



Estudio de la interacción de hidrocoloides empleados en alimentos y su efecto en las propiedades reológicas y de textura sensorial e instrumental

Karen Gisseth Ospina Casas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Agronomía, Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos
Bogotá, Colombia
2016



Estudio de la interacción de hidrocoloides empleados en alimentos y su efecto en las propiedades reológicas y de textura sensorial e instrumental

Karen Gisseth Ospina Casas

Director

Ph. D. Carlos Eduardo Narváez Cuenca

Asesor

M. Sc. Daniel Laguado

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de
Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Línea de Investigación:

Calidad de Alimentos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Agronomía, Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos
Bogotá, Colombia
2016

*A mi familia que siempre ha apoyado
cada uno de mis sueños.*

*.....I owned every second that this world could give
I saw so many places
The things that I did
Yeah, with every broken bone
I swear I lived....
One Republic.*

Agradecimientos

Al Profesor Carlos Narváez, por su paciencia con mi falta de tiempo en este camino descabellado de trabajar en la industria y tratar de obtener un master en la academia. A Daniel Laguado, quien en el momento más crítico me dio una luz y me ayudó a no renunciar. Gracias por compartir mi pasión por aprender constantemente.

A la Universidad Nacional de Colombia, que durante los últimos 10 años ha sido un hogar para mí. El lugar que siempre me ha brindado la oportunidad de conocer personas increíbles y vivir miles de experiencias enriquecedoras.

A Quala S.A, que durante los últimos 5 años me ha apoyado y formado como profesional. Por su apoyo en los últimos 2 años, facilitando el uso de sus instalaciones y equipos para el desarrollo de este trabajo. En esta empresa he encontrado una familia llena de profesionales alegres, unidos e increíblemente inteligentes. Especialmente a Helen, quien tomó el reto de convertirme en una profesional integral y lo más importante, en una mejor persona.

A mis compañeros de camino. A todo mi equipo Quala! Comboquala, Laura Camila, Paula, Maria Paula, Milena, Jeff, Tatiana, Paula Daniella, Laura D, Daniel y Cesar, gracias por compartir risas, tiempos de crisis y cócteles. A Laura, Rocío y Juan Pablo, compañeros de maestría, quienes durante este tiempo han sido una gran inspiración y apoyo. A César y Adriana por siempre estar pendientes de mí y confiar en que puedo lograr lo que sea. A Lorena, Wilson, Paola y Hernán por hacer parte de mi vida desde siempre.

Finalmente a mi mayor soporte, a toda mi familia, pero en especial a Mamá y Papá, quienes con su ejemplo me motivan todos los días. Solo trabajo para hacerlos sentir orgullosos con cada paso que doy. A Mamali, quien siempre me cuidó, apoyó y alentó a trabajar por todo lo que deseé. A Valentina, quien con su llegada a mi vida me inspiró a ser el mejor ejemplo a seguir. A Mauricio, quien con su infinito amor y paciencia me ha enseñado que lo que tiene que pasar, pasará.

RESUMEN

Las fuentes calóricas como carbohidratos (e.g. almidón y azúcar) y grasas (e.g. triglicéridos) son importantes en el diseño de productos ya que aportan textura y sabor a los alimentos. Al retirarlos para hacer disminución de calorías estas propiedades cambian. Para solucionar las perturbaciones en la textura de alimentos bajos en calorías se pueden emplear hidrocoloides. El objetivo general de este trabajo fue explorar formulaciones de hidrocoloides que simularan la textura de productos del mercado (salsa de tomate, mayonesa, mermelada, sopa instantánea y yogur) empleando un diseño de experimentos de mezclas. Las mezclas de hidrocoloides evaluadas (2%) fueron preparadas en un Thermomix® en una solución NaCl 0,5% a 90 °C durante 4 min. La caracterización de los productos y las mezclas se realizó con: **1) Medidas reológicas:** barridos de frecuencia (analizado mediante el “weak gel model”) y flujo (analizado mediante la ley potencial), **2) Medidas de textura instrumental:** fuerza de esparcibilidad (relacionada con la sensación en boca) y **3) Medidas sensoriales:** viscosidad, cremosidad y gomosidad. Los modelos para representar el comportamiento de las seis variables evaluadas fueron validados estadísticamente y se obtuvieron superficies de respuesta para cada una de ellas. Los resultados mostraron que el contenido de goma xantana es altamente influyente en la mayoría de las variables de respuesta estudiadas. El análisis multivariado mostró que se podían simular las texturas de la sopa instantánea y el yogur. Por último la optimización generó dos mezclas importantes: **1)** 11,11% pectina + 26,91% xantana + 61,97% almidón para simular la textura de la sopa instantánea y **2)** 31,31% pectina + 28,74% xantana + 39,94% almidón para simular la textura del yogur.

Palabras clave: textura, hidrocoloides, reología, esparcibilidad, sensorial.

ABSTRACT

Caloric sources in foods like carbohydrates (e.g. starch and sugar) and fats (e.g. triglycerides) are important in product design as they provide texture and flavor to foods. When they are removed to lower calories these properties change. Hydrocolloids can be used to overcome the disturbances in the texture of low calorie foods. The main objective of this investigation was to generate hydrocolloid formulations to simulate the texture of marketed products (tomato sauce, mayonnaise, jam, instant soup and yogurt) by using a mixture design of experiments. The evaluated hydrocolloids mixtures (2%) were made in a Thermomix® in a NaCl 0.5% solution at 90 °C for 4 min. Products and mixtures were characterized by: **1) Rheological measures:** frequency sweeps (using the weak gel model) and flow (using the power law model), **2) Instrumental texture measures:** spreadability force (related to mouthfeel) and **3) Sensory measures:** viscosity, creaminess and gumminess. The obtained models to represent the behavior of the six variables evaluated were statistically validated and surface responses were obtained for each of them. Results showed that xanthan gum content is highly influential to most of the studied response variables. Multivariate analysis revealed that the textures of instant soup and yogurt can be simulated. Finally, optimization yielded two important mixtures: **1)** 11.11% pectin + 26.91% xanthan + 61.97% starch simulating soup texture and **2)** 31.31% pectin + 28.74% xanthan + 39.94% starch simulating yogurt texture.

Keywords: texture, hydrocolloids, rheology, spreadability, sensory.

CONTENIDO

Resumen	III
Abstract	IV
Contenido	V
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas.....	IX
Planteamiento del problema.....	11
Objetivo general	12
Objetivos específicos.....	12
1. Marco teórico.....	13
1.1. Generalidades de los hidrocoloides	13
1.2. Goma xantana	14
1.2.1. Obtención	14
1.2.2. Descripción.....	15
1.2.3. Características de la solución	15
1.2.4. Usos	15
1.3. Pectina	16
1.3.1. Obtención	16
1.3.2. Descripción.....	17
1.3.3. Características de la solución	18
1.3.4. Usos.....	18
1.4. Almidón de yuca	18
1.4.1. Obtención	18
1.4.2. Descripción.....	18
1.4.3. Características de la solución	19
1.4.4. Usos	19
1.5. Aplicaciones de algunos hidrocoloides en alimentos	20
1.6. Textura	21
1.6.1. Análisis reológico.....	21
1.6.1.1. Barridos de deformación y frecuencia	21
1.6.1.1.1. Barrido de deformación	21
1.6.1.1.2. Barridos de frecuencia	22
1.6.1.2. Curvas de flujo	24
1.6.2. Textura instrumental - esparcibilidad	25
1.6.3. Evaluación sensorial.....	25
1.7. Mezclas de hidrocoloides en alimentos.....	26
1.8. Diseño experimental de mezclas en diseño de formulaciones	31
1.9. Análisis multivariado	33
2. Materiales y métodos	35
2.2. Materiales.....	35
2.2.1. Productos del mercado	35

2.2.2. Hidrocoloides	36
2.3. Preparación de muestras	36
2.4. Caracterización fisicoquímica de hidrocoloides.....	37
2.4.1. Medida de viscosidad	37
2.4.2. Medición de pH.....	37
2.4.3. Medición del porcentaje de humedad relativa	37
2.5. Diseño experimental	37
2.6. Análisis reológico.....	39
2.7. Caracterización textura instrumental - esparcibilidad	39
2.8. Caracterización sensorial de la textura	40
2.9. Análisis estadístico	41
3. Análisis y discusión de resultados	42
3.1. Productos del mercado	42
3.1.1. Análisis reológico.....	43
3.1.1.1. Barridos de deformación	43
3.1.1.2. Barridos de frecuencia	44
3.1.1.3. Curvas de flujo	46
3.1.2. Textura instrumental - esparcibilidad	48
3.1.3. Textura sensorial	48
3.2. Mezclas de hidrocoloides.....	49
3.2.1. Caracterización fisicoquímica	50
3.2.2. Análisis reológico.....	51
3.2.2.1. Barridos de deformación	51
3.2.2.2. Barridos de frecuencia	52
3.2.2.3. Curvas de flujo	55
3.2.3. Textura instrumental - esparcibilidad	57
3.2.4. Textura sensorial	58
3.2.5. Ajustes al modelo para las variables medidas	60
3.3. Análisis multivariado.....	62
3.4. Optimización de respuesta	65
3.5. Verificación de la optimización	68
4. Conclusiones y recomendaciones.....	69
4.1. Recomendaciones.....	69
5. Bibliografía	76
Anexo A. Formato evaluación sensorial.....	69
Anexo B. Ajustes a modelos lineal y cúbico.	71
Anexo C. Validación de los modelos obtenidos para las variables medidas.....	72

Lista de Figuras

Figura 1. Unidad repetitiva de goma xantana	16
Figura 2. Estructura del homogalacturonano, componente principal de la pectina.	17
Figura 3. Estructura química general del almidón.....	19
Figura 4. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla para los diferentes tipos de fluidos	25
Figura 5. Productos del mercado evaluados como referencia.....	35
Figura 6. Diseño de mezclas centroide simplex.....	38
Figura 7. Comportamiento de la $Tan \Delta$ en función del porcentaje de deformación oscilatoria para los productos de mercado seleccionados	43
Figura 8. Módulo complejo (G^*) en función de la frecuencia (ω) para los productos del mercado estudiados.	45
Figura 9. Variaciones de la viscosidad (η) en función de la velocidad de cizalla (γ) para los productos del mercado seleccionados.....	47
Figura 10. Superficies de respuesta obtenidas para las variables (a) A_F (b) z (c) K (d) n (e) Fuerza de esparcibilidad (f) Viscosidad sensorial (g) Cremosidad sensorial (h) Gomosidad sensorial.	49
Figura 11. Comportamiento de la $Tan \Delta$ en función del porcentaje de deformación oscilatoria para las mezclas de hidrocoloides	52
Figura 12. Módulo complejo (G^*) en función de la frecuencia (ω) para las mezclas de hidrocoloides..	53
Figura 13. Variaciones de la viscosidad (η) en función de la velocidad de cizalla (γ) para las mezclas de hidrocoloides realizadas.....	56
Figura 14. (a) Agrupación de las variables evaluadas por nivel de similitud. (b) Doble proyección de las variables en el espacio de los primeros dos componentes.....	63
Figura 16. Proyección de los objetos de estudio en los dos primeros componentes. Subgrupos obtenidos en el análisis PCA.	65
Figura C-1. Prueba de normalidad y homogeneidad de residuales.....	75

Lista de Tablas

Tabla 1. Velocidades de cizalla para diferentes procesos industriales.	24
Tabla 2. Marcas y lotes de los productos evaluados.	35
Tabla 3. Materias primas a emplear y parámetros fisicoquímicos de importancia.	36
Tabla 4. Diseño experimental para las formulaciones de mezclas de hidrocoloides.	38
Tabla 5. Clasificación de fluidos según el valor de $\text{Tan } \Delta$	44
Tabla 6. Parámetros del modelo weak gel obtenidos para los productos del mercado.	46
Tabla 7. Parámetros de ley potencial obtenidos para los productos del mercado evaluados.	47
Tabla 8. Resultados de fuerza de esparcibilidad.	48
Tabla 9. Análisis sensorial de la textura de los productos del mercado en estudio.	48
Tabla 10. Caracterización fisicoquímica de hidrocoloides.	51
Tabla 11. Valores de las constantes A_F y z obtenidos para las mezclas evaluadas.	54
Tabla 12. Parámetros de la ley potencial obtenidos para las mezclas evaluadas.	57
Tabla 13. Fuerzas de esparcibilidad correspondientes a las mezclas de hidrocoloides.	58
Tabla 14. Influencia de la combinación de hidrocoloides en las características de textura sensorial de las mezclas evaluadas.	59
Tabla 15. Ecuaciones y significancias obtenidas para el modelo final.	60
Tabla 16. Contribución de cada variable a cada componente principal.	64
Tabla 17. Resultados de optimización de respuesta para la sopa y el yogur.	66
Tabla 18. Resultados de optimización de respuesta para la sopa y el yogur con mayor importancia en constantes A_F y z	66
Tabla 19. Resultados de la validación de las mezclas optimizadas para la sopa y el yogur.	68
Tabla B-1 Ecuaciones y significancias obtenidas para el modelo lineal.	73
Tabla B-2 Ecuaciones y significancias obtenidas para el modelo cúbico.	73
Tabla C-1 Valores p para los análisis de varianza a los modelos de las variables reológicas analizadas.	74

Planteamiento del problema

Existen diferentes hidrocoloides en la industria de alimentos y es limitado el conocimiento que se tiene de la sinergia que existe entre ellos como modificadores de textura. Revistas científicas de alto impacto como *Food Hydrocolloids* presentan artículos relacionados con las propiedades tecnofuncionales de los hidrocoloides. Al buscar en la base de datos *Scopus* las palabras clave *hydrocolloid* y *texture*, en la revista mencionada, un número de 44 publicaciones surgen a la vista. Si la búsqueda se hace para las palabras *hydrocolloid* y *rheology* se encuentra un número de 71. Las palabras clave *hydrocolloid* y *sensory* arrojan 32. Investigaciones que involucren el empleo de almidón no modificado son aún más limitadas. Los alimentos sin procesar tienen textura dada por oligosacáridos y/o polisacáridos que son ingredientes naturales de las frutas, verduras y cereales, bien sean almidones, fibra soluble e insoluble, o sacarosa. En los alimentos procesados los hidrocoloides son empleados para darles textura. Los almidones nativos y los modificados son ampliamente usados en este tipo de alimentos y son un aporte calórico al producto donde se usan. Adicionalmente existen hidrocoloides que no aportan calorías como las gomas (xantana, guar, tragacanto, entre otras) y los derivados de la celulosa. En los productos procesados industrializados cuando se disminuye el contenido de grasa o azúcar se tienen problemas de textura como: texturas muy líquidas en productos donde el consumidor espera una textura más espesa, o por el contrario formulaciones con texturas muy espesas en donde el consumidor espera una textura menos viscosa. Debido a la importancia de la textura en los alimentos se requiere entender la interacción de los hidrocoloides y así proyectar su aplicación en la formulación de productos bajos en calorías en diferentes categorías de la industria alimentaria. Por esta razón en esta investigación se propuso una estrategia de evaluación de interacciones de tres hidrocoloides empleados en la industria (pectina, goma xantana y almidón de yuca) con la finalidad de solucionar posibles problemas de textura. De igual manera, esta estrategia podría aplicarse en el diseño de nuevas texturas en productos nuevos cuando se requiera. Para alcanzar este propósito se plantearon los objetivos descritos a continuación.

Objetivo general

Evaluar la posible aplicabilidad de un diseño de mezclas de tres hidrocoloides empleados en la industria de alimentos como simulador de propiedades reológicas y de textura instrumental y sensorial de algunos productos del mercado como estrategia de reducción calórica.

Objetivos específicos

1. Evaluar las propiedades reológicas y de textura instrumental y sensorial de diferentes mezclas de hidrocoloides.
2. Analizar productos del mercado y comparar sus propiedades reológicas y de textura instrumental y sensorial con las obtenidas para las combinaciones de hidrocoloides.
3. Obtener mezclas de hidrocoloides que simulen texturas de productos del mercado y sean punto de partida para reformulaciones de disminución calórica.

1. Marco teórico

1.1. Generalidades de los hidrocoloides

Los hidrocoloides son un grupo diverso de polímeros de cadena larga, son polisacáridos complejos de alto peso molecular, que son rápidamente dispersables, total o parcialmente solubles. Estos polisacáridos son propensos a absorber agua (Li & Nie, 2014). Es debido a esta característica especial y a la capacidad de producir partículas coloidales hidratadas, que se les adjudica el nombre “hidrocoloides” (Dergal, 2006).

Los hidrocoloides pueden ser de origen natural como exudados de plantas, extractos de algas marinas, semillas, cereales, de origen animal, de origen microbiano, naturales modificadas (semisintéticas) y sintéticas (Garibay, Ramírez, & Canales, 1993). Los de origen natural y los naturales modificados son empleados principalmente en alimentos y los de origen sintético son de amplia aplicación en productos de cuidado personal (Broze, 2011). Estas materias primas son también conocidas como modificadores reológicos o gomas. Estos son utilizados a nivel industrial para otorgar propiedades de flujo específicas, viscosidad por ejemplo, a los productos.

Los hidrocoloides juegan un rol importante al momento de lograr las características deseables de flujo del producto final. Para esto se debe tener un control efectivo de las propiedades reológicas de los hidrocoloides, así como el conocimiento del efecto en la formulación de los productos. Este conocimiento unido a la habilidad de caracterizar la información de las propiedades de flujo es la combinación efectiva para lograr texturas objetivo (Braun & Rosen, 1999).

Algunos hidrocoloides pueden modificar las propiedades de flujo pero contribuir muy poco a la consistencia de una mezcla (Braun & Rosen, 1999). Estos pueden clasificarse de diferentes maneras, una puede ser según su funcionalidad en: espesantes, estabilizantes y emulsionantes. Los espesantes, por ejemplo, modifican la reología a diferentes niveles cuando se integran en una mezcla y cambian la percepción de textura convirtiéndola en más espesa, como por ejemplo la carboximetilcelulosa. Pero existen otros hidrocoloides, como la goma gellan (estabilizante) que cambian las propiedades de flujo de una mezcla pero no su consistencia (Koleske, 1995). Otro uso de los hidrocoloides es el de emulsionantes; en donde reducen la tensión superficial entre agua-aceite o aire-agua (Friberg, Larsson, & Sjoblom, 2003). La goma guar, por ejemplo, está clasificada por el CODEX en la categoría de emulsionante.

Otra manera de clasificarlos es acorde a Hui et al. (2008) donde los hidrocoloides se clasifican según las siguientes funcionalidades:

1. Suspender material particulado en productos alimenticios así como regular la cristalización.
2. Optimizar las propiedades reológicas de los alimentos sólidos así como de los líquidos. Los parámetros reológicos más importantes incluyen flujo y propiedades de sensación en boca (*mouthfeel*).
3. Estabilizar emulsiones aceite en agua.
4. Facilitar la mezcla de productos secos y semi-secos (como vehículos de estos productos).
5. Optimizar gelificación para dar geles suaves o fuertes.
6. Formar espuma (emulsionar aire en agua) y fijar sabores.

