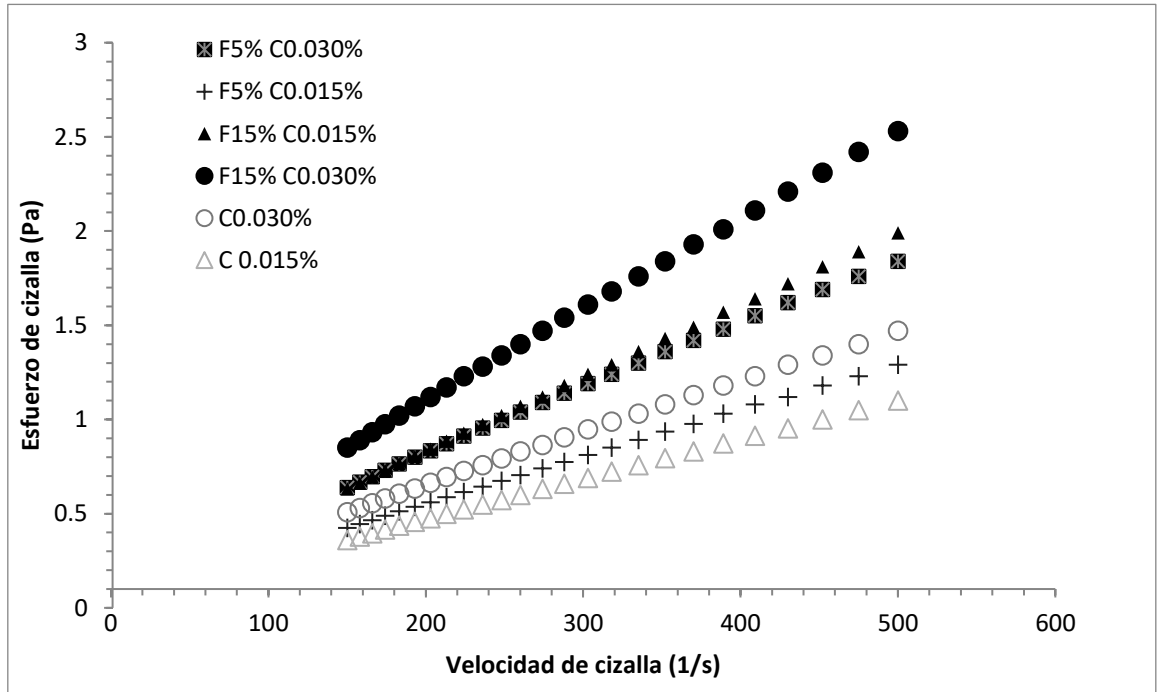


Figura 3.2 Comportamiento al flujo de hidrocoloides en disolución acuosa a 5 °C (F= Fructanos, C=Carragenina).

Como se puede observar en la Figura 3.2, la adición de fructanos de agave en la disolución acuosa con carragenina aumentó la resistencia al flujo en comparación con los sistemas donde se tenía únicamente carragenina. El Cuadro 3.4 presenta el resumen de los parámetros reológicos para el modelo de la potencia. Se puede apreciar que el índice de comportamiento al flujo que se obtuvo fue menor a 1, correspondiente a un material fluidificante a la cizalla, pero, poco dependiente de la velocidad de cizalla (Steffe, 1996). En ambos parámetros del modelo de la potencia se obtuvo un coeficiente de variación menor a 1.6%. En las mezclas de fructanos de agave-carragenina (F-C), se observó un aumento del índice de consistencia a concentraciones más altas, presentando diferencias estadísticamente significativas (entre una concentración y otra; observándose el efecto contrario con el índice de

comportamiento, además de que solamente se detectan diferencias significativas entre las formulaciones sin fructanos y con concentración de 15%.

Con respecto al efecto de la mezcla fructanos-carragenina en disolución acuosa, se observó un aumento de resistencia al flujo, con una clara influencia de la concentración de fructanos utilizada; se sabe que los fructanos en medio acuoso presentan un comportamiento cercano al de los monosacáridos o disacáridos como el azúcar (Sosa-Herrera et al., 2016), por lo en este caso el incremento en su viscosidad e índice de consistencia se le atribuye a la disolución de fructanos en el medio sin intervenir en la hidratación de la carragenina.

Cuadro 3.4 Parámetros reológicos del modelo de la potencia hidrocoloides en agua a 5 °C

| Formulación | | Índice de consistencia k (Pa.s ⁿ) | Índice de comportamiento al flujo (n) |
|---------------|-----------------|--|--|
| Fructanos (%) | Carragenina (%) | | |
| 15 | 0.030 | 0.009 ^a ±5.7 x10 ⁻⁵ | 0.90 ^{ab} ±0.002 |
| 5 | 0.030 | 0.008 ^b ±5.7 x10 ⁻⁵ | 0.88 ^b ±0.002 |
| 0 | 0.030 | 0.006 ^c ±5.7 x10 ⁻⁵ | 0.88 ^b ±0.011 |
| 15 | 0.015 | 0.005 ^d ±1.7 x10 ⁻⁴ | 0.95 ^c ±0.012 |
| 5 | 0.015 | 0.004 ^e ±1.0 x10 ⁻⁴ | 0.93 ^d ±0.008 |
| 0 | 0.015 | 0.003 ^f ±5.7 x10 ⁻⁵ | 0.93 ^d ±0.003 |

± Desviación estándar. Valores que comparten el mismo exponente no presentan diferencias significativas ($\alpha=0.05$).

3.2.2 Comportamiento al flujo bebidas comerciales

Como productos de referencia y para la selección de las condiciones de prueba se realizó la caracterización reológica de tres bebidas lácteas comerciales sabor chocolate marca Lala, Alpura y Hershey's. En el caso de las bebidas marca Lala y Alpura se tuvo que aplicar un cizallamiento previo de 25 puntos a 150 s⁻¹ para poder

evitar la formación de sedimento de las partículas, lo que ocurre durante el cizallamiento previo se puede apreciar en la Figura 3.3, en dicha figura se puede observar una disminución de la viscosidad de la bebida en función del tiempo de cizallamiento en ambos casos, en la bebida marca Lala, esto fue más evidente.

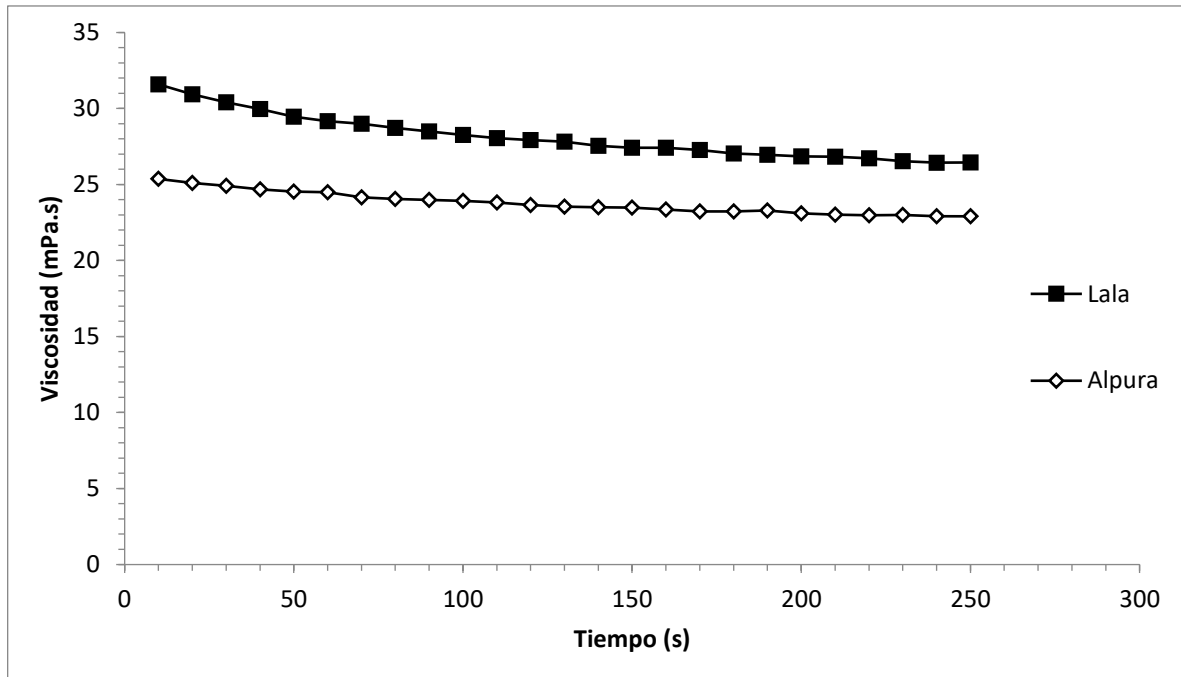


Figura 3.3 Curva de viscosidad en función del tiempo de muestras comerciales en función del tiempo de cizallamiento a 150 s^{-1} a $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

El pre-cizallamiento fue realizado para poder analizar curvas donde no se presente dependencia del tiempo y así obtener curvas en el equilibrio, por lo que se realizaron dos ciclos de ascenso y descenso de la velocidad de cizalla, como se muestra en la Figura 3.4. Se comprobó que la muestra llega al equilibrio en el segundo ciclo de ascenso y descenso de la velocidad de cizalla, debido a esto, para seleccionar las condiciones de prueba de las formulaciones elaboradas se les aplicó de igual manera un cizallamiento previo para poder obtener curvas en el equilibrio. Para evaluar las bebidas lácteas elaboradas solamente se realizó un ciclo de ascenso y

de descenso, por lo cual para obtener los parámetros reológicos únicamente se analizó la curva de descenso de la velocidad de cizalla, siendo esta última la que no presentaba una dependencia del tiempo de cizallamiento.