Para este trabajo se decidió emplear tres hidrocoloides: goma xantana, pectina y almidón de yuca. A continuación se presenta la obtención, una descripción general, algunas características de la solución y usos de cada uno de ellos.

1.2. Goma xantana

1.2.1. Obtención

Esta goma es un polisacárido obtenido por producción de la bacteria *Xanthomonas campestris*. Este microorganismo es una bacteria fitopatógena, que infecta a muchas especies de crucíferas, causando la muerte de estas plantas. Cuando la bacteria infecta una planta produce un polisacárido de alto peso molecular conocido como goma xantana. Algunas especies son más eficientes que otras en la producción de este polisacárido. Otra especie empleada es la *Xanthomonas campestris pv. campestris CA110* la cual coincide con la cepa NRRL B- 1459 que se ha usado ampliamente para la producción industrial de goma de xantana. El proceso de producción de goma comprende las etapas de: obtener inóculo, pre-inocular, pasteurizar, eliminar las células, precipitar, separar y finalmente secar la goma. El crecimiento de los microorganismos y la producción de la goma xantana se ven influenciados por factores tales como el tipo de reactor, el modo de funcionamiento (por lotes o continua), la composición del medio y las condiciones de cultivo (temperatura, pH y concentración de oxígeno disuelto) (Luvielmo & Scamparini, 2009).

1.2.2. Descripción

La goma xantana es un sólido de flujo libre y color blanco-crema soluble tanto en agua fría como caliente (Batt & Robinson, 2014). Es compatible y estable en presencia de diferentes compuestos, como se muestra a continuación (Goldberg & Williams, 1991):

1. Es compatible con la mayoría de los ácidos orgánicos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que si se combinan ácidos y temperaturas altas la hidrólisis de la goma se puede acelerar y por esta razón se pueden generar viscosidades menores.
2. Es compatible y estable con muchas sales. La solubilidad de la goma se puede ver limitada por la solubilidad de la sal que esté incluida en la solución goma-sal. Es incompatible con metales polivalentes.
3. Es compatible con compuestos químicos de pH alcalino incluyendo el hidróxido de amonio, sin afectar su solubilidad o composición.

La goma xantana es un mucilago (Mataix Verdú & Gassul, 2005), un polisacárido que está constituido por unidades monoméricas de glucosa, manosa y ácido glucurónico (**Figura 1**), en relaciones molares 2,8:2:2 (Garibay et al., 1993).

La estructura tridimensional de la cadena principal es idéntica a la de la celulosa, en donde las ramificaciones de trisacáridos están alineadas con la columna polimérica. Las cadenas pueden disponerse como hélices simples, dobles o triples (García-Ochoa, Santos, Casas, & Gómez, 2000). Su peso molecular es mayor a 10^6 Da (Belitz, Grosch, & Schieberle, 2009).

1.2.3. Características de la solución

Las soluciones de goma xantana se caracterizan por ser altamente pseudoplásticas, es decir que la viscosidad aparente disminuye radicalmente con el aumento de la velocidad de cizalla (Toledo, 2012). Su pseudoplasticidad es atribuida a la formación de agregados complejos involucrando puentes de hidrógeno y enredos poliméricos.

1.2.4. Usos

Esta materia prima es interesante por sus propiedades para ser usada como espesante, estabilizante y emulsificante o como medio de suspensión debido a su alto valor de rendimiento¹ (Batt & Robinson, 2014).

¹El valor de rendimiento está definido como la mínima cantidad de fuerza requerida para producir un flujo (Commission of European Communities, 2002).

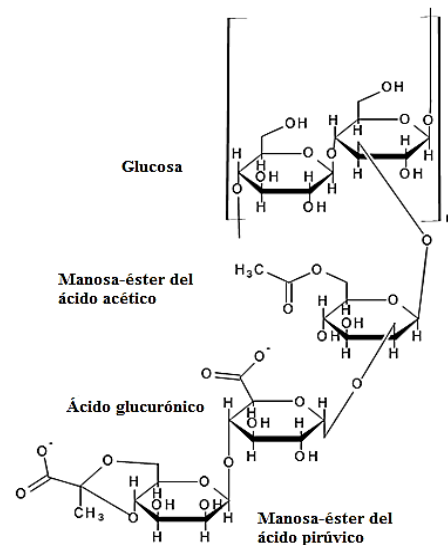


Figura 1. Unidad repetitiva de goma xantana, n puede variar entre 1000 - 10000. Adaptado de Garibay et al (1993).

1.3. Pectina

1.3.1. Obtención

Es posible producir comercialmente pectinas a partir de cáscara de manzana y cítricos. Sin embargo, las pectinas de estos dos materiales pueden tener características diferentes. La pectina de manzana puede producir geles más viscosos y las cítricas tienen colores más claros. Para extraer la pectina la cáscara de las naranjas o mandarinas son tratadas con agua acidulada (pH < 2) caliente, el tiempo del tratamiento depende de las características de la materia prima. El extracto es separado, clarificado y concentrado al vacío. Este extracto es enfriado y mezclado con sales de amonio para elevar el pH a 4 y se remueve la mayor cantidad de líquido al precipitado amarillo resultante. Luego de esto la masa es suspendida en alcohol y tratada con ácido en varias etapas y es parcialmente neutralizada antes de ser secada. Para generar pectinas consistentes, se mezcla con sacarosa o glucosa para vehiculizar la pectina y tener homogeneidad en su adición en productos a nivel industrial (May, 1990).

1.3.2. Descripción

Las pectinas constituyen aproximadamente el 35% (*p/p*) en base seca de la pared celular primaria de los alimentos. Las pectinas están compuestas de polisacáridos, donde el mayor componente es el ácido galacturónico (~70% *p/p*). Cuatro polisacáridos han sido descritos como parte constitutiva de las pectinas: homogalacturonano (principal componente de las pectinas, **Figura 2**), xilogalacturonano y ramnogalacturonanos I y II (De Godoy et al., 2013). Las pectinas hacen parte de la fibra dietaria soluble no hemicelulósica y se encuentran en el tejido parenquimatoso de frutas y verduras (Mataix Verdú & Gassul, 2005). La fibra dietaria soluble es conocida por sus efectos positivos en el sistema digestivo. Algunos de estos son el manejo de la glucemia, ya que esta retrasa la absorción de glúcidos y reduce la concentración en sangre de estos componentes, disminuyendo el índice glucémico (Hernandez Gil, 2010). Consumir fibra dietaria ofrece ventajas a las funciones gastrointestinales, como el incremento de la masa fecal, la hace más suave y disminuye el tiempo del tracto intestinal, todo esto facilita la motilidad y previene el estreñimiento. También se ha demostrado que reduce la incidencia del cáncer de colon (Zhang, Xu, & Zhang, 2015). En particular el consumo de pectinas está relacionado con el control de triglicéridos y glucosa en sangre (Barreto R, Ortiz Q, & Restrepo S, 2012). Recientemente en nuestro grupo de investigación encontramos a través de ensayos en soluciones modelo que las pectinas inhiben la actividad de enzimas relacionadas con digestión de proteínas, lípidos y carbohidratos (Espinal-Ruiz, Parada-Alfonso, Restrepo-Sánchez, & Narváez-Cuenca, 2014). También encontramos en ensayos de digestión simulada que las pectinas inhiben la digestión de lípidos (Espinal-Ruiz, Parada-Alfonso, Restrepo-Sánchez, Luz Patricia. Narváez-Cuenca, & McClements, 2014; Espinal-Ruiz, Restrepo-Sánchez, Narváez-Cuenca, & McClements, 2016).

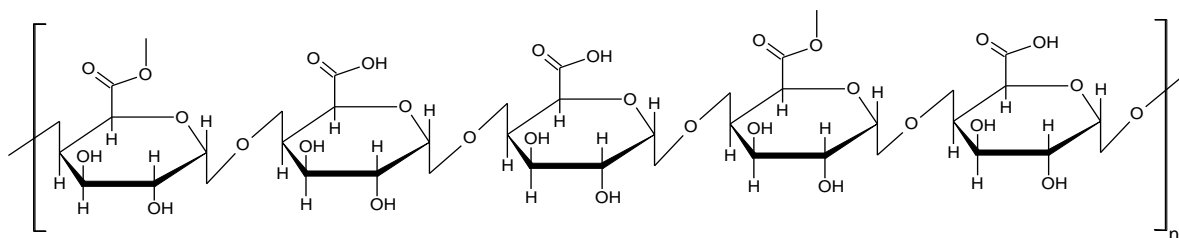


Figura 2. Estructura del homogalacturonano, componente principal de la pectina. Si el número de esterificaciones con metanol en el grupo carboxilo supera el 50% (*mol/mol*) la pectina es considerada de alto metoxilo, de lo contrario es denominada de bajo metoxilo (BeMiller, J.N and Whistler 1960; Gutiérrez, 2000). Además del homogalacturonano mostrado acá, en las pectinas están presentes el xilogalacturonano y ramnogalacturonanos I y II. Tomado de Salazar & Gamboa(2013).

Las pectinas se dividen en dos grandes grupos, según el porcentaje de grupos carboxilo que estén esterificados con metanol, lo cual es conocido como grado de esterificación (GE): las de alto metoxilo o alta esterificación tienen un GE mayor a 50% (*mol/mol*) y las de bajo metoxilo o baja esterificación un GE inferior a 50% (*mol/mol*) (Gutiérrez 2000; BeMiller and Whistler 1960).

1.3.3. Características de la solución

Cuando las pectinas se disuelven forman soluciones coloidales cuya viscosidad depende del peso molecular medio y del grado de esterificación. Las soluciones de pectina tienen un comportamiento pseudoplástico (Bello-Lara et al., 2014). Su estabilidad resulta ser función del pH y de la temperatura (Gutiérrez, 2000).

1.3.4. Usos

El uso más común de las pectinas es en mermeladas con alto contenido de azúcar, en yogures como complemento para mejorar la viscosidad, en bebidas de bajo contenido calórico como mejorador de textura, en procesos de congelamiento para controlar el crecimiento de hielo y en la industria farmacéutica para encapsular fármacos (May, 1990).

Los geles de pectinas de alto metoxilo se han empleado durante años para propósitos prácticos en concentraciones menores al 1% (*p/v*) en soluciones de contenido de sólidos que varían entre 58 a 75% (*p/v*), por ejemplo en la elaboración de mermeladas con altos contenidos de sacarosa. En contraparte, las pectinas de bajo metoxilo dependen de la disponibilidad de iones calcio para generar geles y se emplean en mermeladas y confituras dietéticas.

1.4. Almidón de yuca

1.4.1. Obtención

El almidón de yuca se obtiene de las raíces de la planta de yuca que se encuentra en las regiones ecuatoriales (BeMiller & Whistler, 2009).

1.4.2. Descripción

El almidón de yuca es un polisacárido que aporta calorías, constituido en promedio por 17% (*p/p*) de amilosa y 83% (*p/p*) de amilopectina (**Figura 3**) (Aehlert and Pigman 2012; Edwards 2000). Si bien actualmente los almidones de papa y de maíz son ampliamente empleados

en la industria de alimentos (MINTEL, 2016), el almidón de yuca tiene un uso bajo en las formulaciones de alimentos. Sin embargo, en Latinoamérica las exportaciones de almidón de yuca desde Colombia han aumentado en 45% en peso y 53% en valor entre los periodos enero 2013/2014 y enero 2014/2015 (Legiscomex, 2015) con destino a la industria alimentaria. Esta tendencia muestra el interés creciente por esta materia prima en este sector productivo.

1.4.3. Características de la solución

Las soluciones de almidón de yuca poseen un comportamiento pseudoplástico representado por la ley potencial (Chen & Ramaswamy, 1999), en donde la viscosidad aparente disminuye con la velocidad de cizalla (Toledo, 2012).

1.4.4. Usos

El almidón de yuca es empleado en la industria alimentaria por su falta de sabor y su buena capacidad de retener agua (BeMiller & Whistler, 2009). Es empleado en productos del mercado como aderezos, bebidas de café y productos lácteos (MINTEL, 2016).

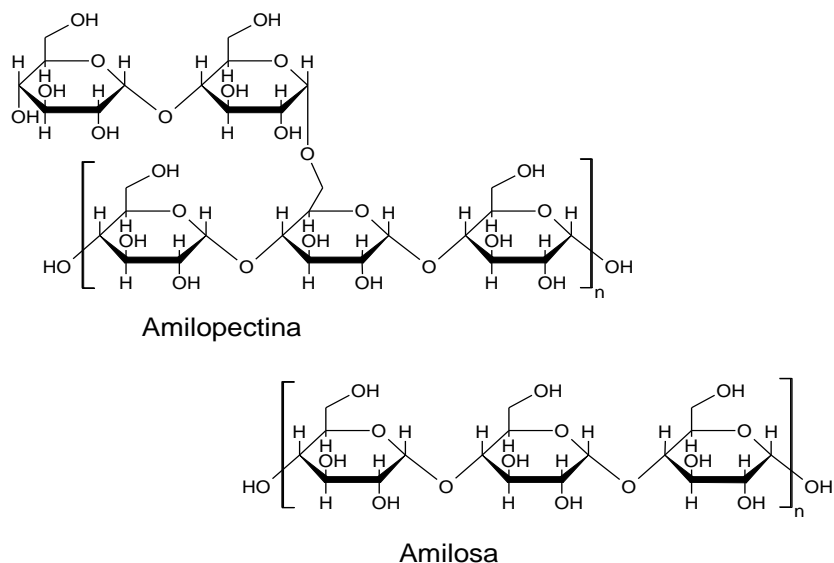


Figura 3. Estructura química general del almidón. Las proporciones amilosa y amilopectina varían dependiendo del origen botánico del almidón. Tomado de Gutiérrez (2000).

1.5. Aplicaciones de algunos hidrocoloides en alimentos

Los hidrocoloides poseen un rango amplio de aplicaciones en muchas industrias, incluyendo la alimentaria, farmacéutica, cosmética, de cuidado personal, adhesivos, textiles, cerámicas, papel, detergentes, pinturas, tintas y coagulantes, entre otros.

Debido a que los hidrocoloides son polímeros complejos de cadena larga que son solubles en agua, pueden dar diferentes propiedades al alimento donde sean empleados. Estas propiedades son factores importantes en la formulación, ya que pueden generar diferentes texturas, así como estabilizar o emulsificar otros ingredientes de la formulación (Hui et al., 2008).

La propiedad típica de los hidrocoloides es una combinación de las propiedades viscosas y elásticas, llamada viscoelasticidad. Esta propiedad permite entender los dos componentes básicos. El componente viscoso mide cuánto del material presenta un comportamiento newtoniano, es decir qué tanto de su comportamiento reológico es similar al agua o a la glicerina (fluidos newtonianos por excelencia). De otro lado, el componente elástico de un material hace referencia al componente sólido del mismo (Gomis, 2012).

Los componentes viscoso y elástico de los hidrocoloides permiten entender que por ejemplo cuando se desean obtener productos con cierto porcentaje de comportamiento de sólidos (alta viscosidad) se buscan comportamientos con un componente elástico mayor. Por el contrario, cuando se desean productos con mayor comportamiento de líquido se debe buscar aumentar el componente viscoso.

Mediante el uso de hidrocoloides en alimentos se pueden obtener resultados como: mejoramiento de sensación en boca (Meyer, Bayarri, Tárrega, & Costell, 2011), aumento de la capacidad de retención de humedad (Bülichen, Kainz, & Plank, 2012), inhibición de sinéresis(estabilización de separación de fases), resistencia al ataque bacteriano (Shao, Shao, Han, Lv, & Sun, 2015), prevención del encogimiento(cambios dimensionales) y control de formación de hielo (Kjellin & Johansson, 2010).

Al emplear hidrocoloides en los productos se realizan ajustes a ciertas características indeseables de los productos con menos contenido calórico (menor viscosidad, separación de fases, menor cremosidad, entre otras), sin embargo la adición de estos materiales pueden generar cambios en otras características (Por ejemplo: aumento de gomosidad o sabores ajenos al perfil). El ajuste de las características generales de los alimentos bien sea de textura, sabor o color es llamado en la industria alimentaria como reformulación. En este

proceso se busca mejorar o mantener el mismo desempeño del producto original que se está modificando.

1.6. Textura

Para cuantificar la influencia de los hidrocoloides en la textura se hacen mediciones reológicas, instrumentales y sensoriales así: **1) Análisis Reológico:** Analiza las características de flujo a nivel microestructural mediante barridos de deformación, frecuencia y curvas de flujo. **2) Instrumental - Esparcibilidad:** Evalúa la fuerza relacionada con la sensación de llenado en boca generada por un producto. **3) Sensorial:** caracteriza la viscosidad, gomosidad y cremosidad sensorial, relacionadas con la percepción del consumidor de los productos (ICONTEC, 1998; Kryscio et al., 2008; Norton, Spyropoulos, & Cox, 2010). A continuación se describe cada una de estas mediciones con mayor detalle.

1.6.1. Análisis reológico

1.6.1.1. Barridos de deformación y frecuencia

Los barridos de deformación permiten entender los cambios estructurales influenciados por un porcentaje de deformación aplicado, a una frecuencia y temperatura constantes. Por otra parte los barridos de frecuencia proporcionan información sobre los cambios de estructura de los fluidos en el tiempo, a una temperatura y porcentaje de deformación constantes (Norton et al., 2010). Los barridos de frecuencia se relacionan con la estabilidad en el tiempo de los fluidos, denominada vida útil en el caso de los alimentos. A continuación se detallan los aspectos de cada uno de los barridos.

1.6.1.1.1. Barrido de deformación

Un barrido de deformación permite obtener información sobre la magnitud del comportamiento elástico y/o viscoso de un fluido a una frecuencia y temperaturas constantes. Para esto se emplea la relación de los módulos G' y G'' . El módulo G' o módulo de almacenamiento se define como la medida de la energía de deformación almacenada por la muestra durante un proceso de cizalla. Este módulo representa el comportamiento elástico del material analizado. El módulo G'' o módulo de pérdida se define como la medida de la energía de deformación utilizada por la muestra durante el proceso de corte. Este módulo representa el comportamiento viscoso de un material de prueba (Mezger 2006). Cuando $G' > G''$ la estructura del material es definida como un sólido viscoelástico y su comportamiento

es principalmente elástico. Cuando $G'' > G'$ la estructura es definida como un fluido viscoelástico y su comportamiento es principalmente viscoso. Entre más grande es la diferencia entre los módulos el fluido muestra propiedades de un sólido o un fluido puro respectivamente (Huang, Li, & Sumner, 2011; Welti-Chanes & Aguilera, 2002). Cuando G' y G'' y la diferencia entre ellos aumenta, los fluidos son de mayor carácter viscoelástico. Es decir presentan un aumento en la capacidad de almacenar energía a bajas deformaciones y liberarla al finalizar la deformación y regresar a su configuración original sin variaciones.

Del análisis de barrido de deformación se obtiene la constante de factor de pérdida ($\tan \Delta$) de la relación entre G' y G'' presentada en la **Ecuación 1**. Este valor es un índice de cómo reacciona el fluido a la deformación aplicada durante el experimento, y describe así el grado de viscoelasticidad del mismo (Norton et al., 2010).

$$\tan \Delta = \frac{G''}{G'} \quad \text{Ec. 1.}$$

Un valor de $\tan \Delta = 0$ corresponde a una deformación idealmente elástica (el sistema responde instantáneamente y el stress es proporcional a la cizalla); cuando el valor de $\tan \Delta = \infty$ el sistema es idealmente viscoso. En otras palabras, entre más alto el valor de $\tan \Delta$ más alta es la contribución viscosa del sistema y más baja la elástica. Al intervalo de deformación aplicada en donde la magnitud de $\tan \Delta$ se mantiene constante se le denomina rango de linealidad viscoelástica o LVE por sus siglas en inglés *linear viscoelasticity*.

En el LVE el fluido responde de la misma manera tanto viscosa como elásticamente al porcentaje de deformación aplicado. La determinación del rango de linealidad viscoelástica es necesaria para determinar el porcentaje de deformación, perteneciente a este rango, en el que se deben realizar los ensayos de barrido de frecuencia. Con este porcentaje seleccionado se garantiza que el barrido de frecuencia se realice exclusivamente en el rango LVE. Al garantizar estar en el rango LVE los cambios de estructura del material solamente dependerán de los tiempos experimentales aplicados durante los barridos de frecuencia.

1.6.1.1.2. Barridos de frecuencia

Los barridos de frecuencia son el experimento oscilatorio más común para evaluar el comportamiento viscoelástico de un material a un porcentaje de deformación y temperaturas constantes (Norton et al., 2010). En este ensayo la frecuencia se aumenta mientras la deformación de entrada es constante, lo cual garantiza estar en el rango LVE y solo observar

el comportamiento de la estabilidad en función de la frecuencia aplicada. Con este análisis se pueden realizar comparaciones de “huellas digitales” de diferentes productos alimenticios o comparar efectos de diferentes ingredientes y procesos productivos sobre la viscoelasticidad (Steffe, 1996) y relacionarlas con la vida útil. El barrido de frecuencia permite a través de modelación entender las interacciones entre los componentes de un producto u objeto de análisis.

Un método de interpretación de los resultados del barrido de frecuencia que permite analizar el comportamiento de la estabilidad microestructural de la mezclas es el modelo de Weak Gel (Gabriele, De Cindio, & D'Antona, 2001). El comportamiento reológico de los alimentos, como materiales de estructuras débiles, es descrito por el modelo Weak Gel en una ventana pequeña de frecuencia, entre 0,1 a 10 Hz (Baldino, Gabriele, & Migliori, 2010). En este modelo se hace un análisis del comportamiento del fluido haciendo uso del módulo complejo (G^*). Este módulo es obtenido empleando la **Ecuación 2** o también puede ser obtenido directamente del software del reómetro.

$$G^*(\omega) = \sqrt{G'(\omega)^2 + G''(\omega)^2} \quad \text{Ec. 2.}$$

En donde $G^*(\omega)$ es el módulo complejo, $G'(\omega)$ es el módulo de almacenamiento y $G''(\omega)$ es el módulo de pérdida, todos en función de la frecuencia de análisis. Al graficar el módulo complejo G^* en función de la frecuencia de análisis y extraer la ecuación de la regresión potencial de este comportamiento se pueden obtener las constantes A_F y z según la **Ecuación 3**.

$$G^*(\omega) = A_F \omega^{1/z} \quad \text{Ec. 3.}$$

A_F está definida como la fuerza de las interacciones entre las unidades (bien sean moléculas de un hidrocoloide o todas las moléculas involucradas) que generan el gel. z está definida como el número de unidades (Por ejemplo, moléculas de hidrocóloides) que están interactuando entre ellas simultáneamente (Gabriele, De Cindio, & D'Antona, 2001). La **Ecuación 3** representa entonces un factor de interacción y estabilidad, entre mayor es la magnitud de las constantes más estable es el fluido.

1.6.1.2. Curvas de flujo

El análisis del cambio de la viscosidad con la cizalla de estudio es conocido como curva de flujo (Kreith, 1999). La mayoría de fluidos de interés industrial presentan desviaciones de la ley de Newton debido a que su viscosidad cambia en función de la velocidad de cizalla aplicada. En la **Tabla 1** se observan rangos de cizalla dependiendo el proceso industrial.

Tabla 1. Velocidades de cizalla para diferentes procesos industriales.

Proceso	Margen de velocidades de cizalla (s ⁻¹)
Sedimentación	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁴
Moldeo por compresión	1 - 10
Molido	10 - 10 ²
Calandrado	10 - 10 ²
Flujo a través de tubos	1 - 10 ³
Extrusión	10 ² - 10 ³
Inyección	Mayor a 10 ³

Debido a los diferentes procesos a los cuales son sometidos los alimentos y sus amplios rangos de cizalla, es que este tipo de análisis tiene un alto impacto en el entendimiento del uso de los fluidos en la industria, esto debido al amplio rango de velocidades de cizalla en los cuales se evalúa y su aplicación a los procesos productivos.

La mayoría de los fluidos pueden ser total o parcialmente descritos por el modelo de Ostwald-de Waele. Este modelo es representado con la **Ecuación 4**.

$$\eta = KY^{n-1} \quad \text{Ec. 4.}$$

En esta ecuación n es el índice de flujo, K el índice de consistencia, η es la viscosidad aparente y Y es la velocidad de cizalla.

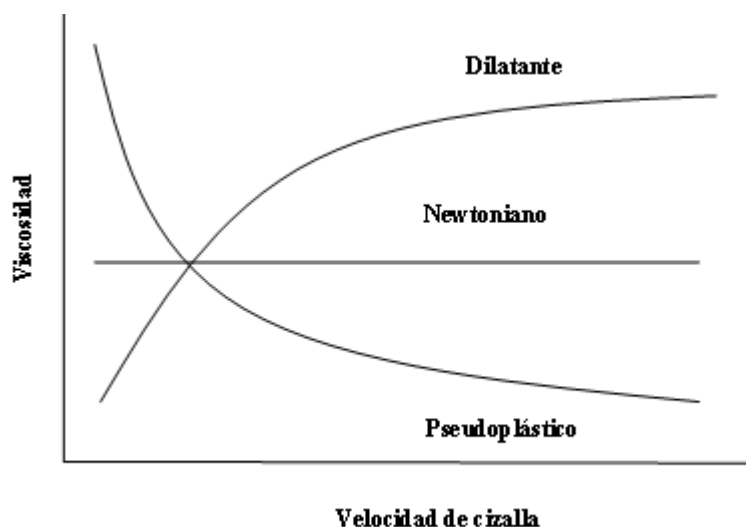


Figura 4. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla para los diferentes tipos de fluidos tomado de Guest et al. (2013).

Valores de n inferiores a 1 indican que el fluido analizado es pseudoplástico. Valores de n superiores a 1 representan fluidos dilatantes. Finalmente, valores de n iguales a 1 indican un comportamiento viscoso ideal, es decir newtonianos (**Figura 4**) (Streblow & Müller, 2012).

1.6.2. Textura instrumental - esparcibilidad

La esparcibilidad es un término de textura que puede ser definido como la tensión requerida para crear una distribución uniforme sobre una superficie (Hall, 1998). La esparcibilidad está relacionada con la tensión de fluencia requerida para iniciar a fluir, específicamente la esparcibilidad es el inverso de la tensión de fluencia. Esta medida objetiva se relaciona con la sensación de esparcir los productos, como las mantequillas sobre el pan, así como con la fuerza necesaria para esparcir un producto entre el paladar y la lengua, las cuales son medidas subjetivas (Kryscio et al., 2008; Rao, 2010). Es por esta razón que la esparcibilidad para los alimentos fluidos o semifluidos es una variable importante en la caracterización textural de alimentos.

1.6.3. Evaluación sensorial

El comportamiento de los fluidos se puede evaluar con métodos reológicos, y la textura con métodos instrumentales como la esparcibilidad o a través de mediciones sensoriales. La evaluación sensorial se puede definir como aquella disciplina que permite medir, analizar e

interpretar las reacciones del ser humano ante aquellas propiedades de los alimentos a través de los sentidos de la vista, olfato, gusto y tacto. Las técnicas de evaluación difieren entre sí en función del propósito de las mismas (Garibay et al., 1993). La evaluación sensorial es una herramienta imprescindible para evaluar la calidad sensorial de los alimentos. Dependiendo del objetivo del análisis sensorial se puede evaluar aceptabilidad general del producto, textura (características particulares), color u olor (Ben Jeddou et al., 2017; Sharma, 2015).

Usualmente se realizan tanto medidas instrumentales como sensoriales para poder así relacionar las dos mediciones más comunes de textura y poder comparar así mediciones subjetivas y objetivas o bien complementar una con la otra para tener análisis más robustos. Algunos paneles se realizan con grandes grupos de voluntarios sin entrenamiento (Soukoulis, Lyroni, & Tzia, 2010) o un pequeño número de panelistas con cierta cantidad de horas de entrenamiento (Sharma, 2015), donde casi siempre se tiene el objetivo de comparar muestras contra una referencia de producto.

1.7. Mezclas de hidrocoloides en alimentos

Tradicionalmente las formulaciones de alimentos contienen almidones en su composición, así como también incluyen gomas, especialmente gomas guar y xantana. Los hidrocoloides se adicionan con el fin de mejorar la estabilidad, modificar la textura, facilitar el procesamiento, reducir costos, controlar humedad y aportar propiedades reológicas (aumentar viscosidad, emulsionar ingredientes, suspender partículas, entre otras) y de gelatinización. Existe información amplia sobre los sistemas almidón/otros hidrocoloides (Bemiller, 2011). Sin embargo, debido a que cada hidrocoloide afecta las propiedades de los almidones de manera diferente, aún existen vacíos en el entendimiento de sus interacciones (Chaisawang & Suphantharika, 2006). Lo estudiado por otros autores sobre mezclas de otros hidrocoloides/almidón presenta como efecto final el aumento en la viscosidad de las soluciones de las mezclas en comparación con la viscosidad de las soluciones de solo almidón (Bemiller, 2011; Ravindran & Matia-Merino, 2009; Shi & Bemiller, 2002). Sin embargo, actualmente los esfuerzos están enfocados en desarrollar soluciones integrales a los fabricantes de productos, que permitan con una sola materia prima (el cual puede ser una mezcla estandarizada de varios ingredientes) dar la textura deseada para aplicaciones industriales (Russ, Zielbauer, Ghebremedhin, & Vilgis, 2016).

Algunos de los hidrocoloides empleados en la industria como estabilizantes o espesantes son los derivados de la celulosa (los grupos hidroxilo de la celulosa pueden ser modificados químicamente con diferentes grupos funcionales, lo que permite modificar su funcionalidad) y las carrageninas, razón por la cual estos hidrocoloides han sido objeto de varios estudios en cuanto a interacciones de hidrocoloides se refiere (Roberts & Quemener, 1999). Se realizó un estudio de mezclas de hidroxipropilmetilcelulosa y carboximetilcelulosa de sodio para observar cómo las interacciones entre los hidrocoloides dependían de la estructura de cada hidrocoloide (Alvarez-Lorenzo et al., 2001). En este estudio la mayor sinergia reológica que encontraron los autores fue cuando los dos componentes con el mismo peso molecular se encontraban en el mismo porcentaje peso a peso. Los autores concluyeron que este efecto se dio por las interacciones hidrofóbicas y por puentes de hidrógeno entre los dos polímeros. Adicional a esto observaron que el nivel de sinergia variaba dependiendo del peso molecular y del porcentaje de sustitución de grupos funcionales de la celulosa.

Mezclas entre carragenina y carboximetilcelulosa fueron estudiadas y sus propiedades reológicas fueron comparadas con las propiedades de los materiales por separado (Gómez-Díaz, Navaza, & Quintáns-Riveiro, 2008). En este estudio los autores determinaron que entre los dos polímeros existe una interacción que genera mezclas de comportamiento no newtoniano y pseudoplástico. De la misma manera, confirmaron que existe interacción al realizar las mezclas de los polímeros en presencia de diferentes concentraciones de cloruro de sodio. Esto redujo los efectos sinérgicos, debido a las repulsiones electrostáticas. Adicionalmente, los autores concluyeron que las repulsiones seguidas de una posible compactación produjeron una reducción hidrodinámica del tamaño de las moléculas, produciendo a su vez una disminución de la viscosidad. Por otra parte, dedujeron que la temperatura de análisis también presentaba una gran influencia ya que la viscosidad aparente disminuía al aumentar la temperatura, así como se reducía el carácter no newtoniano de las mezclas.

Tanto la carragenina como la carboximetilcelulosa han sido aplicadas en reformulaciones de productos alimenticios. Por ejemplo, Abedi, Sani & Karazhiyan (2012) las emplearon junto con pectina para observar su influencia en la estabilización y apreciación sensorial de jugo de frambuesa en leche. En esta evaluación demostraron que tanto las mezclas dobles (carboximetilcelulosa - pectina y carboximetilcelulosa - carragenina) como triples de carboximetilcelulosa, pectina y carragenina aumentaban la viscosidad del jugo frente al uso separado de cada hidrocoloide. La mezcla triple fue la que menor sedimentación de

proteínas caseínicas presentó debido a la presencia de grupos negativos en los polímeros que generaba una reagrupación de las micelas. En este tipo de mezclas el sabor no fue afectado. Los autores concluyeron, además, que el producto era más estable y de buena aceptabilidad en cuanto a perfil sensorial.

El almidón de yuca es un material único, con propiedades distintivas, lo cual lo hace fácil de emplear en alimentos y aplicaciones industriales. A diferencia de otros almidones posee niveles inferiores de material residual como proteínas, fósforo, cenizas o lípidos (Russ et al., 2016). En cuanto a estudios de mezclas con almidón de yuca existen pocas publicaciones, una de ellas (Chaisawang & Supphantharika, 2005) muestra los efectos de las gomas xantana y guar en las propiedades de formulaciones que contienen almidón catiónico de yuca. El almidón catiónico de yuca es el almidón modificado con aminas terciarias o derivados de aminas cuaternarias para conferir cargas positivas (Roberts, 1996). El trabajo de Chaisawang and Supphantharika (2005) indica que la mezcla de almidón catiónico-xantana exhibió un comportamiento más cercano al de un sólido, menos similar al agua, que la mezcla almidón catiónico-guar. Los autores explican que este comportamiento es debido a que la goma xantana promueve la asociación de gránulos del almidón previniendo la penetración del agua, siendo más efectiva en el incremento de la viscosidad final de la mezcla.

El almidón de yuca aplicado en productos de bajo pH ($\text{pH} < 4$) es inestable y tiende a degradarse a temperaturas de refrigeración. Este comportamiento se traduce en productos de baja calidad debido a que tienen variaciones de textura muy rápidas. Un estudio de rellenos de frutas evaluó el efecto de iones calcio y pectina de bajo metoxilo en la estabilidad reológica del almidón de yuca a bajos valores de pH (Agudelo, Varela, Sanz, & Fiszman, 2014). En este estudio se concluyó que al aumentar la concentración de pectina de bajo metoxilo desde 0,3% (*p/p*) hasta 0,6% (*p/p*), en el producto final, la magnitud de los módulos G' y G'' y la diferencia entre ellos aumentaba. Este aumento significa un mayor comportamiento viscoelástico, es decir un aumento en la capacidad de almacenar energía a bajas deformaciones y liberarla al finalizar la deformación y regresar a su configuración original sin variaciones. Los autores citados también indican que el aumento de la concentración de pectina e iones calcio en los geles hizo que los módulos G' y G'' no dependieran del aumento de la frecuencia del barrido. Esto significa que la estructura del gel es más estable en el tiempo que las soluciones de solo almidón. En el análisis de textura instrumental los autores realizaron medición de fuerza de extrusión.

Esta variable de respuesta fue mayor a medida que la cantidad de pectina y de calcio presentes en la mezcla con el almidón aumentaba. Los resultados de los autores indican que la fuerza del gel es proporcional a la cantidad de pectina e iones calcio de la mezcla.

Mezclas entre pectina de alto metoxilo y goma garrofino fueron evaluadas por Silva, Goncalves and Rao (1992). En este estudio se pudo determinar que no existen interacciones entre estos dos hidrocoloides a ninguna velocidad de cizalla, poder iónico de la solución o pH ya que las mezclas evaluadas no presentaron ningún cambio de propiedades viscoelásticas. Los autores indican que en sistemas complejos de alimentos donde se empleen pectina y goma garrofino no se tendrían interacciones antagónicas o sinérgicas en cuanto a propiedades reológicas. Por lo tanto se puede hacer uso de los beneficios de cada hidrocoloide: fluidez proveniente de la pectina y estabilización dada por la goma garrofino.

Mezclas de pectinas con diferentes grados de esterificación y alginatos con diferentes composiciones de ácidos manurónico (M) y gulurónico (G) fueron evaluadas en cuanto a su interacción y su efecto en la microestructura con microscopia de transmisión electrónica (TEM) y su comportamiento reológico (Walkenström, Kidman, Hermansson, Rasmussen, & Hoegh, 2003). La combinación de alginato, con menor relación M/G, con la pectina de alto metoxilo presentó la mayor sinergia representada en el aumento del módulo G' y la formación de geles más rápida. Los geles formados por la mezcla alginato con la mayor relación M/G y pectina de bajo metoxilo obtuvieron el módulo G' más bajo y la cinética más lenta para la formación de los geles. La interpretación de los resultados tanto reológicos como de TEM permitió a los autores concluir que la naturaleza de la pectina y la composición del alginato empleados influye en las características de los filamentos y la homogeneidad y densidad de la red generada.

Se realizó una investigación en donde se evaluaron geles producidos por mezclas de pectinas de alto y bajo metoxilo (Löfgren & Hermansson, 2007). Los autores reportan sinergia entre estas. Esta sinergia se pudo evidenciar debido a que el G' aumenta comparado con los módulos de los geles producidos con solo pectina de alto metoxilo. Las mezclas entre pectinas de alto metoxilo y las de bajo metoxilo hacen posibles reemplazos de textura en jaleas con disminución de azúcar, reemplazo que con la pectina de alto metoxilo sola no se puede obtener.