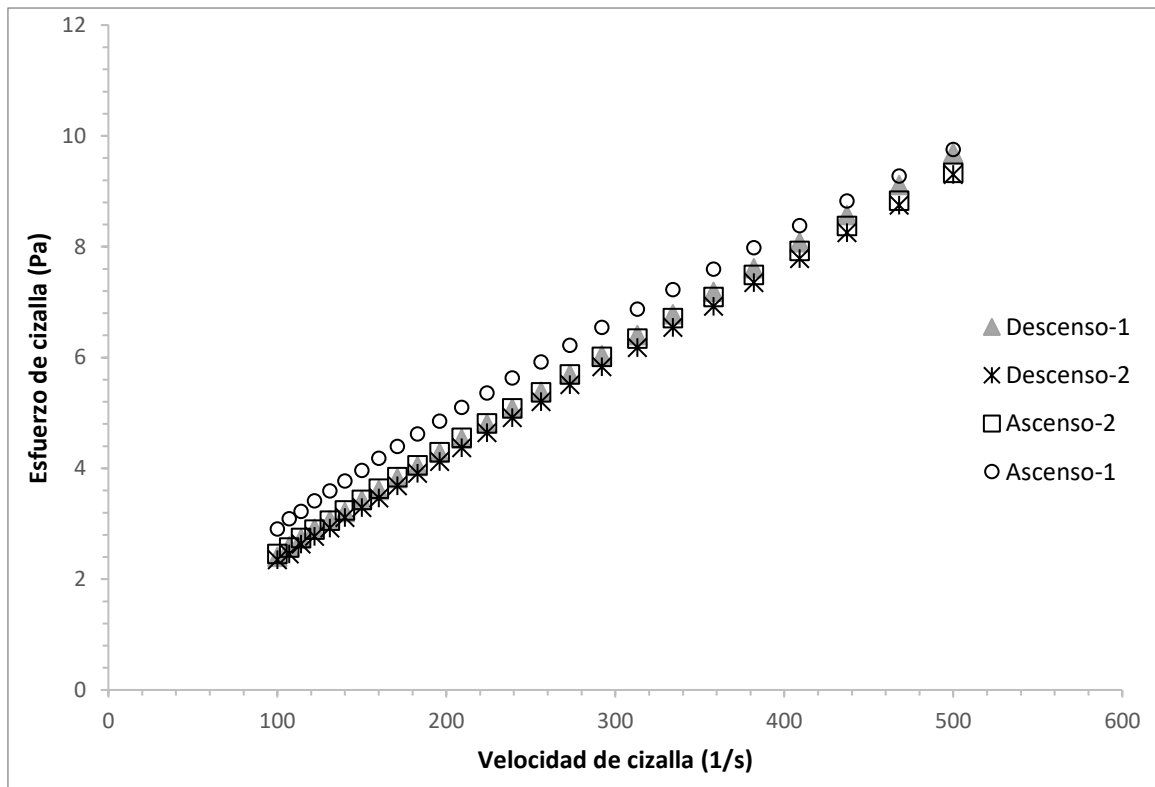


Figura 3.4 Comportamiento al flujo bebida comercial Lala a 5 °C.

En las Figura 3.5 se muestra la viscosidad en función de la velocidad de cizalla de las bebidas comerciales sabor chocolate, sin la adición de fructanos, exhiben el comportamiento de un fluido no newtoniano; el comportamiento de las tres bebidas evaluadas fue de un fluido fluidificante a la cizalla, ajustándose al modelo de la potencia con coeficientes de correlación mayores a 0.999, siendo la bebida marca Lala la que presentó una mayor viscosidad en comparación a las marcas Hershey's y Alpura.

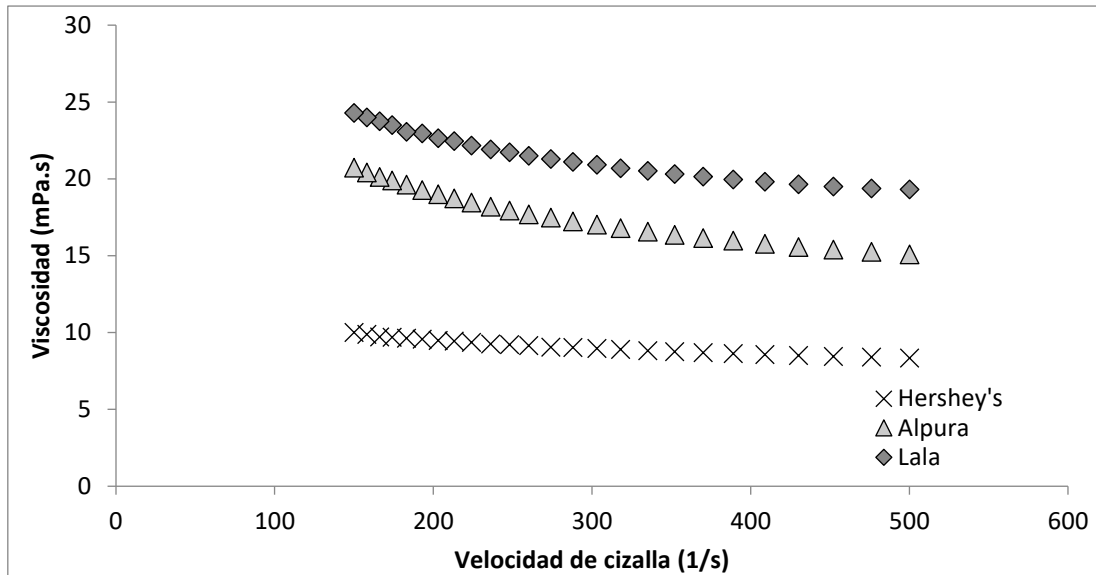


Figura 3.5 Curva de viscosidad en función de la velocidad de cizalla de las bebidas lácteas comerciales a 5 °C.

En el Cuadro 3.5 se presentan los parámetros reológicos de las bebidas lácteas comerciales evaluadas, en los cuales los coeficientes de variación entre las repeticiones fueron menores a 0.19%.

Cuadro 3.5 Parámetros reológicos del modelo de la potencia para bebidas lácteas comerciales a 5 °C.

| Marca | Índice de consistencia (Pa.s ⁿ) | Índice de comportamiento al flujo |
|------------------|---|-----------------------------------|
| Hershey's | 0.022 ±0.002 | 0.847 ±0.056 |
| Lala | 0.043 ± 0.002 | 0.867 ±0.001 |
| Alpura | 0.079 ±0.002 | 0.730 ±0.002 |

± Desviación estándar

Los índices de consistencia obtenidos en las bebidas comerciales fueron cercanos a los valores reportados por Yañes et al. (2002a) quien estudió el comportamiento reológico de bebidas lácteas sabor chocolate comerciales, las cuales presentaron un comportamiento del modelo de la potencia, con índices de consistencia en un intervalo de 0.011 y 0.043 Pa.sⁿ; en el caso de las bebidas marca Hershey's y Lala

el índice de consistencia se encuentra dentro de este intervalo, mientras que en el caso de la bebida marca Alpura se encuentra por encima. La bebida marca Alpura tiene entre sus principales ingredientes leche semidescremada, por lo que es probable que el sistema disperso formado dentro de la bebida cuente con una emulsión, además de contener como estabilizante carragenina solamente, a diferencia se las otras bebidas; las variaciones de los distintos estabilizantes usados en cada bebida se ven reflejadas en la estructura formada; se sabe que el comportamiento reológico de un fluido está relacionado directamente por la estructura interna (Zhong y Daubert, 2013).