Se ha estudiado el efecto de proteínas tanto de suero de leche como de arveja en las propiedades reológicas y sensoriales de una bebida proteica con composición constante de carragenina y/o goma xantana (Tarrega, Ramírez-Sucre, Vélez-Ruiz, & Costell, 2012). En

este trabajo los autores concluyeron que la proteína de arveja confería a la bebida mayor viscosidad, pseudoplasticidad y elasticidad (propiedades relacionadas con la acción espesante de las gomas y su interacción con la proteína) en los diferentes sistemas carragenina/xantana, frente a los que contenían sólo proteína de suero de leche, en la misma base de producto. A nivel sensorial los autores evidenciaron que al aumentar la cantidad de proteína de arveja la percepción de textura espesa en las muestras aumentaba proporcionalmente. Al comparar los resultados de las dos fuentes de proteína, suero y arveja. Los efectos sinérgicos en textura que obtuvieron los autores se dieron no sólo entre los hidrocoloides adicionados sino también entre la fuente de proteína del sistema base. Obtuvieron como resultado cooperativismo también entre los hidrocoloides y la fuente de proteína de la bebida (suero de leche o proteína de arveja). Al obtener tantas interacciones entre los diferentes ingredientes de un producto se puede inferir que la formulación de alimentos es compleja debido al alto número de variables que están presentes en estos.

Para entender las propiedades de mezclas de la goma xantana con otros polisacáridos se han realizado estudios de mezclas binarias y terciarias de xantana con diferentes polisacáridos. Casas, Mohedano, and García-Ochoa (2000) evaluaron mezclas de goma xantana acetilada y sin modificar junto con goma guar. Del estudio de estas mezclas se obtuvieron sinergias en cuanto al aumento de viscosidad de las mezclas en solución acuosa, incluso a bajas concentraciones de goma xantana. Los autores atribuyeron este comportamiento a las interacciones moleculares entre las dos gomas. El valor más alto de viscosidad se obtuvo usando una relación 3/3 (*p/p*) de las gomas xantana sin modificar/guar, con una concentración total de 2 g/L.

Las mezclas de hidrocoloides pueden no solamente aumentar la viscosidad o la estabilidad en el tiempo de las mezclas sino cambiar otras propiedades de los productos. Por ejemplo, Rodríguez-Hernández and Tecante (1999) realizaron mezclas de goma gellan con goma xantana y carragenina iota². En el análisis de estas mezclas se encontró que las mezclas aumentaban la rigidez en los geles y disminuían la separación de las fases (sinéresis) frente a las preparaciones de gellan.

²Las carrageninas pueden clasificarse en kappa (una sustitución), iota (dos sustituciones) y lambda (tres sustituciones) dependiendo de la cantidad de grupos esterificaciones con grupos sulfatos en los núcleos de D-galactopiranosilo (Fennema, 1996).

En otro trabajo, se evaluaron mezclas con metilcelulosa y tres galactomanosas diferentes (gomas guar, tara y garrofino) (Rinaudo & Moroni, 2009). De acuerdo a los autores, la interacción de la goma xantana con las galactomanosas es sinérgica en cuanto al aumento de la parte elástica del fluido, representado en el aumento del módulo G' , principalmente con la goma garrofino. Los autores indican que la interacción de la goma xantana con la metilcelulosa tiene un efecto antagónico debido a que esta última forma redes propias de gelificación, disminuyendo el módulo G' de la mezcla. La reducción en el módulo G' se traduce en una reducción de la percepción sólida de la mezcla: entre menor es el módulo G' más líquida se siente la mezcla. Por esta razón, estos estudios permitieron predecir que las mezclas xantana/metilcelulosa no son una buena opción si el objetivo son productos con una textura más espesa, lo cual se traduciría en un alto módulo G' . Los autores también estudiaron mezclas terciarias de xantana, galactomanosas y metilcelulosa. De este tipo de mezclas se concluyó que sus características eran levemente alteradas con respecto a una solución de goma xantana sola, en diferentes rangos de temperatura y valores de pH ácidos (inferiores a 1,45). Estos resultados hacen las mezclas con goma xantana interesantes para aplicaciones en alimentos donde los geles hidrofílicos necesiten resistencia a procesos industriales con cambios de pH y temperatura (Rinaudo & Moroni, 2009).

De lo descrito en esta sección se puede concluir que algunas mezclas de hidrocoloides presentan interacciones cooperativas en cuanto a la estabilidad de las estructuras. En otros casos no existe ninguna interacción o si existe, es negativa y quita estabilidad a las estructuras de las mezclas. De manera general, para evaluar la estabilidad de los fluidos e identificar el tipo de fluido se realizan medidas reológicas bien sean de barridos de frecuencia y curvas de flujo. En algunos casos se realizan mediciones sensoriales para complementar el entendimiento de las mezclas de hidrocoloides.

1.8. Diseño experimental de mezclas en diseño de formulaciones

Los diseños experimentales más empleados en las investigaciones académicas son los factoriales. Estos diseños son un conjunto de tratamientos experimentales que consideran todas las posibles combinaciones de las variables (Minitab(R), 2016b). Los diseños factoriales tienen como objetivo estudiar el efecto de diferentes factores, componentes o variables de procesos sobre una o varias respuestas cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores.

Dependiendo cual es el objeto de estudio otros diseños de experimentos pueden ser más convenientes que el diseño factorial. Debido a que muchos de los productos comerciales son fabricados como mezclas (unión de varios ingredientes que suman el 100% del producto) los diseños de mezclas son más adecuados para su análisis. Los experimentos de mezclas son una clase especial de experimentos de superficie de respuesta en los que el producto objeto de investigación se compone de varios componentes o ingredientes. La respuesta (calidad o perfil del producto) en este tipo de diseño experimental depende de las proporciones relativas de los componentes, en cambio en un diseño factorial, la respuesta varía dependiendo de la cantidad de cada factor (Eriksson, 2008). Adicionalmente, la ventaja principal del diseño de mezclas frente al diseño factorial es el número de experimentos a realizar y la información que estos aportan. La ventaja radica en que el modelo matemático del diseño de mezclas permite hacer optimización dentro del sistema evaluado al cubrir toda una superficie de concentraciones. En comparación con el diseño de mezclas, en el diseño factorial se deberían hacer muchos experimentos en los cuales se iría iterando entre concentraciones hasta encontrar la óptima.

En las industrias de alimentos, de medicamentos, de detergentes, de pinturas, entre otras, se tienen distintos ingredientes o componentes que hacen parte de una mezcla. Las proporciones con las que participan los ingredientes en la mezcla definen las características de calidad de los productos.

El diseño de mezclas es el indicado para analizar este tipo de productos donde su composición es una mezcla (alimentos, medicamentos, entre otros). Lo anterior debido a que este tipo de diseño experimental evalúa la influencia que tienen los diferentes componentes de un objeto de estudio sobre la variable de respuesta. Adicional una vez es realizado el análisis del diseño de mezclas se puede encontrar una composición que proporcione las características deseadas a través de un proceso de optimización de respuesta (Eriksson, 2008).

El diseño de mezclas permite obtener una superficie de respuesta más acertada en cuanto a sus predicciones cuando se emplean los diseños centroides. La ventaja de los diseños centroides es que estos cubren puntos intermedios de las mezclas. Estos puntos están distribuidos de manera regular alrededor del centro de la región de superficie de respuesta y mejoran la cobertura del espacio del diseño (Minitab(R), 2016a). Para el análisis de este tipo de diseños de experimentos existen seis modelos estándares (lineal, cuadrático, cúbico especial, cúbico completo, cuadrático especial o cuadrático completo). Se debe

seleccionar el modelo que al ajustar los resultados obtenidos a este tenga el mayor R^2 . Posteriormente se verifica la selección del modelo mediante el ajuste de los datos al mismo y la revisión de la significancia entre el modelo y los datos experimentales. La verificación se puede realizar mediante cuatro métodos de ajuste al modelo: regresión de mezcla, regresión escalonada, selección hacia adelante y eliminación hacia atrás. El método de verificación más empleado es el método de regresión de mezcla. La optimización que se puede obtener con el diseño experimental es útil para determinar las proporciones de los componentes que permitan obtener la característica deseada (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

1.9. Análisis multivariado

Las técnicas de análisis multivariado son empleadas cuando se adquieren observaciones de manera individual de un número de variables de interés y se desea relacionar el conjunto de variables con los resultados de las observaciones. El análisis multivariado provee la habilidad de manejar grandes cantidades de datos producidos por técnicas modernas de análisis, pero este ha sido aplicado muy poco a datos de reología en alimentos (Ballabio, Consonni, & Costa, 2012).

Un tipo de análisis multivariado que brinda información valiosa de manera gráfica es el análisis por conglomerados de variables o dendograma. Este análisis es una visualización gráfica del proceso de aglomeración o división de las observaciones, el cual devuelve un árbol binario arraigado; las hojas de los árboles son las observaciones y la raíz del árbol es el conjunto de todas las observaciones. Los objetos similares se conectan mediante enlaces cuya posición en el diagrama está determinada por el nivel de similitud/disimilitud entre los objetos (Klemelä, 2009).

Uno de los tipos de análisis multivariado más empleado es el análisis por componentes principales (PCA). El PCA es una herramienta muy útil para el uso en la industria alimentaria (Azira, Man, Mohd, Aina, & Amin, 2014). El análisis PCA consiste en un grupo de variables relacionadas, que son transformadas a un grupo más pequeño de construcciones hipotéticas no relacionadas, llamadas componentes principales. Los componentes principales son combinaciones lineales de las variables originales. El primer componente representa la mayor varianza del total de los datos, el segundo componente la segunda mayor y así sucesivamente. Los componentes son usados para descubrir e interpretar la dependencia que existe entre las variables y examinar la relación que puede existir entre los objetos de estudio (Timm, 2007).

Los hidrocoloides y sus sinergias se han evaluado para diferentes aplicaciones en la industria alimentaria. Estas evaluaciones se han realizado mediante diferentes metodologías de análisis en donde se han obtenido resultados sobre mejoría de estabilidad en el tiempo, mejor desempeño, entre otros resultados para los productos. En este trabajo se empleó la metodología de diseño de mezclas y el análisis multivariado para simular texturas de productos. Se usaron mediciones objetivas y subjetivas que evidenciaron el comportamiento de las mezclas de almidón de yuca, pectina y goma xantana y su aplicación en simulación de texturas.

2. Materiales y Métodos

2.2. Materiales

2.2.1. Productos del mercado

Los productos salsa de tomate, mayonesa, mermelada de mora, sopa instantánea y yogur de melocotón fueron caracterizados procedentes de la presentación comercial (**Figura 5**). En la **Tabla 2** se documenta la marca y el lote de producción de cada producto. Los productos fueron comprados en el supermercado Éxito. Los productos del mercado fueron caracterizados empleando medidas reológicas, de textura instrumental y sensorial para posteriormente intentar simular sus propiedades con algunas de las mezclas almidón-pectina-goma xantana evaluadas en el diseño de experimentos de mezclas.



Figura 5. Productos del mercado evaluados como referencia.

Tabla 2. Marcas y lotes de los productos evaluados.

Producto	Marca	Fecha Vencimiento/Lote
Salsa de tomate	Fruco	Ven 04 Nov 16 L 16:22
Mayonesa	Fruco	Ven 27 Jul 16 L 15:24
Mermelada de mora	La constancia de mora	Ven 01 Dic 16 L15335
Yogur	Alpina original bolsa	Ven 26 Jun 16L/BPF7202
Sopa instantánea	La sopera de pollo	Ven Jun 16 L389

2.2.2. Hidrocoloides

La goma xantana fue obtenida de PLT Health Solutions (Morristown, New Jersey, USA), la pectina cítrica de bajo metoxilo de Danisco (Copenhague, Dinamarca) y el almidón de yuca sin modificación química de Almidones de Sucre (Morroa, Sucre, Colombia) (**Tabla 3**).

Tabla 3. Materias primas a emplear y parámetros fisicoquímicos de importancia (Datos obtenidos de la ficha técnica de cada proveedor).

Característica	Goma Xantana	Pectina	Almidón de yuca
Apariencia	Polvo color crema	Polvo color beige - dorado	Polvo color blanco
Viscosidad (cPs)	12000 - 16000 ^a	30 - 37 ^b	400 - 420 ^c
pH ^d	6,0 - 8,0	2,8 - 3,4	5,0 - 7,5
HR (% , <i>p/p</i>) ^e	Máx 15	Máx 12,0	Máx 13
Origen	Síntesis bacteriana	Extracción de cascarras cítricas	Extracción de yuca
Grado de esterificación (%GE)	-	Menor a 70.	-
Contenido de almidón (% , <i>p/p</i>)	-	-	87
Lípidos (% , <i>p/p</i>)	-	-	0,1
Cenizas (% , <i>p/p</i>)	-	-	0,1

^aViscosidad cuando el material es preparado al 1% (*p/p*) en solución acuosa de KCl al 1% (*p/p*). Aguja S64 a 12 rpm.

^bViscosidad medida cuando el material es preparado al 1% (*p/p*) con la aguja S61 a 50 rpm.

^cViscosidad medida cuando el material es preparado al 5% (*p/p*) con la aguja S61 a 50 rpm.

^dpH cuando el material es preparado al 1% (*p/p*) en agua.

^eHR: Humedad relativa.

2.3. Preparación de muestras

Las muestras fueron preparadas en un procesador de alimentos con control de temperatura y velocidad de mezcla (Thermomix TM31, Wuppertal, Alemania). Se pesaron 10 g de mezcla de los hidrocoloides sólidos de acuerdo a los porcentajes presentados en la **Tabla 4** y se dispersaron en 490 g de una solución acuosa de NaCl al 0,5% (*p/p*). La adición de sal se realizó para homogenizar el perfil sensorial de las mezclas, ya que los cambios de proporción de hidrocoloides cambiaban el sabor. Los 490 g de solución salina fueron puestos en el Thermomix. Se fijó la temperatura en 90 °C y la agitación fue ajustada a 600 rpm. Una vez la solución salina alcanzó 60 °C en el proceso de calentamiento se agregaron los 10 g de la mezcla sólida. Una vez la mezcla alcanzó los 90 °C se agitó durante 4 min. La mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente para los diferentes análisis posteriores (Orives et al., 2014).

2.4. Caracterización fisicoquímica de hidrocoloides

A los hidrocoloides se les hicieron los análisis fisicoquímicos: pH, humedad y viscosidad en solución acuosa, acorde a la metodología descrita por Yamazaki, Kurita, and Matsumura (2008) para verificar las características descritas en ficha técnica por los proveedores.

2.4.1. Medida de viscosidad

Se realizaron las preparaciones según lo descrito a pie de tabla en la **Tabla 3** y fueron medidas con un viscosímetro Brookfield (Toki Sangyo, Tokyo, Japan) a 25°C. La medición se realizó por triplicado.

2.4.2. Medición de pH

Se realizaron las preparaciones como se indicó en la **Tabla 3**. Estas preparaciones fueron atemperadas a 25°C y posteriormente medidas con un pHmetro OAKTON referencia pH 2100 series (Vernon Hills, Illinois, USA). La medición se realizó por triplicado.

2.4.3. Medición del porcentaje de humedad relativa

Cada uno de los hidrocoloides en polvo (5 g) fue colocado en un analizador de humedad HG63 Mettler Toledo (Langacher, Greifensee, Suiza). La medición se realizó a 130 °C durante 15 min, al terminar el tiempo se tomó el dato de pérdida de humedad en porcentaje. La medición se realizó por triplicado.

2.5. Diseño experimental

El diseño seleccionado fue un diseño centroide simplex usando 6 retículos (**Figura 6, Tabla 4**). Los retículos son las concentraciones que varían entre 0 a 100% (*p/p*). Se plantearon dos repeticiones por cada mezcla dentro del diseño (Orives et al., 2014). La concentración de hidrocoloides en la mezcla final fue definida en 2% (*p/p*).

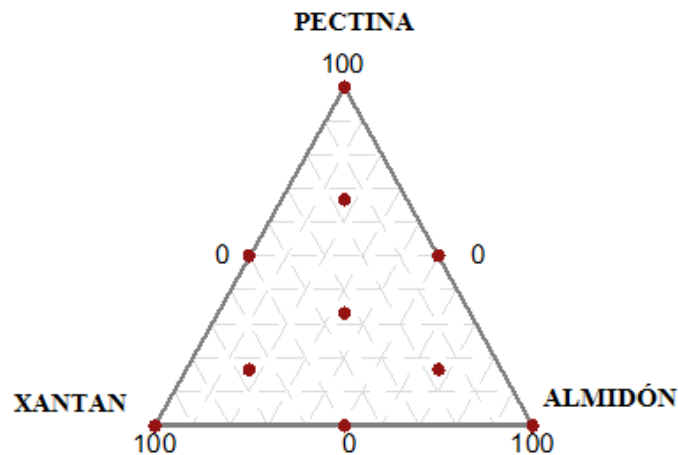


Figura 6. Diseño de mezclas centroide simplex.

Tabla 4. Diseño experimental para las formulaciones de mezclas de hidrocoloides. Valores en % (p/p) en mezcla sólida (2% p/p mezcla final en la dispersión).

Orden Estadístico*	Orden de corrida**	Pectina	Xantana	Almidón
1	1	100,0	0,0	0,0
3	2	0,0	0,0	100,0
12	3	0,0	100,0	0,0
7	4	33,3	33,3	33,3
13	5	0,0	0,0	100,0
6	6	0,0	50,0	50,0
2	7	0,0	100,0	0,0
10	8	16,7	16,7	66,7
18	9	66,7	16,7	16,7
17	10	33,3	33,3	33,3
16	11	0,0	50,0	50,0
20	12	16,7	16,7	66,7
14	13	50,0	50,0	0,0
19	14	16,7	66,7	16,7
11	15	100,0	0,0	0,0
4	16	50,0	50,0	0,0
9	17	16,7	66,7	16,7
8	18	66,7	16,7	16,7
15	19	50,0	0,0	50,0
5	20	50,0	0,0	50,0

*El orden estadístico hace referencia al orden en que el programa diseña la matriz de experimentos.

** El orden de corrida es el orden en que deben hacerse los análisis. Hace referencia al orden aleatorio de ensayos entregado por el programa para eliminar errores por momentos de evaluación.

La caracterización reológica, de textura instrumental y sensorial se efectuó por duplicado según lo dicta el diseño (Por ejemplo: corrida 2 y corrida 5 son duplicados entre ellas).