3.2.3 Comportamiento al flujo bebidas lácteas con fructanos

En la Figura 3.6 se presenta la curva de viscosidad en función de la velocidad de cizalla de las formulaciones propuestas realizadas con 0.030% de carragenina, mientras que en la Figura 3.7 se presentan las formulaciones realizadas con 0.015% de carragenina, en ambos casos se observó que al igual que las bebidas comerciales presentaron un comportamiento fluidificante a la cizalla.

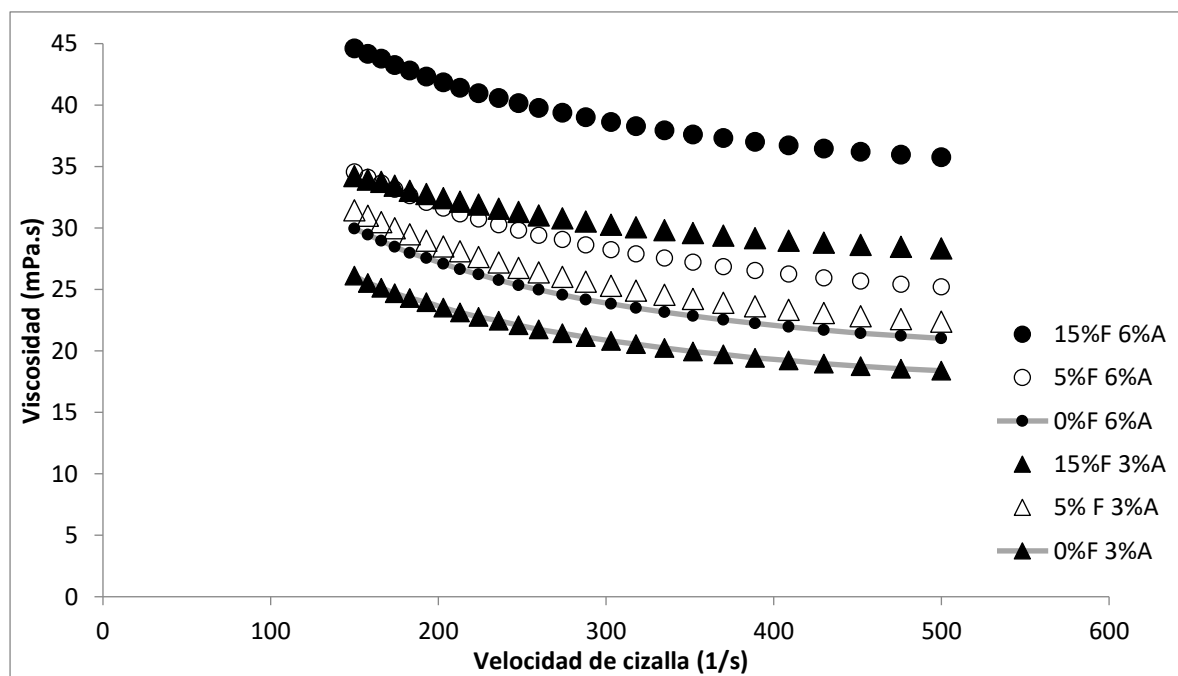


Figura 3.6 Curva de Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de bebidas lácteas con 0.030% de carragenina a 5 °C (F= Fructanos, C=Carragenina, A=Azúcar).

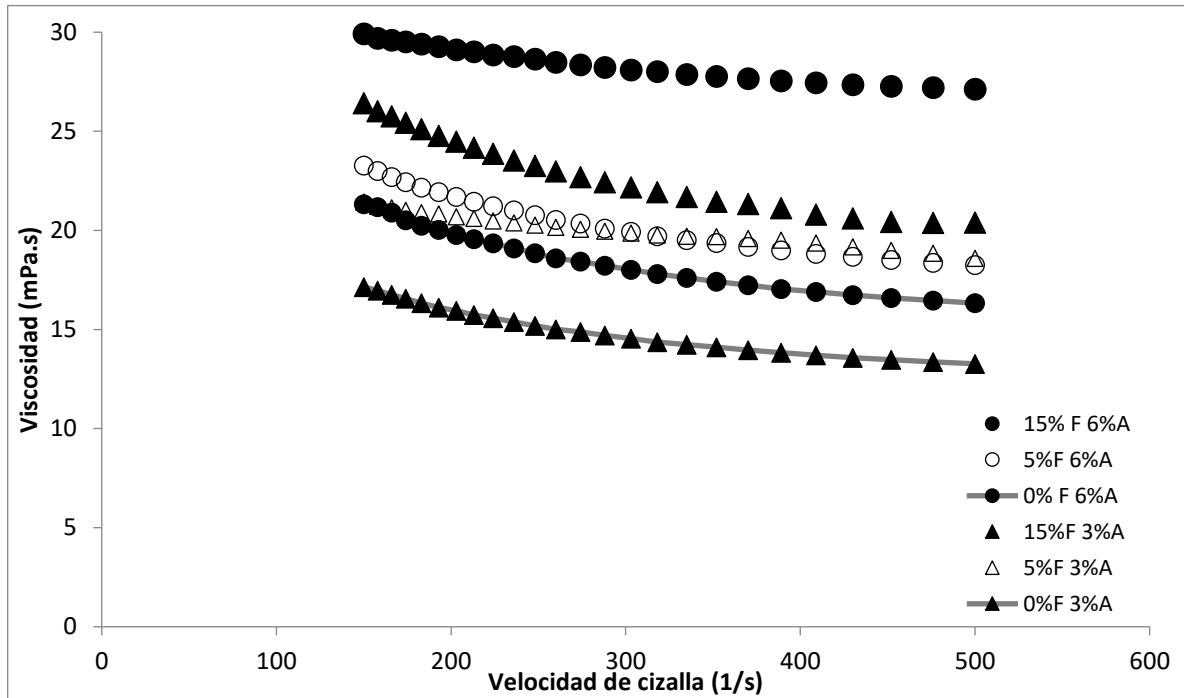


Figura 3.7 Curva de viscosidad en función de la velocidad de cizalla de bebidas lácteas con 0.015% de carragenina a 5 °C (F= Fructanos, C=Carragenina, A=Azúcar).

Como se puede apreciar en las figuras anteriores la adición de fructanos de agave propició un aumento en la viscosidad de las bebidas, en comparación a las formulaciones a las que no se les adicionaron fructanos de agave. El efecto que los fructanos tienen en la viscosidad está en función de la concentración de estos, como se pudo apreciar en los sistemas acuosos de las mezclas fructanos-carragenina, presentando un comportamiento similar a los azúcares, aumentando la viscosidad de las mezclas, tal y como lo reportado en mezclas de fructanos de agave y caseinato de sodio (Sosa-Herrera et al., 2016). Este efecto en la viscosidad se hace más evidente cuando se utilizó 15% de fructanos en las formulaciones.

La adición de un disacárido como en el caso del azúcar contribuye a aumentar la resistencia al flujo de la bebida; la presencia de azúcar en la fase acuosa de un alimento líquido que contiene hidrocoloides como la carragenina puede cambiar su

comportamiento al flujo, puesto que, incrementa la viscosidad en la fase acuosa (Costell y Duran, 2000). En este caso, el efecto de la adición de azúcar, carragenina y fructanos de agave al sistema disperso formado, fue el aumentar la viscosidad de dicho sistema y por consecuencia su resistencia al flujo, este efecto se puede apreciar a concentraciones de 6% de azúcar en comparación a las formulaciones con 3% de azúcar; encontrándose un comportamiento similar al efecto reportado en bebidas lácteas por Prakash et al. (2010). En el Cuadro 3.6, se resumen las viscosidades de las bebidas lácteas elaboradas a una velocidad de cizalla específica, lo que confirma lo anteriormente descrito.

Cuadro 3.6 Parámetros reológicos del modelo de la potencia de las bebidas lácteas a 5 °C.

| Formulación | | | Viscosidad a 150 s ⁻¹ (mPa.s) |
|--------------------|---------------|------------|---|
| | Fructanos (%) | Azúcar (%) | |
| Carragenina 0.030% | 15 | 6 | 44.82 ^a ±0.18 |
| | 5 | 6 | 34.54 ^b ±0.12 |
| | 0 | 6 | 29.71 ^{de} ±0.56 |
| | 15 | 3 | 34.36 ^b ±0.31 |
| | 5 | 3 | 31.45 ^c ±0.15 |
| | 0 | 3 | 26.02 ^f ±0.10 |
| Carragenina 0.015% | 15 | 6 | 29.85 ^{cd} ±0.28 |
| | 5 | 6 | 22.91 ^g ±0.33 |
| | 0 | 6 | 21.23 ^g ±0.08 |
| | 15 | 3 | 26.63 ^{ef} ±0.06 |
| | 5 | 3 | 21.71 ^g ±0.24 |
| | 0 | 3 | 17.41 ^h ±0.25 |

± Desviación estándar. Valores que comparten el mismo exponente no presentan diferencias significativas ($\alpha=0.05$).