2.6. Análisis reológico

Las medidas reológicas se realizaron en un reómetro modelo DISCOVERY HR-1 (TA Instruments, Delaware, USA). Se empleó un sensor plato-plato de 40 mm de diámetro con superficie rugosa, con una distancia de 1 mm y rugosidad de 0,4 mm (PPR40), a 25 °C. Se emplearon entre 1,2-1,3 mL de muestra por evaluación. Se realizaron análisis de barridos de deformación, con porcentaje de deformación entre 0,01 a 100%. Con estos experimentos se midieron los módulos G' y G'' en función del porcentaje de deformación, para determinar así el rango LVE. Dentro de este rango se seleccionó el porcentaje de deformación al cual se hicieron los barridos de frecuencia. De este análisis se obtuvo la variación de $\tan \Delta$ en función del porcentaje de deformación aplicado.

Luego de determinar el porcentaje de deformación se hicieron barridos de frecuencia con un rango de frecuencia de 0,01 a 100 Hz. De este análisis se obtuvieron los módulos G' y G'' en función de la frecuencia. Los resultados fueron ajustados al modelo Weak Gel Model y de ese ajuste se obtuvieron los parámetros A_F y z .

Además, se efectuaron curvas de flujo con rango de cizalla entre 0,01 y 100 s^{-1} con tiempo de medición de 120 s. En estos ensayos la variable medida fue la viscosidad en función de la velocidad de cizalla. Los resultados fueron ajustados al modelo de la ley potencial y de ese ajuste se obtuvieron los parámetros K y n .

Tanto los barridos de deformación y frecuencia como la curva de flujo viscoso se realizaron con 4 puntos por década y 180 s de espera antes de cada medición (Balaghi, Mohammadifar, Zargaraan, Gavlighi, & Mohammadi, 2011; Moreira, Chenlo, & Torres, 2013; Rosalina & Bhattacharya, 2002).

2.7. Caracterización textura instrumental - esparcibilidad

Las medidas de textura se realizaron usando un texturometro TA.XT Plus Stable MicroSystems Ltd (Vienna Court, Godalming, Reino Unido), con una probeta TTC Spreadability Rig (HDP/SR), empleando un método de doble compresión hasta 18 mm de compresión. En esta prueba la variable medida fue la fuerza necesaria para esparcir la mezcla sobre una probeta cónica, lo cual representa la facilidad de esparcirse sobre la lengua (Krystyjan, Ciesielski, Khachatryan, Sikora, & Tomasik, 2015). Los resultados se expresaron como gramos (g) de fuerza necesaria para esparcir el fluido sobre la probeta.

2.8. Caracterización sensorial de la textura

La caracterización sensorial fue realizada en un salón de análisis sensorial con cinco cabinas individuales cuyas dimensiones corresponden a las descritas en la NTC 3884 (ICONTEC, 1998). Se realizaron cinco sesiones de cinco muestras cada una. Se sirvieron 25 g de cada objeto de estudio a temperatura ambiente (aproximadamente a 23 °C). La evaluación se realizó con cambio de color de la luz de la cabina sensorial (Luz azul). En cada sesión se proporcionaron galletas de soda y agua para neutralizar los residuales entre muestras.

Cada grupo de cinco muestras fue evaluado por 12 panelistas los cuales recibieron previamente como mínimo 80 h de entrenamiento en textura. Dicho entrenamiento consistió en 3 etapas: **1) Descripción-Recordación:** en esta etapa para cada descriptor se les entregó a los panelistas los diferentes puntos de las escalas y se les solicitó describirlas, para de esta manera generar memoria sensorial y hacer fácil su posterior identificación. **2) Ordenamiento:** en esta etapa para cada descriptor se realizaron sesiones en donde se presentaban los diferentes puntos de la escala y se les solicitaba ordenar de manera ascendente las muestras, se realizó hasta baja desviación en calificaciones del panel entrenado (alineación). **3) Calificación de texturas:** La última etapa se dividió en dos subetapas. Inicialmente se les entregaron muestras que hacían parte de la escala de entrenamiento y se les solicitó calificarlas y de esta manera corroborar las 2 etapas anteriores. En segunda instancia se les entregaron muestras del mercado para su calificación y se analizó la reproducibilidad de la calificación. Estas subetapas se realizaron hasta alineación del panel.

En cada sesión de evaluación se les solicitó a los panelistas calificar viscosidad, gomosidad y cremosidad en una escala de 0 a 5. La escala de viscosidad varió entre 0 (nada viscoso - agua) a 5 (muy viscoso - leche condensada pura). La escala de cremosidad varió entre 0 (nada cremoso - agua) a 5 (muy cremoso - crema de leche). La escala de gomosidad varió entre 0 (nada gomoso - agua) a 5 (muy gomoso - suspensión de harina al 57% p/p). Todo bajo las metodologías de la NTC 4489 (ICONTEC, 1998). El formato de evaluación empleado se muestra en el **Anexo A**.

2.9. Análisis estadístico

Los resultados de la evaluación reológica, textura instrumental y sensorial para los productos del mercado fueron analizados mediante un análisis de varianza, posteriormente para verificar si existían diferencias entre los productos se empleó la prueba de Tukey. Los resultados experimentales obtenidos para las mezclas de hidrocoloides en todas las variables (reológicas, textura instrumental y sensorial) fueron analizados con el análisis de diseño de mezclas. De este análisis se obtuvo una ecuación que representaba cada variable evaluada. Se realizó una verificación de los modelos obtenidos mediante la verificación de tres hipótesis: la distribución normal de los residuales, la independencia entre las observaciones y la homogeneidad de los residuales.

El análisis multivariado comparativo entre los resultados del diseño de mezclas y los productos del mercado fue hecho por componentes principales (PCA). El PCA es conocido por analizar de manera multivariada y proyectar los resultados en superficies bidimensionales que representan los dos primeros componentes (los de mayor influencia en el análisis multivariado).

Adicionalmente se empleó un optimizador de respuesta para generar una mezcla que cumpliera con las características de los productos del mercado seleccionados. Todos los análisis estadísticos se efectuaron con el programa MINITAB® 17.0.

3. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se presentan los resultados de las medidas reológicas (barridos de deformación, barridos de frecuencia y curvas de flujo), de textura instrumental (esparcibilidad) y las medidas de textura sensorial (viscosidad, gomosidad y cremosidad) tanto para los productos del mercado como para el diseño de mezclas.

Para las mediciones experimentales del diseño de mezclas se muestran los modelos estadísticos que explican el comportamiento de cada una de las variables. Como principales resultados se encontró que la goma xantana genera geles más fuertes, así como mayor sensación de cremosidad y viscosidad. Posteriormente, para evaluar la posibilidad de simular la textura de los productos del mercado mediante las mezclas de hidrocoloides planteadas se presenta un análisis multivariado en donde matemáticamente se realiza la unificación de los resultados de los productos del mercado con los de las mezclas. Finalmente, en este capítulo se muestra la optimización de respuesta mediante análisis multivariado. En esta optimización se obtuvieron los contenidos específicos de los hidrocoloides necesarios para simular la textura de los productos del mercado posibles. De esta optimización se halló que la textura de la sopa instantánea y el yogur de melocotón pueden ser simuladas en casi todos los valores de las constantes a excepción de A_F y z . Al realizar la validación de las mezclas obtenidas por optimización, estas no presentaron diferencias significativas con los valores obtenidos por medición de los productos objetivo en cuanto a las variables de textura instrumental y sensorial (a excepción de la cremosidad), para los valores reológicos n fue la variable donde no se encontraron diferencias estadísticas para ambas mezclas.

3.1. Productos del mercado

Para los productos del mercado se realizaron análisis reológicos para entender la estabilidad y el comportamiento de la viscosidad, de textura instrumental para entender la fuerza necesaria para esparcir los productos y tres variables sensoriales: viscosidad, relacionada con los análisis reológicos de flujo, cremosidad y gomosidad relacionadas, con la sensación de *mouthfeel*. El *mouthfeel* está relacionado con la textura instrumental.

3.1.1. Análisis reológico

Mediante los barridos de deformación, barridos de frecuencia y curvas de flujo se pudo caracterizar el comportamiento viscoelástico de los productos del mercado. En términos generales se encontró que la mayonesa es el producto con una red de gel más fuerte y que la unión de la información reológica con la textura instrumental (esparcibilidad) y la textura sensorial (viscosidad, cremosidad y gomosidad) permiten diferenciar muy bien los productos.

3.1.1.1. Barridos de deformación

Los barridos de deformación se realizaron para los productos del mercado con el objetivo de encontrar el rango de linealidad viscoelástica (LVE). De este análisis se obtuvieron los resultados que se presentan en la **Figura 7**. En esta figura se puede observar que para cada producto estudiado la variación de la $Tan \Delta$ en el rango evaluado es baja. El LVE de los productos obtenidos comprende desde 0,01% (10^{-2}) a 10% (10^1) de deformación. Para los ensayos de barrido de frecuencia se seleccionó 1% como porcentaje de deformación (Ravindran & Matia-Merino, 2009).

Como se explicó en el numeral 1.3.1.1 la $Tan \Delta$ tiene un significado físico del comportamiento viscoelástico de los fluidos. Una clasificación que emplea los valores de $Tan \Delta$ es la dada para los polímeros (**Tabla 5**, Ferry, 1980).

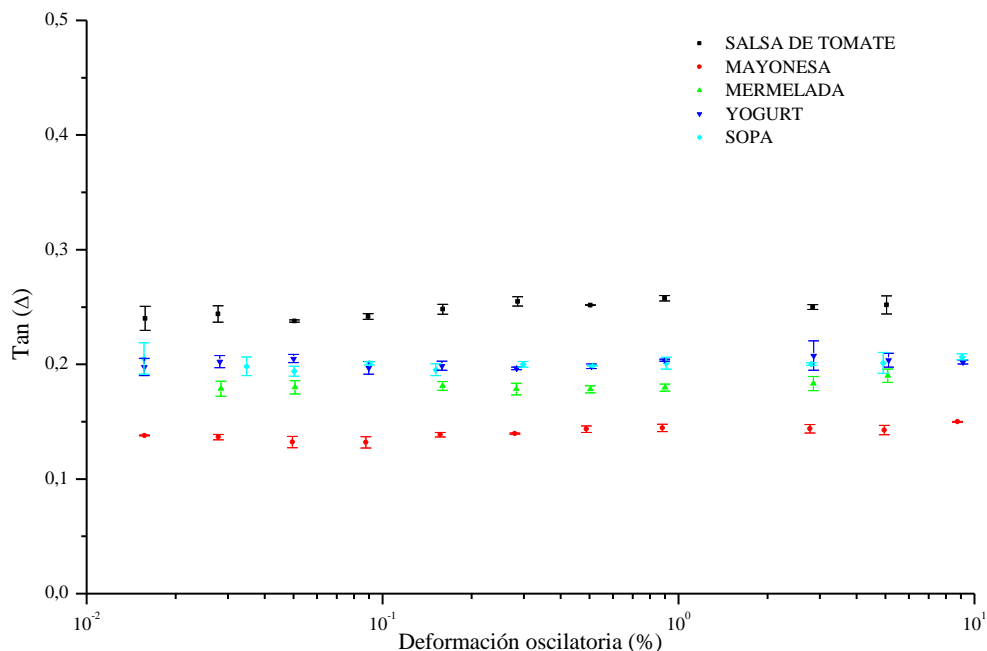


Figura 7. Comportamiento de la $Tan \Delta$ en función del porcentaje de deformación oscilatoria para los productos de mercado seleccionados ($N = 2 \pm 1$ SD). N = número de mediciones.

Tabla 5. Clasificación de fluidos según el valor de $\text{Tan } \Delta$ (Ferry, 1980).

Clasificación	$\text{Tan } \Delta$ (U.A.)
Soluciones diluidas	$> 3,0$
Todos los polímeros amorfos con o sin enlaces cruzados	$0,2 - 3,0$
Polímeros vítreos o cristalinos	$\approx 0,1$
Polímeros con pocos enlaces entre cruzados	$0,01$

U.A: Unidad adimensional.

De acuerdo a la **Figura 7** y a la **Tabla 5** la mermelada y la mayonesa se podrían clasificar como productos con una estructura similar a los polímeros vítreos o cristalinos, es decir materiales estructurados (geles más fuertes). De otro lado, la sopa instantánea, el yogur y la salsa de tomate podrían clasificarse como materiales con una estructura similar a la de un polímero amorfo, es decir que son materiales menos estructurados (geles menos fuertes).

3.1.1.2. Barridos de frecuencia

Los barridos de frecuencia de los productos fueron realizados con un porcentaje constante de deformación del 1%, en un rango de frecuencia (ω) de $0,1(10^{-1})$ a $10(10^1)$ Hz.

De los resultados de los barridos de frecuencia se obtuvo el módulo complejo (G^*) (**Ec. 2**). Este parámetro fue graficado en función de la frecuencia (ω) (**Figura 8**). En esta misma figura se observan las regresiones potenciales de G^* en función de ω , y el respectivo ajuste al modelo de weak gel model (**Ec. 3**). Las regresiones potenciales se presentan en la leyenda de la **Figura 8**. Con base en este ajuste se pudieron determinar los valores de las constantes A_F y z para cada objeto de análisis.

La **Tabla 6** muestra el resumen de los valores obtenidos para A_F y z de las muestras analizadas y su comparación con algunos resultados reportados por otros autores. Como se puede observar en esta tabla las interacciones de las moléculas involucradas en el comportamiento de la mayonesa y la mermelada presentan una magnitud similar entre ellas (magnitud del número z : 5,25 y 5,47, respectivamente). El parámetro A_F de la mayonesa, sin embargo, es mayor que el de la mermelada, con lo cual se puede concluir que las interacciones en la mayonesa son más fuertes.

Entre la salsa de tomate y la sopa instantánea se puede hacer una conclusión similar ya que al comparar la magnitud de la constante z de ambos productos no existe diferencia significativa entre éstos (4,12 y 4,11, respectivamente), pero las interacciones en la salsa de tomate son más fuertes que en la sopa instantánea (mayor magnitud de la constante A_F en la salsa de tomate que en la sopa instantánea).

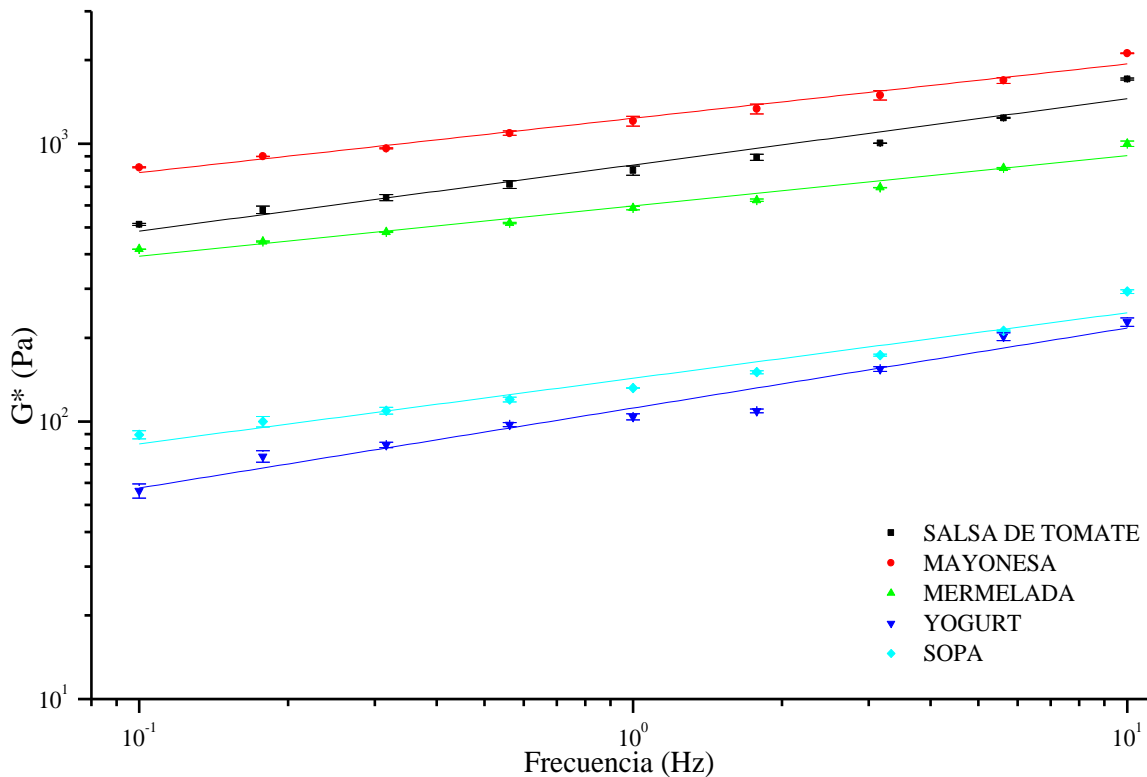


Figura 8. Módulo complejo (G^*) en función de la frecuencia (ω) para los productos del mercado estudiados. Coeficiente de $\omega = A_F$, exponente = $1/z$. Las ecuaciones de las regresiones potenciales son [$G^* = A_F(\omega)^{1/z}$]: $G^* = 822,63(\omega)^{0,243}$ para la salsa de tomate, $G^* = 1212,5(\omega)^{0,191}$ para la mayonesa, $G^* = 596,59(\omega)^{0,183}$ para la mermelada, $G^* = 109,49(\omega)^{0,284}$ para el yogur y $G^* = 140,28(\omega)^{0,243}$ para la sopa. ($N = 2 \pm 1$ SD). N = número de mediciones.

El yogur presenta un comportamiento diferente al de los otros cuatro productos, ya que tiene el menor número de interacciones (menor magnitud constante z) y la menor fuerza entre las interacciones (menor magnitud constante A_F) en comparación con los otros productos del mercado.

El valor de A_F obtenido en este trabajo para el yogur y la mermelada tiene el mismo orden de magnitud que el reportado por Gabriele, De Cindio, & D'Antona (2001). El valor de la constante z obtenida es menor al reportado para el yogur por los mismos autores. Estos resultados contrastantes en el valor de z pueden estar influenciados por los ingredientes del yogur italiano usado como objeto de estudio en el artículo de referencia.

Tabla 6. Parámetros del modelo weak gel obtenidos para los productos del mercado.

Producto	A_F (Pa.s ^{1/2})		z (U.A.)		R^2 experimental	p
	Experimental	Literatura	Experimental	Literatura		
Mayonesa	1212,5 ^a	*	5,25 ^a	*	0,967	0,076
Salsa de tomate	822,63 ^b	*	4,12 ^b	*	0,958	0,794
Mermelada de mora	596,59 ^c	550,60 ^{***,+}	5,47 ^a	5,92 ^{***,+}	0,958	0,976
Yogurt de melocotón	109,49 ^d	149,68 ^{***,+}	3,51 ^c	6,93 ^{***,+}	0,953	0,303
Sopa instantánea	140,28 ^e	*	4,11 ^b	*	0,958	0,914

*No se encuentran referencias.

**Mermelada de fresa.

*** Sabor no especificado.

†(Gabriele et al., 2001).

U.A: Unidad adimensional.