Es importante mencionar que las muestras con concentraciones de 0.015% de carragenina, azúcar 6% y con la adición de 5% de fructanos de agave y sin la adición de estos, no presentaron diferencias estadísticamente significativas en la viscosidad de la bebida (Cuadro 3.6). En la Figura 3.8, al estudiar los efectos principales se puede observar que el azúcar fue el factor que menor efecto tuvo sobre la viscosidad de la bebida láctea; la concentración de carragenina, es el parámetro que tuvo un mayor efecto, mostrando una tendencia a aumentar con respecto a la concentración, así como con la concentración de fructanos de agave.

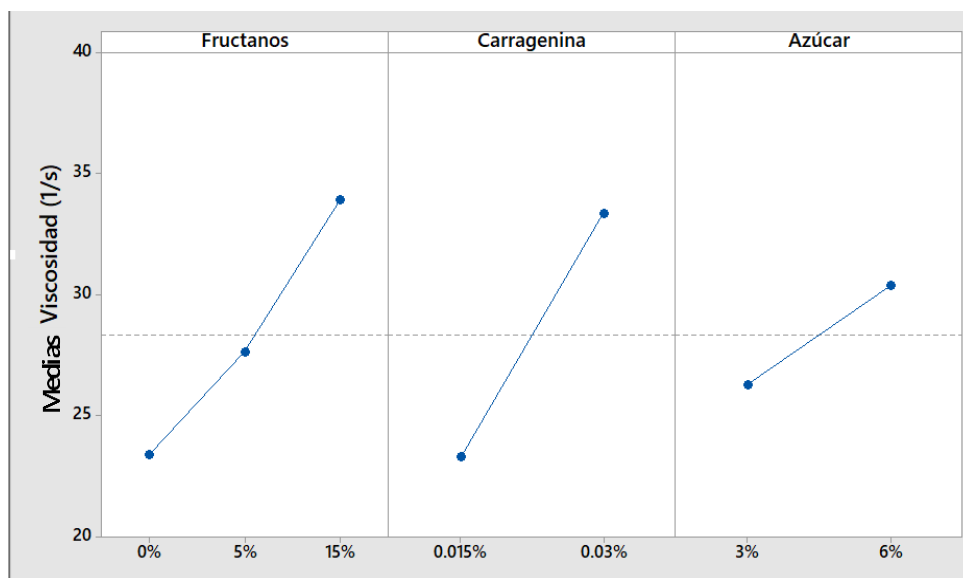


Figura 3.8 Gráfico de efectos principales para la viscosidad de las bebidas a 150 s⁻¹.

De igual manera, al estudiar la interacción de la carragenina, fructanos y azúcar con respecto a la viscosidad desarrollada en la bebida, como se aprecia en la Figura 3.9, se observa que ninguna de las variables utilizadas tiene un impacto significativo, a menos que se encuentren a la mayor concentración propuesta. Como se ha explicado, la interacción entre la carragenina y la caseína es fundamental para mantener en suspensión a las partículas de cocoa de la bebida; un incremento en la viscosidad de la bebida láctea favorece la suspensión de dichas partículas (Prakash, et al., 2010). Como se puede observar en la Figura 3.9, con el aumento

en la concentración de fructanos, carragenina y azúcar se presentó un aumento en la viscosidad de la bebida

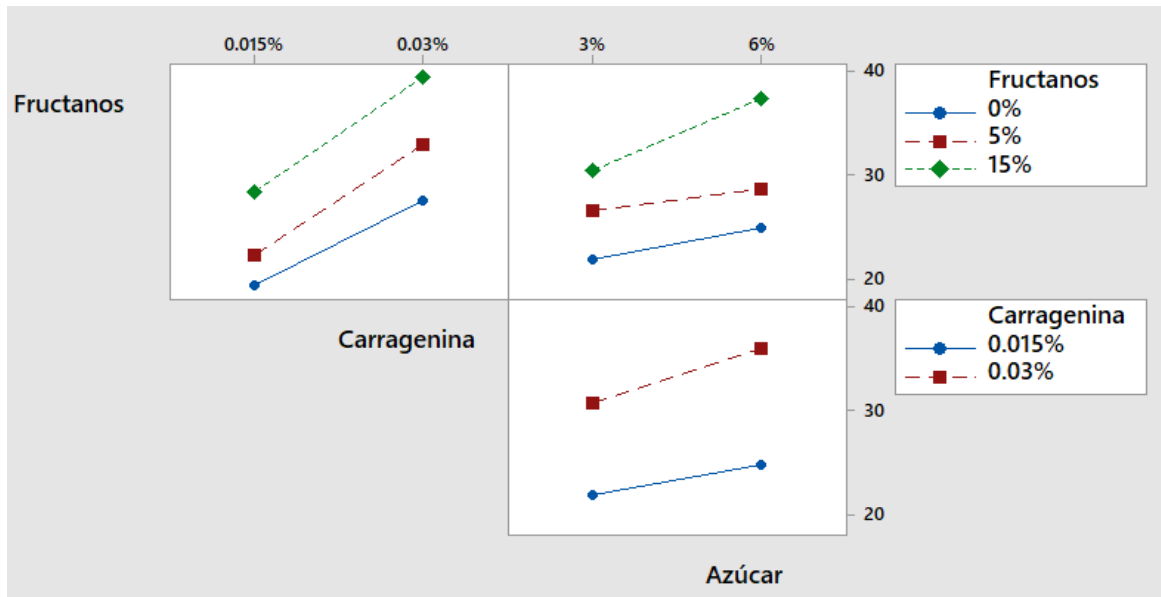


Figura 3.9 Gráfico de interacción de los parámetros de estudio en la viscosidad de las bebidas a 150 s⁻¹.

El adicionar una mayor concentración de fructanos sugiere que estos podrían obstaculizar la hidratación de la carragenina, por lo que se propone un modelo estructural, tomando como base el propuesto por Bisig, 2011, como se muestra en la Figura 3.10. En este la partícula de cocoa en el centro se mantiene en suspensión dentro de la estructura formada por la interacción de la carragenina y las micelas de caseína concentradas, debido a las interacciones entre las hélices de carragenina y las micelas de caseína en la periferia y la interacción entre las hélices de carragenina adyacentes, donde los fructanos se depositan en la superficie de las micelas, de acuerdo con lo propuesto por Crispín et al. (2015) y Espinosa y Urías (2012). El uso de altas concentraciones de fructanos de agave podría sugerir que estos rodean las micelas de caseína interfiriendo con la interacción con las partículas de carragenina.

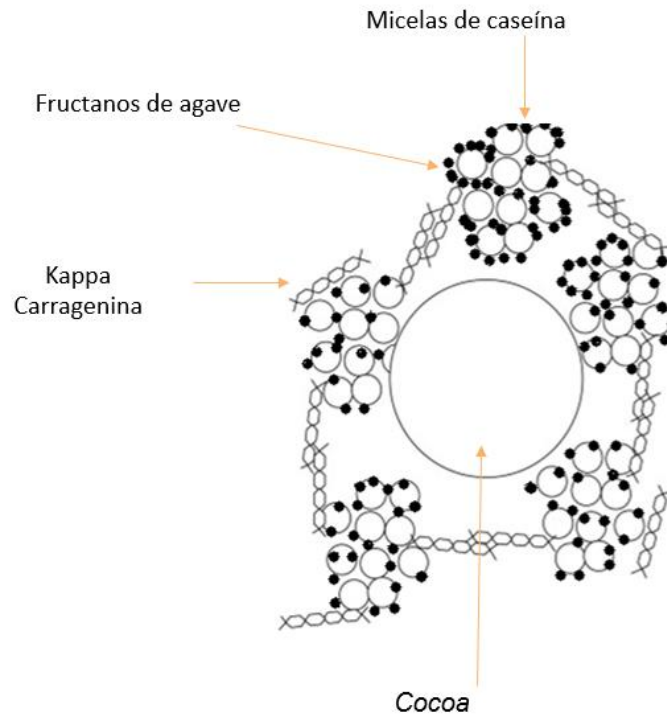


Figura 3.10 Modelo estructural propuesto para la interacción de los fructanos de agave con la kappa carragenina y las caseínas; adaptación de Bisig (2011).

El adicionar concentraciones de 15% de fructanos no favorece la estabilidad del sistema formado dentro de la bebida láctea, sin embargo, la adición de 5% de fructanos no presenta diferencias significativas en la viscosidad del sistema, en comparación a las formulaciones sin la adición de fructanos; al comparar las formulaciones elaboradas con las bebidas comerciales se encontró que la formulación que presenta un comportamiento reológico cercano al de una bebida comercial, es la formulación realizada con fructanos 5%, azúcar 3% y carragenina 0.015%, la cual tuvo un comportamiento similar a la bebida marca Lala como se puede observar en la Figura 3.11.

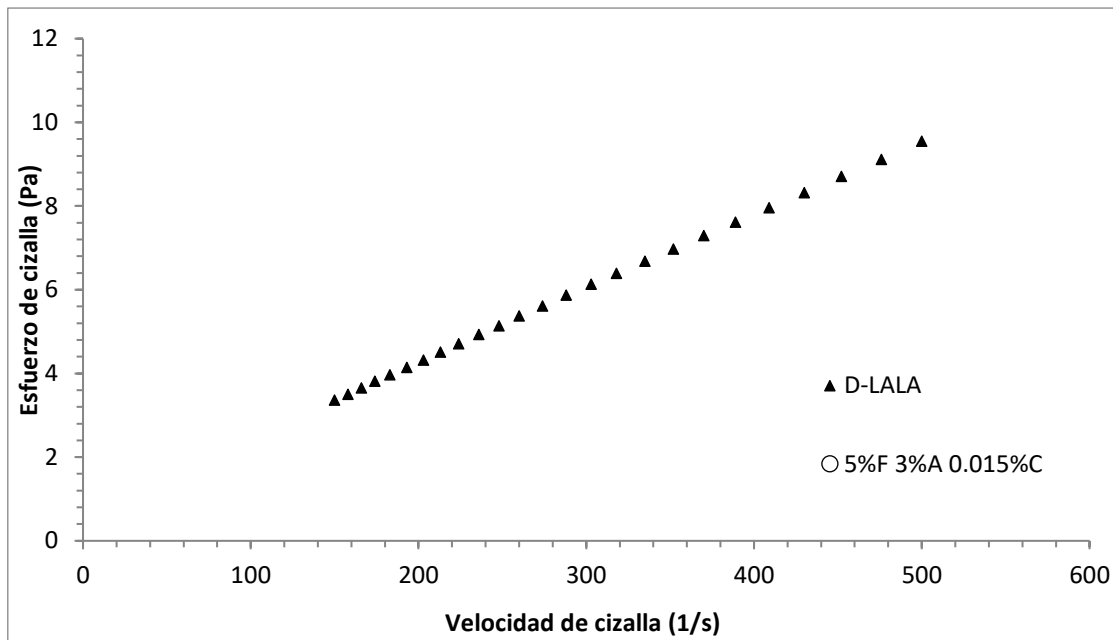


Figura 3.11 Comparación de una bebida comercial con una formulación propuesta con Fructanos 5%, carragenina 0.015% y azúcar 3% a 5°C.

3.3 Estabilidad

La bebida láctea sabor chocolate puede presentar tres tipos de inestabilidad tales como: sedimentación de las partículas de cocoa, formación de grandes flóculos y la formación de capas de colores oscuros y claros (clarificados) (Prakash et al., 2010). En la Figura 3.12 se presenta una curva de transmisión y retrodispersión de luz característica de las formulaciones de la bebida láctea elaboradas; como consecuencia de los fenómenos de inestabilidad presentes, se observan picos, que indican variaciones de la transmisión de luz en la parte superior de la gráfica o de la retrodispersión de luz la parte inferior de la gráfica.

Como se puede apreciar en la gráfica se presentan dos fenómenos, la formación de un sedimento, el cual se aprecia en la gráfica con un aumento de la retrodispersión, a mayor concentración de partículas hay mayor retrodispersión, en el caso del clarificado se refleja como un aumento de transmisión, cuando las fases se

desestabilizan o se separan, aparece una zona de clarificación, que al principio no existe y una mayor cantidad de luz comienza a atravesar la muestra, lo que se refleja en el aumento de los valores de trasmisión obtenidos (Buron et al., 2004).

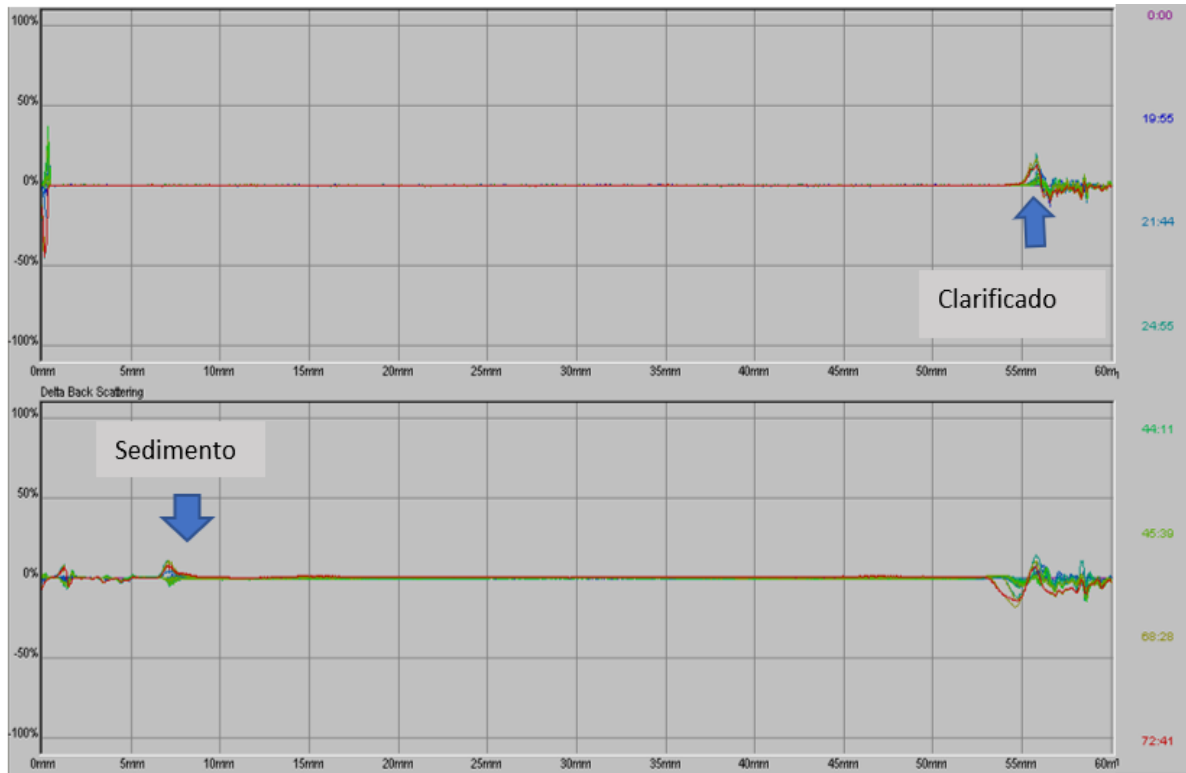


Figura 3.12 Curva de transmisión (arriba) y retrodispersión (abajo) en función de la altura (mm) del tubo cilíndrico que contiene la muestra con 15% de fructanos de agave, 0.015% carragenina y 6% de azúcar.

La presencia de sedimento en las bebidas lácteas, se presentó en la parte inferior de la muestra (6 mm aproximadamente), en casi todas la muestras se observó la formación de un sedimento mínimo, por lo que el fenómeno no fue representativo considerando estas muestras estables, sin embargo, en el caso de la formulación con fructanos 15%, carragenina 0.015% y azúcar 6%, se presentó la formación de sedimento de mayor espesor, el cual se analizó con la cinética de espesor absoluto, la cual se ajustó a un modelo sigmoideal como se aprecia en la Figura 3.13.

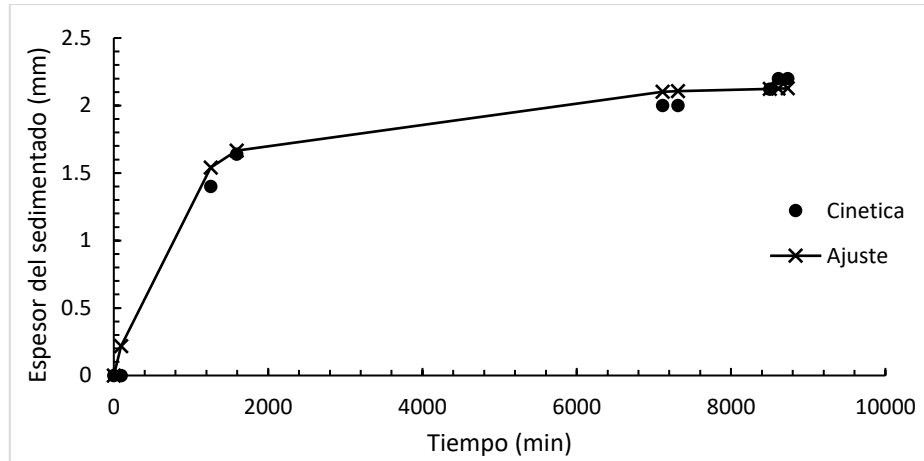


Figura 3.13 Cinética de espesor absoluto, modelo sigmoide de la formulación fructanos 15%, Carragenina 0.015% y Azúcar 6%.