*^{a-e} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes. (N = 2). N = número de mediciones. Si $p > 0,05$ entonces no existen diferencias significativas entre el modelo de ajuste y los datos experimentales.

3.1.1.3. Curvas de flujo

De los análisis de curva de flujo se obtiene la viscosidad (η), la cual se graficó en función de la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) (**Figura 9**). En la misma figura se observan las regresiones potenciales de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla y sus respectivos ajustes al modelo de la ley potencial, correspondientes a la **Ec. 4**. Estos ajustes se muestran en la leyenda de la **Figura 9**. Con base en la **Ec. 4** se pudieron determinar los valores de las constantes índice de consistencia (K) e índice de flujo (n) para cada objeto de análisis (**Tabla 7**).

Todos los productos evaluados presentaron un valor de n menor a 1 lo cual permite concluir que todos ellos son pseudoplásticos. Acorde a la prueba Tukey la mayonesa, el yogur y la sopa instantánea presentaron el mismo valor de n . Del mismo modo, la mermelada y la salsa de tomate presentaron valores estadísticamente iguales del parámetro n y diferentes de los otros productos evaluados.

La prueba Tukey indicó que para K no hay diferencias significativas en este parámetro entre la sopa instantánea y el yogur, pero si entre la mayonesa, la mermelada y la salsa de tomate.

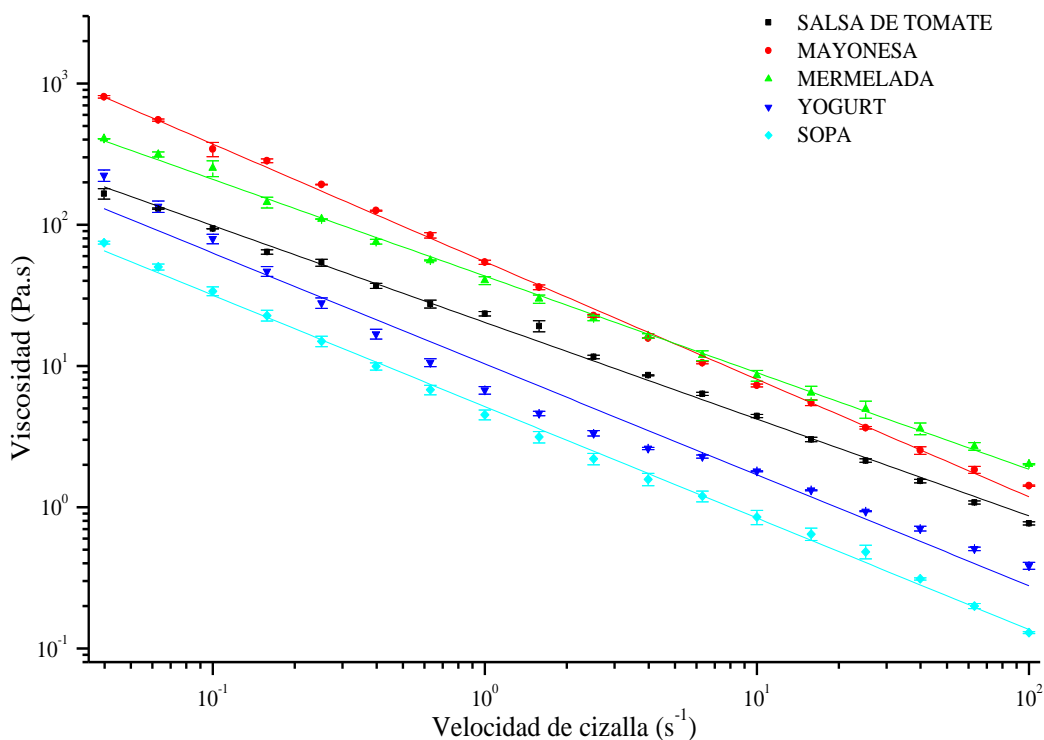


Figura 9. Variaciones de la viscosidad (η) en función de la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) para los productos del mercado seleccionados. Coeficiente de $\dot{\gamma} = K$ exponente = $n-1$. Las ecuaciones de las regresiones potenciales son [$\eta = K(\dot{\gamma})^{n-1}$]: $\eta = 41,857(\dot{\gamma})^{-0,69}$ para la mermelada, $\eta = 20,289(\dot{\gamma})^{-0,693}$ para la salsa de tomate, $\eta = 55,207(\dot{\gamma})^{-0,832}$ para la mayonesa, $\eta = 11,551(\dot{\gamma})^{-0,839}$ para el yogur y $\eta = 12,575(\dot{\gamma})^{-0,809}$ para la sopa. ($N = 2 \pm SD$). N = número de mediciones.

Tabla 7. Parámetros de ley potencial obtenidos para los productos del mercado evaluados.

Producto	K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)	n (U.A.)	R^2 experimental	p
Mayonesa	55,203 ^a	0,168 ^c	0,999	0,975
Mermelada de mora	41,857 ^b	0,310 ^a	0,999	0,549
Salsa de tomate	20,288 ^c	0,307 ^a	0,999	0,893
Sopa instantánea	12,575 ^d	0,191 ^{cb}	0,997	0,990
Yogurt	11,531 ^d	0,162 ^c	0,983	0,993

^{a-d} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes según el resultado del ANOVA. $p > 0,05$ no existen diferencias significativas entre el modelo de ajuste y los datos experimentales. ($N = 2$). N = número de mediciones. U.A.: Unidad adimensional.

3.1.2. Textura instrumental - esparcibilidad

La mayonesa y la mermelada de mora presentaron la mayor esparcibilidad, mientras que la sopa instantánea y el yogur la menor (**Tabla 8**). Este parámetro fue estadísticamente igual en la mayonesa y en la mermelada de mora. Los otros tres productos sí presentaron diferencias significativas entre ellos y también con respecto a la mayonesa y la mermelada.

Tabla 8. Resultados de fuerza de esparcibilidad.

Producto	Esparcibilidad (g)
Mayonesa	143,42 ± 1,61 ^a
Mermelada de mora	138,98 ± 3,20 ^a
Salsa de Tomate	65,78 ± 3,93 ^b
Sopa instantánea	14,69 ± 0,93 ^d
Yogur	22,06 ± 0,89 ^c

^{a-d} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes según el resultado del ANOVA. (N = 3 ± SD). N = número de mediciones.

3.1.3. Textura sensorial

Con los resultados obtenidos en el análisis sensorial de textura (**Tabla 9**) se completó la caracterización de los productos objetivo del mercado. Los resultados de este análisis mostraron que una sola característica sensorial no permite diferenciar los productos. Es de resaltar que acorde a los resultados la unión de las tres características sí permite diferenciarlos. La viscosidad fue estadísticamente igual en la mermelada de mora, mayonesa y salsa de tomate y a su vez mayor que la que se obtuvo para el yogur y la sopa instantánea, quien presentó la menor viscosidad. La cremosidad fue estadísticamente igual para la mayonesa, salsa de tomate y yogur. Estos tres productos tuvieron la mayor calificación de cremosidad. La mermelada de mora fue el producto con menor cremosidad. Adicionalmente, la gomosidad de la mermelada de mora, mayonesa y salsa de tomate fue estadísticamente igual entre ellas y superior a la obtenida en la sopa instantánea y yogur.

Tabla 9. Análisis sensorial de la textura de los productos del mercado en estudio.

Producto	Viscosidad	Cremosidad	Gomosidad
Mermelada de mora	4,41 ^a	2,20 ^c	3,52 ^a
Mayonesa	4,51 ^a	4,24 ^a	3,69 ^a
Salsa de tomate	4,14 ^a	4,04 ^a	3,57 ^a
Sopa instantánea	2,66 ^c	3,45 ^b	1,94 ^b
Yogur	3,44 ^b	4,35 ^a	2,74 ^b

^{a-c} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes según el resultado del ANOVA. La escala de viscosidad varió entre 0 (nada viscoso - agua) y 5 (muy viscoso - leche condensada pura). La escala de cremosidad varió entre 0 (nada cremoso - agua) y 5 (muy cremoso - crema de leche). La escala de gomosidad varió entre 0 (nada gomoso - agua) y 5 (muy gomoso - suspensión de harina al 57% *p/p*). (N = 12). N: número de mediciones.

3.2. Mezclas de hidrocoloides

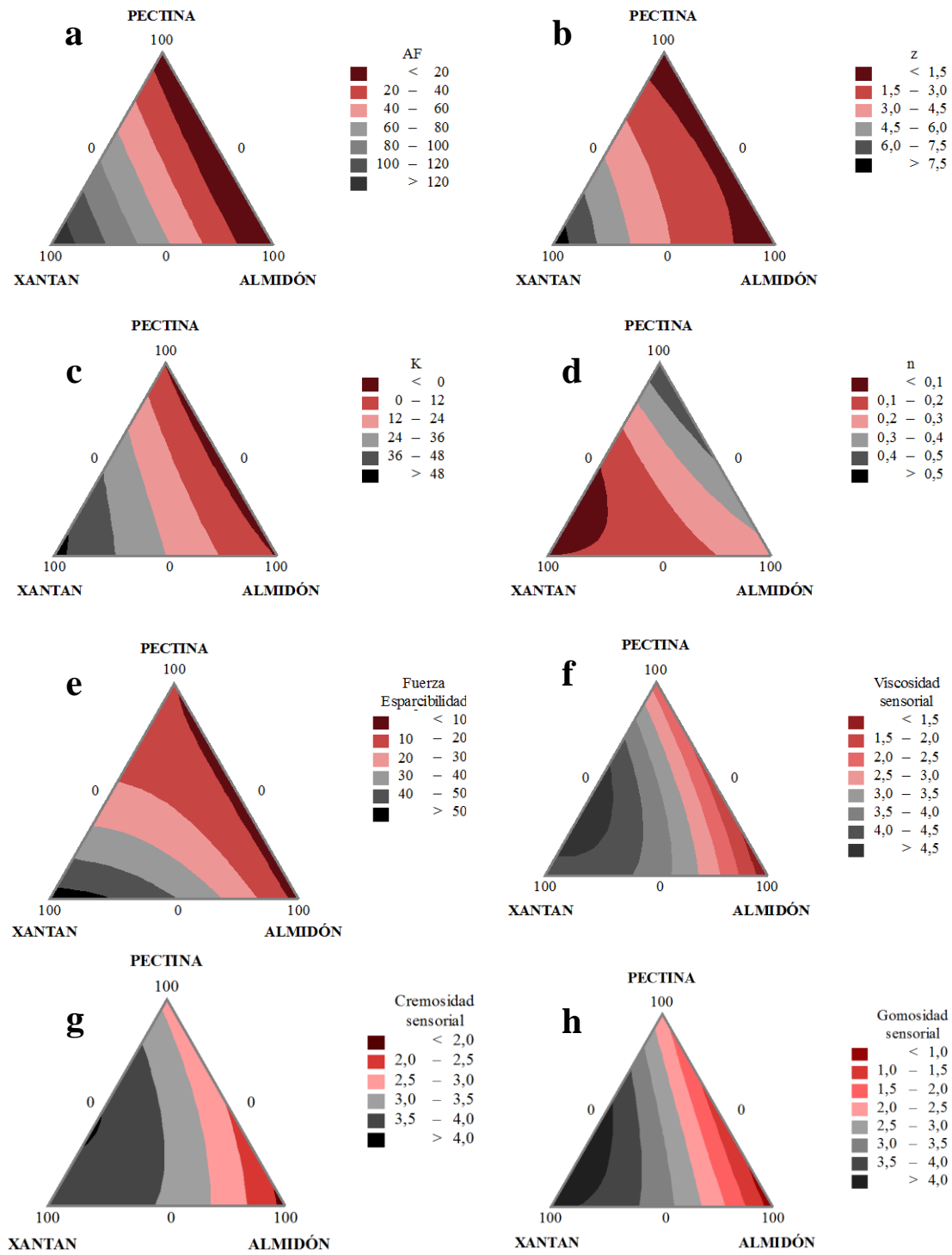


Figura 10. Superficies de respuesta obtenidas para las variables (a) A_F (b) z (c) K (d) n (e) Fuerza de esparcibilidad (f) Viscosidad sensorial (g) Cremosidad sensorial (h) Gomosidad sensorial.

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica, los análisis reológicos, textura instrumental y textura sensorial realizados a las mezclas de hidrocoloides planteadas. También se presentan las superficies de respuesta que resumen de manera gráfica los resultados obtenidos (**Figura 10**). Dichas superficies permiten tener una primera aproximación al comportamiento general de cada variable. Los resultados más importantes encontrados para las mezclas de los hidrocoloides fueron la sinergia positiva de la goma xantana con la pectina y el almidón en cuanto a estabilidad de mezcla, fuerza de esparcibilidad y variables sensoriales. Los resultados dejaron ver que es imprescindible tener xantana en las mezclas para poder obtener mezclas de hidrocoloides de mejores características de estabilidad (mayor magnitud de A_F y z) que las mezclas que no la tienen incluida.

3.2.1. Caracterización fisicoquímica

En la **Tabla 10** se observan los parámetros fisicoquímicos medidos para los tres hidrocoloides empleados en el diseño experimental de mezclas. El porcentaje de humedad relativa (%HR) hace referencia a la cantidad de agua libre y capilar en los productos. De los resultados se puede concluir que el almidón es el ingrediente que más agua libre posee, seguido por la goma xantana, lo cual significa que sus estructuras presentan mayor hidrofiliidad que la pectina. El menor contenido de agua libre en la pectina puede estar relacionado con el bajo grado de metoxilación lo cual la hace menos hidrofílica.

El pH obtenido para el almidón de yuca ($7,46 \pm 0,67$) se debe a que es un polisacárido cuyo pH es neutro por su falta de grupos ionizables. El pH en este tipo de materiales es reportado como cercano a la neutralidad en la literatura (Gutiérrez, 2000). El pH obtenido para la goma xantana fue también cercano a la neutralidad ($6,80 \pm 0,54$). Este valor es debido a que la goma xantana, como se mencionó en la sección 1.2.2., es un polímero que contiene glucosa (pKa: 12,08), manosa (pKa: 12,28) y ácido glucurónico, (pKa: 3,20) (Bhattacharyya & Rohre, 2012) y el balance de estas unidades y sus respectivos pKas lo hacen neutro en solución acuosa. El pH ácido de la pectina de origen cítrico ($3,97 \pm 0,15$) se debe a que su unidad fundamental es el ácido poligalacturónico, el cual tiene dos grupos ionizables cuyos pKa son 2,9 y 3,3. Al tratarse de una pectina de bajo metoxilo varias unidades de ácido poligalacturónico se encuentran disponibles para ionizarse (Neiryck, Meeren, & Lukaszewicz-lausecker, 2007).

Tabla 10. Caracterización fisicoquímica de hidrocoloides.

Material	%HR* (p/p)	pH**	Viscosidad dinámica (cPs)
Almidón de yuca	13,12± 0,15 ^a	7,46± 0,67 ^a	278,8 ± 36,3 ^b
Pectina	9,11± 0,16 ^c	3,97 ±0,15 ^b	14,7 ± 3,1 ^c
Xantana	11,18± 0,13 ^b	6,80± 0,54 ^a	10583 ± 1125 ^a

*% Humedad Relativa.

**El pH se midió a temperatura ambiente en soluciones al 1% (p/p).

***Medida a 25 °C.

^{a-c} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes según el resultado del ANOVA (N = 3 ± SD).N = número de mediciones.

La goma xantana presentó una mayor viscosidad dinámica debido a que puede formar agregados complejos, aún a 25°C. Por el contrario las soluciones de almidón y pectina necesitan de temperaturas altas (>60°C) para obtener viscosidades altas, la baja viscosidad obtenida se da por interacciones de puente de hidrógeno (Toledo, 2012).

3.2.2. Análisis reológico

En estos análisis se evaluaron los comportamientos reológicos de las mezclas de los hidrocoloides para observar los cambios a nivel de las redes estructurales de las mezclas.

De estas medidas se encontró principalmente que a mayor cantidad de goma xantana los geles eran más fuertes. También se encontró sinergia entre la goma xantana y la pectina. Los resultados de las medidas reológicas indicaron, además, que la presencia de almidón de yuca tiene una influencia muy baja en cuanto a la fuerza de gel.

3.2.2.1. Barridos de deformación

El primer análisis reológico realizado a las mezclas de hidrocoloides, al igual que en los productos del mercado, fue el barrido de deformación. Estas medidas permitieron determinar el rango de linealidad viscoelástica (LVE) y así seleccionar el porcentaje de deformación para los análisis de barridos de frecuencia. Todas las mezclas presentaron linealidad en el valor de la $Tan \Delta$ entre 0,1% (10^{-1}) y 10% (10^1) de deformación (**Figura 11**). Se definió 1% como el porcentaje de deformación para los ensayos de barrido de frecuencia.

De acuerdo con la **Tabla 5** las mezclas evaluadas son en su mayoría materiales con estructuras similares a la de los polímeros amorfos, a excepción de la mezcla almidón 100%, que tiene una estructura similar a un polímero cristalino. Estos resultados coinciden con la naturaleza del almidón ya que debido a su contenido de amilopectina posee un alto componente cristalino (BeMiller & Whistler, 2009).

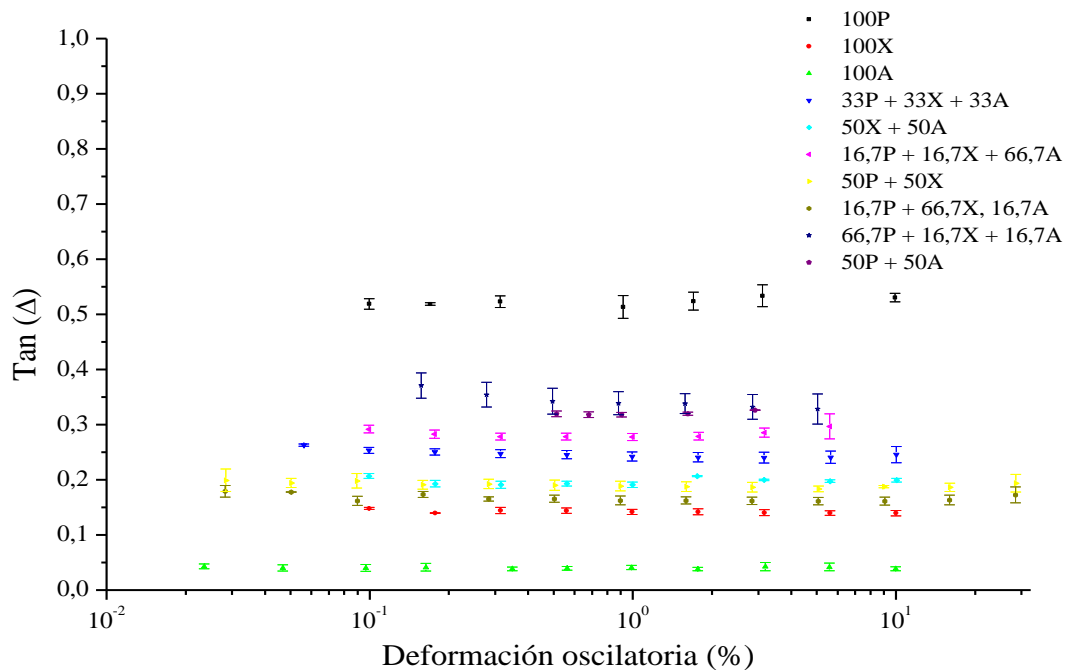


Figura 11. Comportamiento de la $Tan \Delta$ en función del porcentaje de deformación oscilatoria para las mezclas de hidrocoloides. Los valores presentados son el promedio de las repeticiones realizadas dentro del diseño de mezclas ($N=2 \pm SD$). N = número de mediciones. P = Pectina. X = Goma xantana. A = Almidón.