A partir de la cinética de espesor absoluto se obtuvieron los siguientes parámetros: el espesor máximo sedimento, el cual fue de 2.18 mm \pm 0.063 y el tiempo necesario para alcanzar la mitad del máximo espesor el cual fue de 628.86 min \pm 1.72; de la misma manera que en las propiedades de flujo la adición de una mayor concentración de fructanos repercute en la estabilidad de la bebida láctea, interfiriendo con la formación de la suspensión formada y favoreciendo la formación de sedimento de las partículas de cocoa.

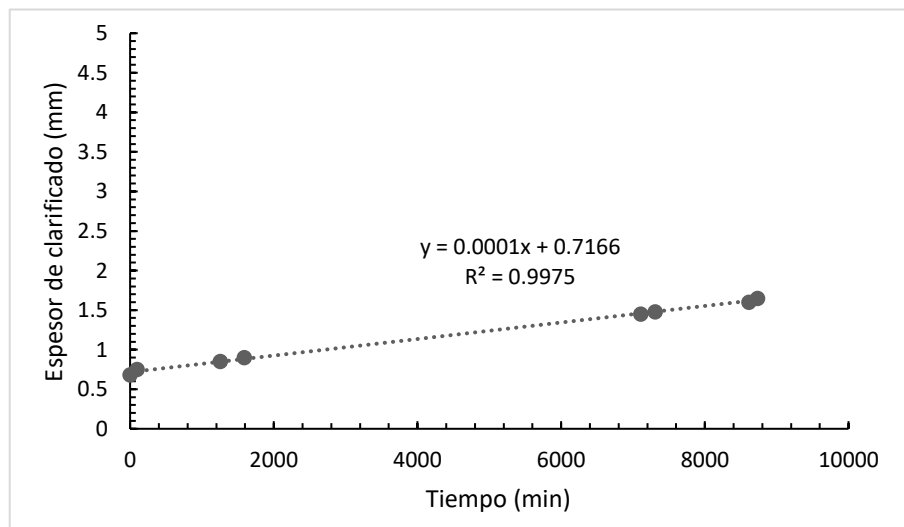


Figura 3.14 Gráfico representativo de la formación de un clarificado en la bebida láctea.

Para la evaluación del fenómeno de clarificado este se presentó en la parte superior de la muestra entre los 55 y 60 mm de altura del tubo que contenía la muestra, se analizó la cinética de espesor absoluto como se muestra en la Figura 3.14 en la que se puede apreciar que la formación del clarificado sigue una tendencia lineal, en el cual la pendiente representa la velocidad de formación del clarificado en la bebida láctea en mm/min. La velocidad de clarificado que se obtuvo para cada formulación se presenta en el Cuadro 3.7, en donde se obtuvieron coeficientes de variación menores a 11.2%.

Cuadro 3.7 Velocidad de la disminución de la retrodispersión de luz en función del tiempo, a diferentes concentraciones de fructanos de agave, carragenina y azúcar.

| Formulación | | | Velocidad de clarificado (mm/min) | |
|---------------|-----------------|------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Fructanos (%) | Carragenina (%) | Azúcar (%) | | |
| 15 | 0.030 | 6 | 6.3×10^{-5c} | $\pm 5.7 \times 10^{-6}$ |
| 5 | 0.030 | 6 | $2.2 \times 10^{-5 gh}$ | $\pm 2.7 \times 10^{-6}$ |
| 0 | 0.030 | 6 | $4.4 \times 10^{-5 de}$ | $\pm 5 \times 10^{-6}$ |
| 15 | 0.030 | 3 | $5.3 \times 10^{-5 cd}$ | $\pm 5.7 \times 10^{-5}$ |
| 5 | 0.030 | 3 | $1.5 \times 10^{-5 h}$ | $\pm 5 \times 10^{-9}$ |
| 0 | 0.030 | 3 | $3.6 \times 10^{-5 ef}$ | $\pm 4.9 \times 10^{-6}$ |
| 15 | 0.015 | 6 | $10.0 \times 10^{-5 a}$ | $\pm 4.5 \times 10^{-1}$ |
| 5 | 0.015 | 6 | $3.4 \times 10^{-5 fg}$ | $\pm 4.4 \times 10^{-8}$ |
| 0 | 0.015 | 6 | $5.6 \times 10^{-5 cd}$ | $\pm 5. \times 10^{-6}$ |
| 15 | 0.015 | 3 | $20.0 \times 10^{-5 b}$ | ± 0.000 |
| 5 | 0.015 | 3 | $4.0 \times 10^{-5 ef}$ | $\pm 5.4 \times 10^{-9}$ |
| 0 | 0.015 | 3 | $4.6 \times 10^{-5 de}$ | $\pm 5.7 \times 10^{-6}$ |

±Desviación estándar. Valores que comparten el mismo exponente no presentan diferencias significativas ($\alpha=0.05$).

Como se puede apreciar de acuerdo con los valores obtenidos de velocidad de clarificado se observa que las formulaciones más estables son aquellas que presentan las menores velocidades de clarificado, siendo las formulaciones a las que se les adicionó 15% de fructanos y 0.015% de carragenina, esto se puede atribuir a que el uso de concentraciones de 15% de fructanos propician una menor estabilidad en la bebida láctea en comparación con las bebidas con menores concentraciones de fructanos de agave.

El análisis realizado a través de la prueba de Tukey reflejó que con concentraciones de 5% de fructanos y no usar fructanos presentan las menores diferencias significativas; las velocidades calculadas para concentraciones de 5% de fructanos oscilan en un intervalo de 2.2×10^{-5} a 4.4×10^{-5} mm/min, en el caso de las velocidades no usar fructanos oscilan entre 3.6×10^{-5} a 5.6×10^{-5} mm/min, mostrando una tendencia a disminuir significativamente la velocidad de clarificado al usar 5% de fructanos. En el Cuadro 3.8 se resumen los tiempos en los cuales las muestras comenzaron a presentar el fenómeno de desestabilización en la parte superior del tubo.

Cuadro 3.8 Valores de tiempos en que las bebidas lácteas elaboradas se mantuvieron estables.

| Formulación | | | Tiempo (min) |
|---------------|-----------------|------------|---------------------------|
| Fructanos (%) | Carragenina (%) | Azúcar (%) | |
| 15 | 0.030 | 6 | 1234.5 ^a ±0.43 |
| 5 | 0.030 | 6 | 1179.8 ^b ±0.72 |
| 0 | 0.030 | 6 | 1160.5 ^d ±0.38 |
| 15 | 0.030 | 3 | 1142.2 ^e ±1.07 |
| 5 | 0.030 | 3 | 1195.2 ^b ±0.28 |
| 0 | 0.030 | 3 | 1178.1 ^c ±0.22 |
| 15 | 0.015 | 6 | 67.8 ⁱ ±1.94 |
| 5 | 0.015 | 6 | 135.6 ^f ±0.17 |
| 0 | 0.015 | 6 | 127.0 ^g ±0.18 |
| 15 | 0.015 | 3 | 66.9 ^j ±0.15 |
| 5 | 0.015 | 3 | 95.3 ^h ±2.05 |
| 0 | 0.015 | 3 | 77.1 ⁱ ±0.48 |

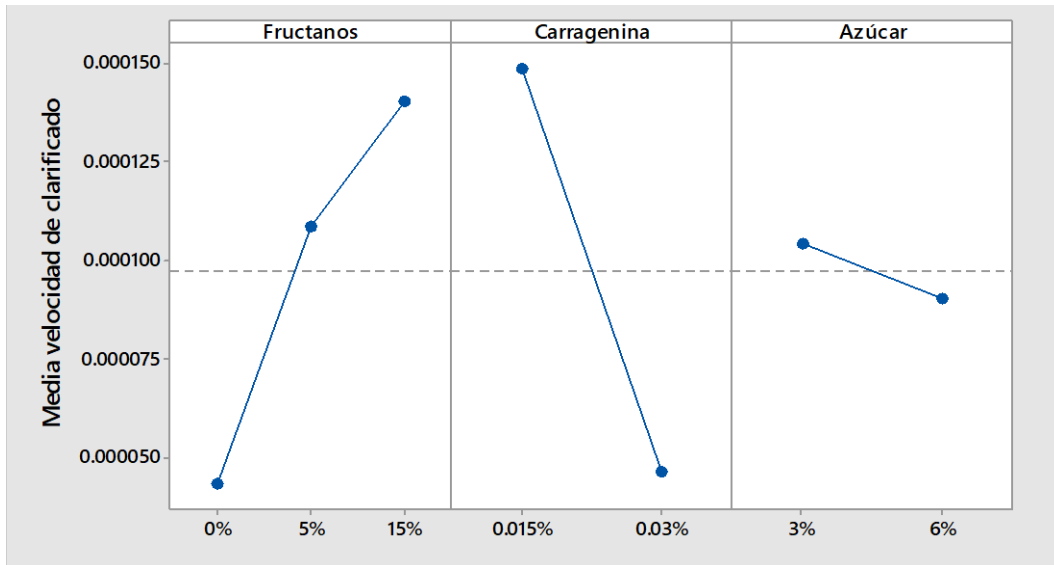
± Desviación estándar. Valores que comparten el mismo exponente no presentan diferencias significativas ($\alpha=0.05$).

Los resultados obtenidos para el tiempo en que dio inicio la desestabilización presentaron diferencias significativas estadísticamente; sin embargo, las formulaciones con carragenina de 0.015% y fructanos 15%, como se puede apreciar en la tabla anterior presentaron el fenómeno de clarificado en un menor tiempo; se sabe que los fructanos tienen una alta solubilidad y se depositan en la superficie de las micelas, a altas concentraciones pueden propiciar una menor estabilidad en el sistema disperso formado dentro de la bebida (Crispín et al., 2015; Demel et al., 1998; Espinosa y Urías, 2012).

Como se puede apreciar en la Figura 3.15, la concentración de fructanos y carragenina son las variables que presentan un mayor efecto en la velocidad de clarificado, sin embargo, se obtuvieron menores velocidades de clarificado a concentraciones de azúcar de 6; se ha encontrado, que altas concentraciones de azúcar pueden causar la agregación de las micelas de caseína que lleva a la coagulación de estas durante tratamiento a altas temperaturas (Prakash et al., 2010), no obstante, en este caso, la cantidad de azúcar no afectó la estabilidad de la bebida láctea.

El efecto de la interacción de las variables se ve mayormente reflejada a concentraciones de carragenina de 0.015%, presentando mayores velocidades de formación de clarificado, sin embargo, las velocidades de clarificado son mínimas en el caso con las formulaciones con 5% y sin la adición de fructanos, por lo que las bebidas se consideran como estables.

(a)



(b)

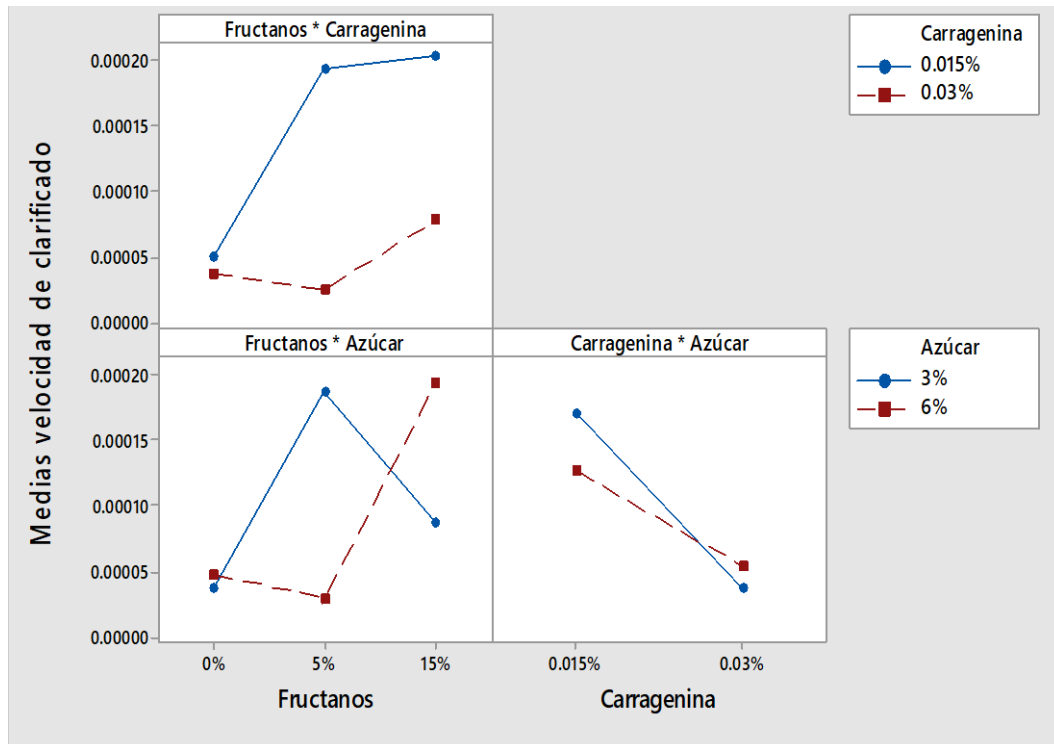


Figura 3.15 Efectos principales (a) e interacción (b) para la velocidad de clarificado.

CONCLUSIONES

En este proyecto se evaluó la funcionalidad de los fructanos de agave como alternativa de uso en el desarrollo de una bebida láctea sabor chocolate, que además de su aplicación como prebiótico puede mejorar la estabilidad del sistema formado dentro de la bebida. Los valores de pH obtenidos con las bebidas lácteas se encontraban dentro del intervalo recomendado que es cercano a la neutralidad.

Referente al estudio de las mezclas de los hidrocoloides en disolución acuosa, se pudo comprobar que las variaciones de concentración de los hidrocoloides no afectaron el pH de la bebida láctea formulada; en cuanto al comportamiento al flujo se encontró que la adición de fructanos de agave presentó una tendencia a aumentar la resistencia al flujo, en comparación con los sistemas que tenían únicamente carragenina.

Las bebidas lácteas comerciales mostraron un comportamiento característico de un material fluidificante a la cizalla, de la misma manera que las bebidas elaboradas con las formulaciones propuestas, se pudo constatar que la adición de azúcar contribuye a aumentar la resistencia al flujo de la bebida. Los resultados indican que no utilizar fructanos y utilizar 5% no afecta significativamente el comportamiento al flujo de la bebida, esto es favorable ya que comprobó que la incorporación de 5% de fructanos fortifican la bebida sin modificar sus propiedades; en comparación con las bebidas comerciales la formulación de fructanos 5%, azúcar 3% y carragenina 0.015% presentó las mismas características que la bebida comercial marca Lala.

Con respecto a la estabilidad de las bebidas lácteas, la presencia de sedimento no fue significativo, excepto en el caso de la formulación con fructanos 15%, azúcar 6% y carragenina 0.015%, en donde la formación de sedimento presentó una

cinética sigmoideal; todas las formulaciones realizadas presentaron un clarificado en la parte superior de la muestra con velocidades de clarificado en un intervalo de 10.0×10^{-5} a 1.5×10^{-5} mm/min, las formulaciones con una mayor velocidad de clarificado fueron aquellas donde se utilizó fructanos 15% y azúcar 3%, las bebidas con adición de 5% de fructanos presentaron las menores velocidades de formación de clarificado en comparación a las bebidas a las que no se les agregó fructanos de agave.

En general la formulación que presentó una bebida más estable fue con la adición de 5% de fructanos de agave y con la mayor concentración de carragenina usada, mostrando que el uso a esta concentración favorece la estabilidad de la bebida proporcionándole características similares a un producto comercial, sin afectar significativamente el comportamiento al flujo de la bebida y permitir la adición de una concentración menor de carragenina.

RECOMENDACIONES

Continuando con la metodología propuesta se propone estudiar la mezcla de fructanos de agave con otros polisacáridos, que son comúnmente usados en las bebidas lácteas como carboximetilcelulosa o xantana, para observar el efecto en la estabilidad y comportamiento reológico al estar en mezcla.

De acuerdo con los resultados obtenidos se recomienda realizar el estudio con concentraciones de fructanos de agave de 10% para comprobar si a estas concentraciones los fructanos presentan un efecto similar a los resultados obtenidos con la adición de 5% de fructanos, favoreciendo la estabilidad de la bebida láctea.

Realizar la evaluación sensorial de una bebida láctea con distintas concentraciones de fructanos de agave y azúcar, para evaluar el efecto que tiene en las propiedades sensoriales y aceptabilidad de la bebida, para poder determinar si el uso de fructanos afecta significativamente en el dulzor de la bebida, evaluando la funcionalidad de los fructanos en el desarrollo de productos reducidos en azúcar.

Actualmente, en la industria de alimentos se ha presentado una tendencia por el uso de materias primas que además de sus propiedades tecnológicas, proporcionen un mayor beneficio a la salud de los consumidores, como es el caso de los fructanos de agave, sin embargo, existen pocos estudios relacionados con la seguridad y beneficios a la salud con respecto al uso de fructanos de agave en las bebidas lácteas, por lo que se recomienda llevar a cabo una evaluación más profunda antes de que puedan ser introducidos comercialmente en un producto alimenticio.