Dentro de las mezclas que presentan una estructura similar a la de un polímero amorfo (valores de $Tan \Delta$ entre 0,2 y 0,6 en la **Figura 11**) se puede observar que entre mayor es el contenido de pectina más alto es el valor de $Tan \Delta$. Estos resultados indican que a mayor contenido de pectina se presentan menos interacciones entre las cadenas de los hidrocoloides involucrados en las mezclas mencionadas.

En la **Figura 11** se puede observar también que al aumentar el contenido de goma xantana (moviéndose en el aumento en contenido de goma xantana desde el marcador fucsia, luego azul rey, luego azul aguamarina y finalmente el rojo) se disminuye el valor de la $Tan \Delta$ dentro del rango de los materiales similares a los polímeros amorfos. Esta tendencia se traduce en que al incrementar el contenido de goma xantana la solución se vuelve más viscosa con una estructura más cristalina.

3.2.2.2. Barridos de frecuencia

En la **Figura 12** se presenta el módulo complejo (G^*) en función de la frecuencia (ω) para todas las mezclas de los hidrocoloides. En la leyenda de la figura mencionada se pueden observar las regresiones potenciales de G^* en función de ω y el respectivo ajuste al modelo

de weak gel model (**Ec. 3**). Con base en estas regresiones se obtuvieron los valores de las constantes A_F y z para cada objeto de análisis (**Tabla 11**). A partir de estos valores se generaron las superficies de respuesta de las constantes (**Figura 10 a y b**).

De las superficies de respuesta se observa que los valores máximos para ambas constantes fueron obtenidas con la mezcla 100% goma xantana. En el caso de la constante z la mayoría de las mezclas (mayor área de la superficie) se encontraron en el rango de 1,5-4,5.

De la **Tabla 11** se puede concluir que el número z tiene una baja magnitud ($z < 1$) cuando las mezclas poseen solamente pectina o almidón de yuca, siendo así mezclas con un muy bajo número de interacciones. Así mismo, acorde a la baja magnitud de la constante A_F (Migliori et al., 2011) en las mezclas 100% pectina o 100% almidón, se concluye que la red formada por estas mezclas es menos fuerte. Para la mezcla 100% xantana la constante A_F es mayor y esto significa una red más fuerte.

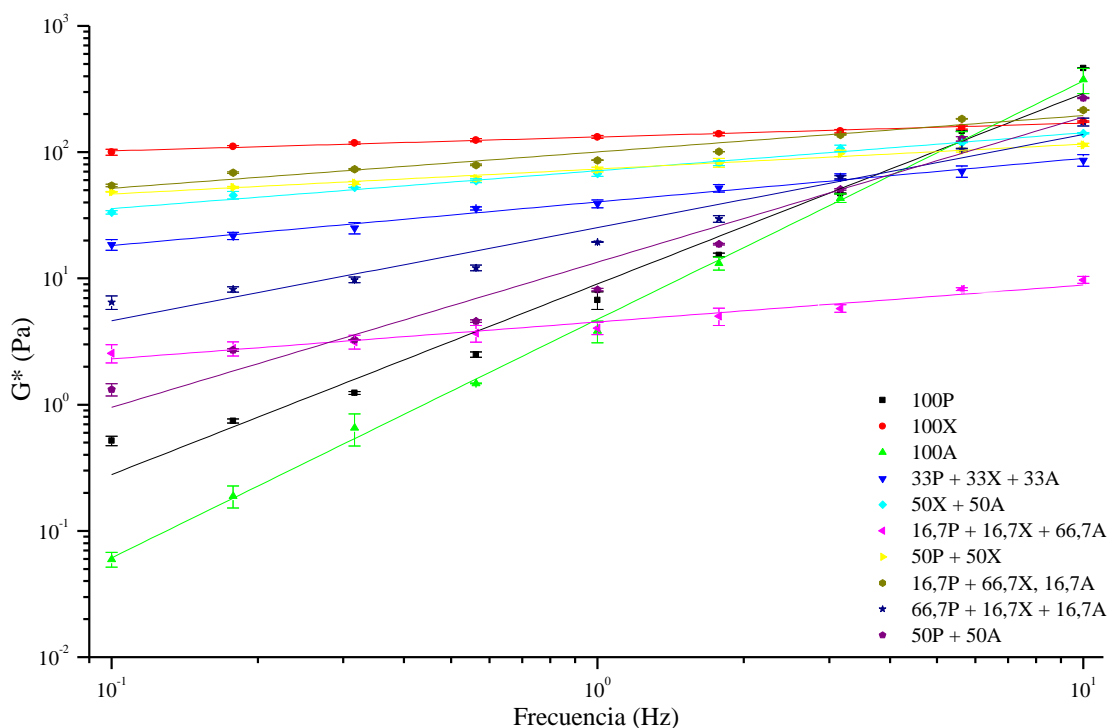


Figura 12. Módulo complejo (G^*) en función de la frecuencia (ω) para las mezclas de hidrocoloides. Los valores presentados son el promedio de las repeticiones realizadas dentro del diseño de mezclas. Coeficiente de $\omega = A_F$, exponente = $1/z$ P: Pectina. X: Xantana. A: Almidón. Las ecuaciones de las regresiones potenciales son [$G^* = A_F(\omega)^{1/z}$]: $G^* = 9,07(\omega)^{1,52}$ para 100P, $G^* = 70,85(\omega)^{0,30}$ para 50X + 50A, $G^* = 99,58(\omega)^{0,29}$ para 16,7P + 66,7X + 16,7A, $G^* = 74,84(\omega)^{0,21}$ para 50P + 50X, $G^* = 26,552(\omega)^{0,73}$ para 66,7P + 16,7X + 16,7A, $G^* = 13,40(\omega)^{1,17}$ para 50P + 50A, $G^* = 128,65(\omega)^{0,12}$ para 100X, $G^* = 4,71(\omega)^{1,98}$ para 100A, $G^* = 4,07(\omega)^{0,33}$ para 16,7P + 16,7X + 66,7A, $G^* = 42,53(\omega)^{0,37}$ para 33,3P + 33,3X + 33,3A. (N = 2 ± 1 SD). N: número de mediciones.

Tabla 11. Valores de las constantes A_F y z obtenidos para las mezclas evaluadas.

Pectina	Xantana	Almidón	A_F (Pa.s)	z (U.A)	R^2 (coeficiente de regresión)	p
Participación de cada hidrocoloide en el 2,0%(p/p) de la mezcla total						
100,0	0,0	0,0	9,07 ^g	0,66 ^g	0,981	0,060
0,0	0,0	100,0	4,71 ⁱ	0,50 ^g	0,999	0,627
0,0	100,0	0,0	135,10 ^a	9,30 ^a	0,999	0,638
33,3	33,3	33,3	42,53 ^d	2,71 ^d	0,992	0,742
0,0	0,0	100,0	4,61 ⁱ	0,56 ^g	0,993	0,627
0,0	50,0	50,0	71,60 ^c	3,31 ^d	0,998	0,332
0,0	100,0	0,0	128,65 ^a	8,59 ^a	0,969	0,638
16,6	16,6	66,6	4,94 ^h	3,00 ^d	0,976	0,122
66,6	16,6	16,6	23,93 ^e	1,34 ^e	0,965	0,982
33,3	33,3	33,3	38,01 ^d	3,11 ^d	0,968	0,742
16,6	16,6	66,6	4,07 ^h	3,00 ^d	0,952	0,122
0,0	50,0	50,0	70,85 ^c	3,33 ^d	0,965	0,332
50,0	50,0	0,0	74,84 ^c	4,70 ^b	0,968	0,751
16,6	66,6	16,6	101,18 ^b	3,53 ^c	0,941	0,030
100,0	0,0	0,0	8,94 ^g	0,67 ^g	0,971	0,060
50,0	50,0	0,0	72,05 ^c	5,05 ^b	0,99	0,751
16,6	66,6	16,6	99,58 ^b	3,42 ^c	0,952	0,030
66,6	16,6	16,6	26,55 ^e	1,37 ^e	0,953	0,982
50,0	0,0	50,0	13,40 ^f	0,85 ^f	0,969	0,932
50,0	0,0	50,0	13,44 ^f	0,89 ^f	0,959	0,932

^{a-f} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes según ANOVA. (N=2). N = número de mediciones. U.A = unidad adimensional. Si $p > 0,05$ entonces no existen diferencias significativas entre el modelo de ajuste y los datos experimentales.

Para la constante A_F se puede concluir que la presencia de goma xantana con una contribución alta de pectina (66,7% pectina + 16,7 % xantana + 16,7% almidón) es sinérgica en cuanto a la fuerza de las interacciones ya que la constante A_F aumenta 2,5 veces en comparación con el valor de la constante A_F de la mezcla de pectina 100%. Esta afirmación se puede corroborar al analizar las mezclas binarias de pectina. El aumento de la constante A_F de la mezcla 50% pectina + 50% xantana es de ocho veces versus 100% pectina y el de la mezcla 50% pectina + 50% almidón fue de 1,44 veces versus 100% pectina. Estos resultados indican que existe en estas proporciones una sinergia entre los hidrocoloides. Al comparar la mezcla 16,7% pectina + 16,7 % xantana + 66,7% almidón con la 100% almidón

no se presentó ninguna sinergia ni positiva ni negativa para esta constante al mantener el orden de magnitud. Entre las mezclas 100% xantana y 16,7% pectina + 66,7 % xantana + 16,7% almidón se presentó una disminución de 1,35 veces del valor de la constante, mostrando que en este nuevo caso la sinergia es negativa entre la goma y los otros dos hidrocoloides. La interacción entre la pectina y el almidón se representa en una sinergia positiva de bajo impacto. Para A_F se presentó un aumento de la magnitud en la mezcla 50% pectina + 50% almidón (13,40 Pa.s) frente al valor de A_F para las mezclas 100% pectina (9,07 Pa.s) y 100% almidón (4,71 Pa.s). El aumento presentado fue de 1,47 y 2,84 veces, respectivamente.

Las mezclas con alto contenido de almidón de yuca, como es la compuesta por 16,7% pectina + 16,7 % xantana + 66,7% almidón (3,0), aumentó seis veces la magnitud del parámetro z frente al valor de la mezcla con 100% almidón (0,5). Al aumentar el valor de la constante z se concluye que la mezcla es más estable de acuerdo a lo descrito por Migliori et al. (2011). En el caso de las mezclas con almidón, la estabilidad está relacionada con el retardo o la inhibición de la retrogradación, que es el fenómeno que desestabiliza las soluciones de almidón. El aumento de estabilidad de la mezcla 16,7% pectina + 16,7 % xantana + 66,7% almidón está acorde a las evaluaciones pareadas con almidón de yuca efectuadas por Sikora, Kowalski, & Tomasik (2008). Estos autores demostraron con mediciones reológicas que las interacciones entre el almidón y la goma xantana inhiben la retrogradación del almidón, haciendo la mezcla más estable que preparaciones con sólo almidón.

3.2.2.3. Curvas de flujo

En la **Figura 13** aparece la viscosidad (η) en función de la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) para todas las mezclas de los hidrocoloides. En la leyenda de la misma figura se presentan las regresiones potenciales de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla y sus respectivos ajustes al modelo de Ostwald-de Waele, correspondientes a la **Ec. 4**. Con base en esta ecuación se determinaron los valores de las constantes K y n para cada objeto de análisis (**Tabla 12**). A partir de estos valores se generaron las superficies de respuesta de las constantes (**Figura 10 c y d**).

El mayor valor de K se obtuvo con la mezcla 100% xantana (>48) (**Figura 10 c y d**) y la mayoría de las mezclas presentaron un n entre el rango de 0,1-0,3.

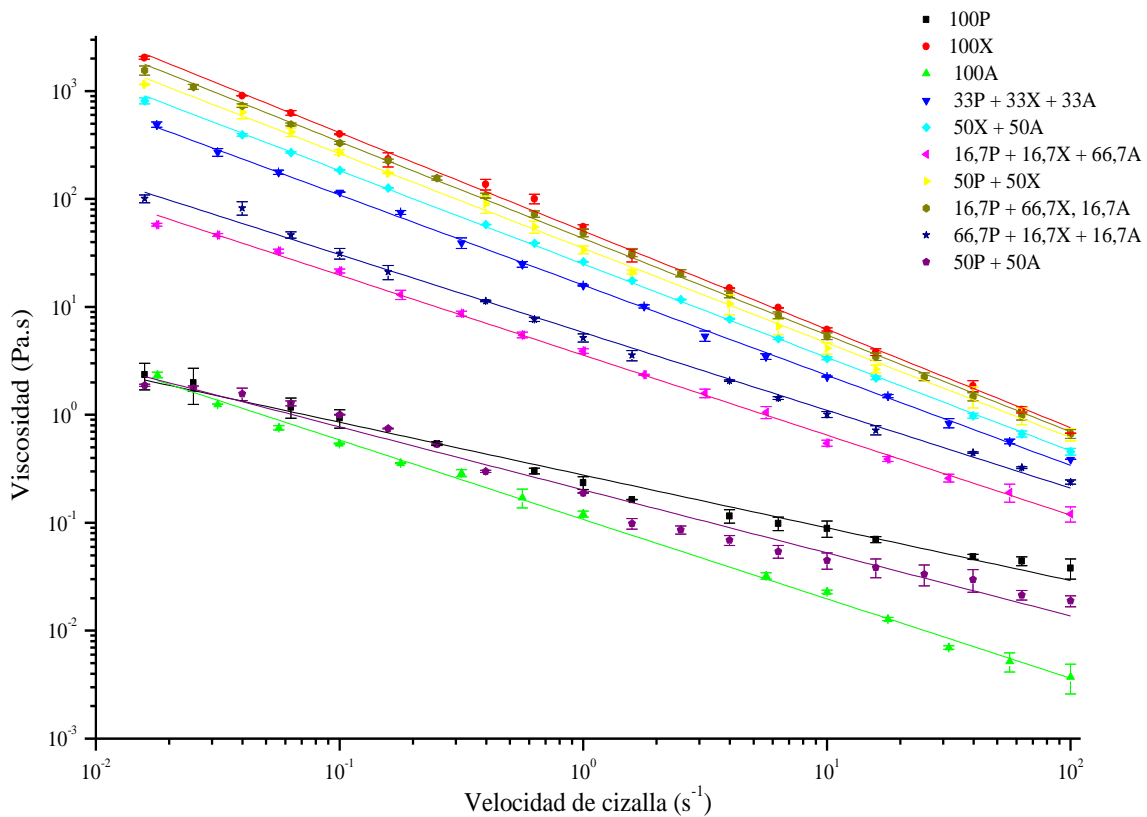


Figura 13. Variaciones de la viscosidad (η) en función de la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) para las mezclas de hidrocoloides realizadas. Coeficiente de $\dot{\gamma} = K$, exponente = $n-1$. P = pectina. X = xantana. A = almidón. Las ecuaciones de las regresiones potenciales son [$\eta = K (\dot{\gamma})^{n-1}$]: $\eta = 24,634(\dot{\gamma})^{-0,88}$ para la mezcla 50X + 50A. $\eta = 44,983(\dot{\gamma})^{-0,88}$ para la mezcla 16,7P + 66,7X + 16,7A. $\eta = 0,2797(\dot{\gamma})^{-0,54}$ para la mezcla 100P. $\eta = 30,592(\dot{\gamma})^{-0,89}$ para la mezcla 50P + 50X. $\eta = 6,0854(\dot{\gamma})^{-0,73}$ para la mezcla 66,7P + 16,7X + 16,7A. $\eta = 0,2195(\dot{\gamma})^{-0,57}$ para la mezcla 50P + 50A. $\eta = 0,1086(\dot{\gamma})^{-0,76}$ para la mezcla 100A. $\eta = 49,51(\dot{\gamma})^{-0,91}$ para la mezcla 100X. $\eta = 3,385(\dot{\gamma})^{-0,75}$ para la mezcla 16,7P + 16,7X + 66,7A. $\eta = 16,228(\dot{\gamma})^{-0,83}$ para la mezcla 33,3P + 33,3X + 33,3A. (N = 2 \pm SD). N = número de mediciones.

En la **Tabla 12** se enlistan los resultados de las constantes K y n para todos los experimentos. En esta tabla se observa que todas las mezclas evaluadas son de carácter pseudoplástico ya que n es menor a 1. Este valor significa que la viscosidad disminuye de manera inversa con la cizalla recibida por la mezcla. Las mezclas con mayor contenido de goma xantana son las de menor carácter newtoniano ya que su índice de flujo es cercano a cero y más lejano de 1.

Tabla 12. Parámetros de la ley potencial obtenidos para las mezclas evaluadas.

Pectina	Xantana	Almidón	K (Pa·s ⁿ)	n (U.A.)	R ²	p
Participación de cada hidrocoloide en el 2,0%(p/p) de la mezcla total						
100,0	0,0	0,0	0,264 ^h	0,563 ^a	0,9903	0,864
0,0	0,0	100,0	0,109 ^j	0,237 ^d	0,9931	0,877
0,0	100,0	0,0	49,510 ^a	0,091 ^g	0,9995	0,528
33,3	33,3	33,3	16,200 ^e	0,173 ^e	0,9995	0,534
0,0	0,0	100,0	0,111 ^j	0,274 ^d	0,9954	0,877
0,0	50,0	50,0	24,670 ^d	0,155 ^e	0,9991	0,436
0,0	100,0	0,0	47,990 ^a	0,093 ^g	0,9972	0,528
16,6	16,6	66,6	3,390 ^g	0,254 ^c	0,9945	0,037
66,6	16,6	16,6	5,046 ^f	0,302 ^c	0,9969	0,326
33,3	33,3	33,3	16,020 ^e	0,168 ^e	0,9993	0,534
16,6	16,6	66,6	3,403 ^g	0,301 ^c	0,9917	0,037
0,0	50,0	50,0	24,634 ^d	0,125 ^e	0,9996	0,436
50,0	50,0	0,0	36,580 ^c	0,137 ^f	0,9994	0,983
16,6	66,6	16,6	44,983 ^b	0,122 ^f	0,9978	0,616
100,0	0,0	0,0	0,280 ^h	0,458 ^a	0,9813	0,864
50,0	50,0	0,0	30,592 ^c	0,113 ^f	0,9910	0,983
16,6	66,6	16,6	39,064 ^b	0,118 ^f	0,9962	0,616
66,6	16,6	16,6	6,085 ^f	0,274 ^c	0,9982	0,326
50,0	0,0	50,0	0,220 ⁱ	0,433 ^b	0,9793	0,010
50,0	0,0	50,0	0,183 ⁱ	0,395 ^b	0,9802	0,010

^{a-i} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes según ANOVA. Si $p > 0,05$ entonces no existen diferencias significativas entre el modelo de ajuste y los datos experimentales. (N = 2). N = número de mediciones. U.A. = unidad adimensional. K = índice de consistencia. n = índice de flujo.