REFERENCIAS

- Badui, S. (2006). *Química de Alimentos*. Alhambra, México.
- Bisig, W. (2011). Liquid milk products: flavored milks. *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Elsevier, Netherlands (pp. 301-306).
- Bixler, H., J., Johndro, K., Falshaw, R. (2001). Kappa-2 carrageenan: structure and performance of commercial extracts: II. Performance in two simulated dairy applications. *Food Hydrocolloids*, 15, 619-630.
- Bruzos, A., Coral, S., Candela G., Bordonada., M., A., Nomdedeu, C. (2012). *Nutrición, Salud y Alimentos Funcionales*. UNED. Madrid, España.
- Buron, H., Mengual, O., Meunier, G., Cayré, I., Snabre, P. (2004). Optical characterization of concentrated dispersions: applications to laboratory analyses and on-line process monitoring and control. *Polymer International*, 53(9), 1205-1209.
- Cilas (2019). Cilas 930 Particle size analyzer. Consultado 14 Marzo 2019. Disponible en https://www.particle-size.com/cilas_lasers_applications.html
- Corning Scientific Instruments (1974). Manual del usuario. Format No:315475, pH electrodes.
- Costell, E., Durán, I. (2000). Sensory and instrumental measures of viscosity. *Trends in Food Engineering*. Technomic Publishing Company (pp. 53-64).
- Crispín, I., G., Lobato, C., C., Espinosa, A., H., Álvarez, R., J., Vernon, C., E. J. (2015). Effect of inulin and agave fructans addition on the rheological microstructural and sensory properties of reduced fat stirred yogurt. *LWT-Food Science and Technology*, 62, 438-444.

- Demel, R., A., Dorrepal, E., Ebskamp., M., J., Smeekens, J., C., Kruijff, B. (1998). Fructans interact strongly with model membranes. *Biochimica et Biophysica*, 98, 36-42.
- Douglas, L., C., Sanders, M., E. (2008). Probiotics and prebiotics in dietetics practice. *Journal American Diet Association*, 108 (3), 510–521.
- Espinosa, A., H., y Urías, S., J.E. (2012). Thermal properties of agave fructans (Agave tequilana Weber var. Azul). *Carbohydrate Polymers*, 87, 2671-2676.
- Gelymar (2013). Carrageenans. Consultado 26 Marzo 2019, disponible en <http://www.gelymar.com/carrageenans/>.
- Holkar, C., R., Jadhav, J., A., Pinjari, V., D. (2019). A critical review on the possible remediation of sediment in cocoa/coffee flavored milk. *Trends in Food Science y Technology*, 86,199-208.
- Langendorff, V., Cuvelier, G., Launay, B., Parker, A., Dkriuf, C., G. (1997). Gelation and flocculation of casein micelle/carrageenan mixtures. *Food Hydrocolloids*, 11, 35-40.
- Langendorff, V., Cuvelier, G., Launay, B., Parker, A., Dkriuf, C., G. (2000). Effects of carrageenan type on the behavior of carrageenan/milk mixtures. *Food Hydrocolloids*,14, 273-280
- Regordeta, P.E., y Ogura, F.T. (2002). Proceso, composición y usos de inulina de agave en polvo y solución. Patente WO 2002066517 A1. México.
- Li, Y., Feng, Y., Zhu, S., Luo, C., Ma, J., Zhon, F. (2012). The effect of alkalization on the bioactive and flavor related components in commercial cocoa powder. *Journal of Food Composition and Analysis*, 25(1), 17-23.
- Mackenna, B., M.y Lyng, J., G. (2013). Principles of food viscosity analysis. *Technology and Nutrition*, 5, 129-162.

- Mancilla, M., N.A., López, M.G., y Mendoza, D., G. (2003). Molecular structures of fructans from Agave Tequilana Weber var. azul. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 7835-7840.
- Manual de instrucciones analizador de humedad. (2011). MB 45.
- Martínez-Padilla, L., P. (2015). Guía rápida de uso del reometro RheoLab QC. Anton Paar. Lapryfal. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM.
- Mengual, O., Meunier, G., Cayré, I., Puech, K., Snabre, P. (1999). *Turbiscan MA 2000: multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis*. *Talanta*, 50(2), 455-456.
- Meyer, D., Bayari, S., Torrega, A., y Costel, E. (2011). Inulin as a texture modifier in dairy products. *Food Hydrocolloids*, 25, 1881-1890.
- NMX-F-084-2003. Industria azucarera. Especificaciones. Azúcar (sacarosa). Calidad estándar. Norma mexicana.
- NOM-155-SCFI-2012, Leche-Denominaciones, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba. Norma Oficial Mexicana.
- NOM-186-SSA1/SCFI-2013, Cocoa, chocolate y productos similares, y derivados del cocoa. Especificaciones sanitarias. Denominación comercial. Métodos de prueba. Norma Oficial Mexicana.
- NOM-222-SCFI/SAGARPA-2018, Leche en polvo o leche deshidratada-Materia prima-Especificaciones, información comercial y métodos de prueba. Norma Oficial Mexicana.
- Pangender, V., Cuvelier, G., Launay, B., Parker, A., Dkriuf, C., G. (2000 b). Effects of carrageenan type on the behavior of carrageenan/milk mixtures. *Food Hydrocolloids*, 14, 273-280.
- Ponce, S. J., Macías, B. E., Soltero, M. A., Fernández, E. V., Zúñiga P. V., Escalona B. H. (2008). Physical-Chemical and non-linear rheological properties of aqueous solutions of agave fructans. *e-Gnosis*, 6, 1-23.

- Prakash, S., Huppertz, T., Karvchuck, O. y Deeth, H. (2010). Ultra-high-temperature processing of chocolate flavoured milk. *Journal of Food Engineering*, 96(2), 179-184.
- Ritsema, T., y Smeekens, S. (2003). Fructans: Beneficial for plant and humans. *Current Opinion in Plant Biology*. 6, 223-230.
- Roberfroid, M.,B., Gibson, G., R., Hoyles, L., McCartney, A., L., Rastall, R., Rowland, I. (2010). Prebiotics effects: metabolic and health benefits. *Journal Nutrition*, 104 (2), 1–63.
- Saltini, R., Akkerman, R., Frosch, S. (2013). Optimizing chocolate production through traceability: A review of the influence of farming practices on cocoa bean quality. *Food Control*, 29(1),167-187.
- Sánchez, R. (2017). Formulando bebidas estables. Industria alimenticia. Disponible en <https://www.industriaalimenticia.com/articles/89051-formulando-bebidas-estables>. Consultado 08 Marzo 2019.
- Sharma, K., Mulvaney, S., Rizvi, S. (2003). *Ingeniería de Alimentos: Operaciones Unitarias y Prácticas de Laboratorio*. Limusa Wiley. México.
- Sosa-Herrera, M. G. y Delgado-Reyes, V. A. (2016). Propiedades Funcionales y Aplicaciones Tecnológicas de Fructanos. In E. Ramírez (Ed.), *Alimentos Funcionales de hoy* (pp. 97–111). España: OmniaScience.
- Sosa-Herrera, M. G., Martínez-Padilla, L. P., Delgado-Reyes, V. A., Torres-Robledo, A. (2016). Effect of agave fructans on bulk and surface properties of sodium caseinate in aqueous media. *Food Hydrocolloids*, 60, 199-205.
- Spagnuolo, P., A., Dalglish, D., G., Goff, H., Morris, E., R. (2005). Kappa-carrageenan interactions in systems containing casein micelles and polysaccharide stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 19, 371–377.

- Steffe, J., F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*, Freeman Press, Michigan, EE. UU.
- Therkelsen, G.H. (1993). Carrageenan. In *Industrial Gums*. Academic Press, Denmark (pp. 145-180)
- Urías, S., J., E., Cani, P., D., Delmée, E., Nevrinck, A., López, M., G., Delzenne, N.,M. (2008). Physiological effects of dietary fructans extracted from *Agave tequilana Gto. and Dasylirion spp.* *Journal Nutrition*, 99(2), 254-61.
- Villegas, B. y Costell, E. (2007). Flow behavior of inulin-milk beverages. Influence of inulin average chain length and of milk fat content. *International Dairy Journal*, 17, 776-781.
- Yañes, M., Durán, L., Costell, E. (2002a). Rheological and optical properties of commercial chocolate milk beverages. *Journal of Food Engineering*, 51, 229-234.
- Yañes, M., Durán, L., Costell, E. (2002b). Effect of hydrocolloid type and concentration on flow behavior and sensory properties of milk beverages model systems. *Food Hydrocolloids*, 16, 605-611.
- Zhong, Q. y Daubert, C., R. (2013). Food Rheology. In *Dairy Food Machinery Engineering*. Academic Press (pp. 403-426).