3.2.3. Textura instrumental - esparcibilidad

Los resultados de fuerza de esparcibilidad de las mezclas de hidrocoloides son resumidas en la **Tabla 13**. En la **Figura 10 e** se puede observar el comportamiento general de la fuerza de esparcibilidad en la superficie de respuesta. La mezcla 100% goma xantana fue la que mayor fuerza requirió para esparcirse sobre la probeta. Estos resultados indicaron también que a mayor contenido de goma xantana mayor es la fuerza de esparcibilidad, lo cual está ligado a una mayor fuerza para esparcir sobre la lengua al momento de ingerir y como consecuencia una mayor sensación de *mouthfeel*.

Las mezclas binarias de almidón y goma xantana presentan una fuerza de esparcibilidad que tiene el mismo orden de magnitud que la fuerza requerida por la sola goma xantana. La mezcla de 50% xantana + 50% almidón presentó una fuerza de esparcibilidad ($45,45 \pm 1,32g$)

Tabla 13. Fuerzas de esparcibilidad correspondientes a las mezclas de hidrocoloides.

Pectina	Xantana	Almidón	Fuerza esparcibilidad (g)
Participación de cada hidrocoloide en el 2,0%(p/p) de la mezcla total			
100,0	0,0	0,0	5,87 ± 0,57 ^h
0,0	0,0	100,0	6,26 ± 0,35 ^h
0,0	100,0	0,0	56,86 ± 1,98 ^a
33,3	33,3	33,3	22,88 ± 1,99 ^e
0,0	0,0	100,0	11,11 ± 0,27 ^h
0,0	50,0	50,0	45,45 ± 1,32 ^b
0,0	100,0	0,0	55,55 ± 1,95 ^a
16,6	16,6	66,6	9,78 ± 0,47 ^f
66,6	16,6	16,6	23,21 ± 1,13 ^d
33,3	33,3	33,3	20,41 ± 0,19 ^e
16,6	16,6	66,6	10,02 ± 0,31 ^f
0,0	50,0	50,0	48,83 ± 1,65 ^b
50,0	50,0	0,0	23,37 ± 1,11 ^e
16,6	66,6	16,6	32,07 ± 1,23 ^c
100,0	0,0	0,0	6,11 ± 0,14 ^h
50,0	50,0	0,0	20,54 ± 1,33 ^e
16,6	66,6	16,6	31,98 ± 1,05 ^c
66,6	16,6	16,6	24,12 ± 1,08 ^d
50,0	0,0	50,0	8,85 ± 0,44 ^g
50,0	0,0	50,0	7,94 ± 0,41 ^g

^{a-h} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes según ANOVA. (N = 3 ± SD). N = número de mediciones.

cercana a la de la mezcla con 100% xantana (56,860 ± 1,980 g). La mezcla 50% xantana + 50% almidón tuvo un aumento de 7,5 veces comparado con el valor de la mezcla 100% almidón (6,257 ± 0,347 g). La similitud de la esparcibilidad en las dos preparaciones antes mencionadas demuestra que existe una sinergia entre estos dos hidrocoloides.

3.2.4. Textura sensorial

En la **Tabla 14** se resumen las calificaciones promedio obtenidas en las evaluaciones sensoriales de viscosidad, cremosidad y gomosidad. En la **Figura 10 f, g y h** se puede observar el comportamiento general de las variables sensoriales en la superficie de respuesta. Los resultados indican que la mayor viscosidad sensorial se obtiene con la mezcla de 100% goma xantana. La viscosidad sensorial de las mezclas con cualquier contenido de almidón presenta un aumento al hacer mezclas binarias y ternarias de este

Tabla 14. Influencia de la combinación de hidrocoloides en las características de textura sensorial de las mezclas evaluadas.

Pectina	Xantana	Almidón	Viscosidad	Cremosidad	Gomosidad
Participación de cada hidrocoloide en el 2,0%(p/p) de la mezcla total					
100,0	0,0	0,0	2,1 ^d	2,8 ^c	1,7 ^c
0,0	0,0	100,0	0,9 ^e	1,9 ^d	0,5 ^e
0,0	100,0	0,0	4,2 ^a	3,7 ^b	3,9 ^a
33,3	33,3	33,3	3,6 ^b	3,5 ^b	3,0 ^b
0,0	0,0	100,0	1,2 ^e	1,8 ^d	0,7 ^e
0,0	50,0	50,0	3,7 ^b	3,6 ^a	3,1 ^b
0,0	100,0	0,0	4,2 ^a	3,5 ^b	4,4 ^a
16,6	16,6	66,6	2,7 ^c	2,9 ^c	2,1 ^c
66,6	16,6	16,6	3,6 ^b	3,3 ^a	2,8 ^b
33,3	33,3	33,3	3,4 ^b	3,3 ^b	2,9 ^b
0,0	50,0	50,0	3,6 ^b	3,1 ^a	3,0 ^b
16,6	16,6	66,6	3,1 ^c	2,8 ^c	2,8 ^c
50,0	50,0	0,0	4,7 ^a	4,1 ^a	4,1 ^a
16,6	66,6	16,6	4,4 ^a	4,1 ^b	3,9 ^a
100,0	0,0	0,0	2,2 ^d	2,9 ^c	2,5 ^c
50,0	50,0	0,0	4,5 ^a	3,8 ^a	4,1 ^a
16,6	66,6	16,6	4,4 ^a	3,7 ^b	3,7 ^a
66,6	16,6	16,6	3,6 ^b	3,5 ^a	2,8 ^b
50,0	0,0	50,0	1,8 ^e	2,5 ^c	1,2 ^d
50,0	0,0	50,0	1,3 ^e	2,3 ^c	1,0 ^d

^{a-e} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes según ANOVA. La escala de viscosidad varió entre 0 (nada viscoso - agua) y 5 (muy viscoso - leche condensada pura). La escala de cremosidad varió entre 0 (nada cremoso - agua) y 5 (muy cremoso - crema de leche). La escala de gomosidad varió entre 0 (nada gomoso - agua) y 5 (muy gomoso - suspensión de harina al 57% p/p). (N = 12). N = número de mediciones.

hidrocoloide con la pectina y/o la goma xantana. El incremento de la viscosidad en sistemas con contenido de almidón e hidrocoloides, como los evaluados en este trabajo, fue reportado como consecuencia de la liberación de amilosa y amilopectina de bajo peso molecular por Bhanassey & Breene (1994). Dado que estas unidades promueven la formación de polímeros complejos aumentando así la viscosidad del sistema.

La mayor sensación de cremosidad puede ser obtenida por tres mezclas diferentes en su composición: 50% xantana + 50% almidón; 66,7% pectina + 16,7% xantana + 16,7% almidón y 50% pectina + 50% xantana. La cremosidad en estas tres mezclas se encuentra en un rango que varía entre calificaciones de 3,5 a 4,1.

Las calificaciones entre 3,8 a 4,4 (calificaciones más altas) para la gomosidad se obtuvieron en mezclas con contenidos altos de goma xantana (100% o 66% con el porcentaje restante en partes iguales de pectina y almidón o la combinación 50% xantana-50% pectina). Si se deseara tener una viscosidad alta pero con menor sensación gomosa,

factor indeseado por el consumidor, se debería emplear la combinación 50% xantana + 50% almidón ya que esta combinación no presenta un calificación alta en cuanto a gomosidad. Al igual que para los productos del mercado es la combinación de las tres características sensoriales la que permite diferenciar las mezclas entre sí. Por esta razón es importante la evaluación de las tres variables.

3.2.5. Ajustes al modelo para las variables medidas

Luego de realizar las mediciones para las mezclas de hidrocoloides se realizaron los respectivos análisis del diseño de mezclas mediante regresión de la mezcla. Se ensayaron ajustes lineal, cuadrático y cúbico (**Anexo B**). El mejor ajuste fue el obtenido mediante el modelo cuadrático. Por lo tanto en esta sección se presentan las ecuaciones de dichos modelos que representan las variables reológicas, de textura instrumental y sensorial evaluadas (**Tabla 15**).

Para evaluar la influencia de la réplica de los ensayos se compararon los valores de R^2 global y R^2 ajustado (**Tabla 15**). Al comparar estos dos valores se puede concluir que los ensayos son repetibles ya que el valor de R^2 ajustado es menor que el de R^2 global en todos los casos. El valor de R^2 predictivo permite saber el porcentaje de resultados que el modelo puede representar dentro de la superficie evaluada.

Tabla 15. Ecuaciones y significancias obtenidas para el modelo final definido por el diseño estadístico de mezclas para las variables reológicas, de textura sensorial e instrumental-esparcibilidad.

Variable	Ecuación	R^2 (%)		
		Global*	Predictivo**	Ajustado***
A_r	9,97 P + 136,91 X + 0,57 A - 4,47 PX - 8,69 PA - 15,09 XA	89,53	82,66	85,79
z	0,57 P + 8,46 X + 1,04 A - 1,34 PX + 1,48 PA - 6,07 XA	96,38	93,63	95,08
K	-0,68 P + 51,11 X - 0,61 A + 30,50 PX - 11,92 PA - 4,44 XA	96,55	94,03	95,32
n	0,503 P + 0,1 X + 0,265 A - 0,764 PX + 0,068 PA - 0,099 XA	95,57	89,40	93,99
Esparcibilidad	0,21 P + 54,61 X + 6,62 A - 42,26 PX - 2,43 PA + 40,51 XA	88,34	80,12	84,17
Viscosidad	2,22 P + 4,15 X + 1,14 A + 6,02 PX + 0,45 PA + 4,29 XA	96,05	92,80	94,64
Creemosidad	2,85 P + 3,61 X + 1,85 A + 2,98 PX + 0,58 PA + 2,74 XA	95,49	90,61	93,87
Gomosidad	2,10 P + 4,05 X + 0,77 A + 4,21 PX - 0,61 PA + 3,14 XA	93,91	87,37	91,73

* Coeficiente que tiene en cuenta todos los datos obtenidos.

** Coeficiente que representa el porcentaje de los comportamientos que modela la ecuación.

*** Coeficiente que no tiene en cuenta la dispersión de las réplicas.

P = pectina. X = goma xantana. A = almidón. PX = pectina-xantana. PA = pectina-almidón. XA = goma xantana-pectina.

Las validaciones estadísticas (análisis de varianza y de residuos) de estos modelos se pueden observar en el **Anexo C**. De estos análisis se pudo concluir que los modelos eran estadísticamente correctos y que las conclusiones realizadas sobre estos modelos fueron válidas.

Al observar la ecuación obtenida para A_F se puede concluir que la goma xantana tuvo gran influencia positiva en el comportamiento de esta constante y la mayor influencia negativa fue la dada por la interacción entre la xantana-almidón (**Tabla 15**). Este resultado significa que la fuerza de los geles, representada por este parámetro, está altamente influenciada por este hidrocoloide. Para la constante z la goma xantana fue la de mayor influencia positiva y la mezcla de esta goma con almidón influyó de manera negativa en el comportamiento de esta constante. En el caso del parámetro K La goma xantana también fue el hidrocoloide que más influyó de manera positiva y la interacción pectina-almidón fue la de mayor influencia negativa. Lo que más influyó de manera negativa en la constante n fue la interacción de pectina y goma xantana y de manera positiva la de mayor influencia fue la pectina.

Se evidenció que la interacción pectina-xantana es la que más afectó de manera negativa la fuerza de esparcibilidad y la goma xantana a su vez tuvo una alta influencia positiva en la fuerza de esparcibilidad. Los almidones no modificados no presentan las mejores propiedades para su uso en alimentos, sin embargo las mezclas almidones-hidrocoloides, como las evaluadas en este trabajo, pueden proteger los gránulos del esfuerzo durante la cocción, pueden mejorar la textura, aumentar la retención de humedad y proteger el almidón de la sinéresis (Bemiller, 2011). Los argumentos anteriores pueden explicar por qué las interacciones pectina-almidón y xantana-almidón tienen una magnitud mayor que la existente entre pectina-xantana.

Para las variables sensoriales se encontró que todos los hidrocoloides y sus diferentes interacciones presentaron una influencia positiva. En el caso de la viscosidad y gomosidad sensoriales la de mayor influencia positiva es la interacción pectina-xantana. La cremosidad sensorial se ve influenciada de mayor manera positiva por la goma xantana sola, sin embargo el orden de magnitud es similar al de la pectina, y las interacciones pectina-xantana y xantana-almidón.

La magnitud de las interacciones pectina-almidón y xantana-almidón que se pueden observar en la **Tabla 15** indica que existe una sinergia entre la goma xantana, la pectina y el almidón. Empleando la ecuación representada en la **Tabla 15** se pudo concluir que la

goma xantana tiene una alta influencia positiva en las variables evaluadas (magnitud de los factores que acompañan a la goma), bien sea el componente lineal o el cuadrático (interacción con otro hidrocoloide).

3.3. Análisis multivariado

Los análisis reológicos, instrumental-esparcibilidad y sensoriales permitieron entender a profundidad el comportamiento de todas las mezclas propuestas. Estos resultados fueron empleados para generar una gran base de datos para poder realizar el análisis multivariado. Se realizó un análisis de conglomerados por variables (dendograma) para entender la similitud y agrupación entre las mismas. Posteriormente, los datos experimentales fueron analizados empleando el análisis por componentes principales (PCA) el cual es reconocido por disponer y analizar datos multivariados proyectándolos en espacios reducidos definidos por los dos primeros componentes principales. En este análisis se obtuvieron cuatro grupos de observaciones de acuerdo a los resultados. Se pudo concluir que es posible simular la textura del yogur y la sopa instantánea con las mezclas de hidrocoloides evaluadas.

3.3.1. Dendograma

En la **Figura 14 a** se presenta el dendograma por variables, del cual se obtienen siete clústeres. Se seleccionó este análisis para observar la relación entre variables objetivas y subjetivas. Estos siete clústeres a su vez se agrupan en tres clústeres principales. El clúster número tres está compuesto por la constante n de este resultado se puede concluir principalmente que n tiene un comportamiento diferente comparado con las otras constantes. n es la constante que menor influencia presenta en el comportamiento de las mezclas y la de menor correlación con las otras variables de análisis, de acuerdo al dendograma resultante del análisis multivariado.

Las variables sensoriales están altamente relacionadas con las constantes reológicas K y z (clúster 3). K tiene una relación directa con la consistencia de los fluidos, es esta la razón de que la alta relación con la viscosidad sensorial y la cremosidad.

Dentro de las 3 variables sensoriales, la cremosidad sensorial (clúster 5) es una variable alejada de la viscosidad y la gomosidad, las cuales componen el clúster 7.

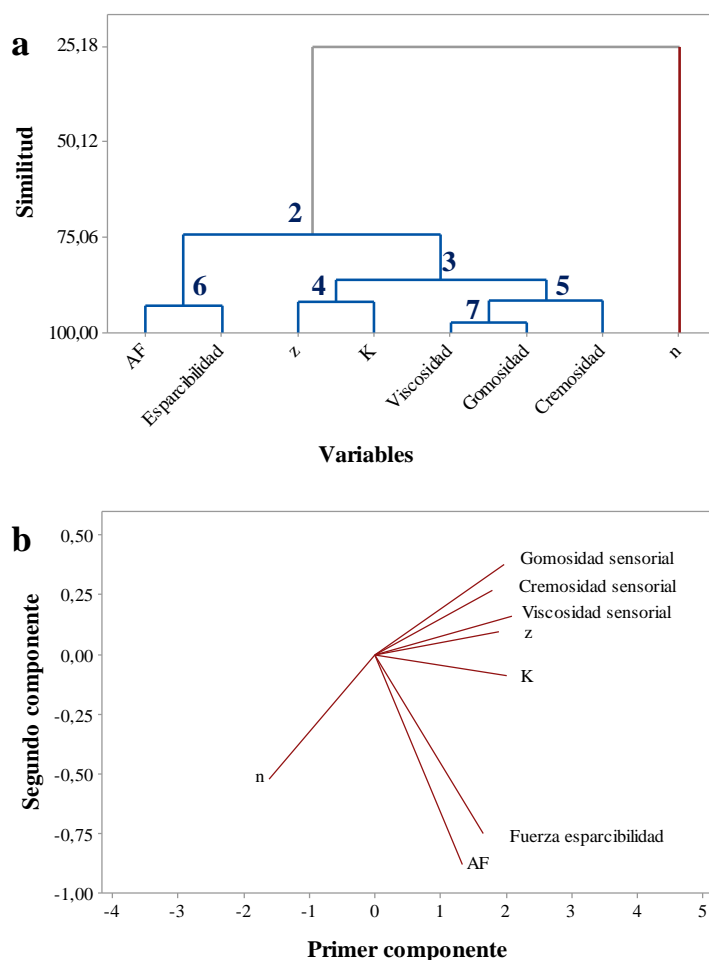


Figura 14. (a) Agrupación de las variables evaluadas por nivel de similitud. (b) Doble proyección de las variables en el espacio de los primeros dos componentes.

La similitud entre A_F y la fuerza de esparcibilidad es del 92% (clúster 6). Basándose en la definición de la constante A_F , la cual está relacionada con la fuerza de las interacciones de los hidrocoloides, se puede explicar la alta relación con la fuerza de esparcibilidad, ya que entre mayor sea la magnitud de A_F más fuerza es requerida para esparcir la mezcla.

Al hacer el análisis vectorial completo en el espacio de los dos primeros componentes (**Figura 14 b**) se observa que existen tres grupos de variables las cuales coinciden con la agrupación del dendograma (**Figura 14 a**). Adicionalmente se demuestra que la influencia de n es netamente evidenciada en el segundo componente por la dirección del vector. Esta baja similitud con las demás variables explica la separación evidenciada en el dendograma. En el primer componente la influencia es alta por parte de las variables sensoriales, K y z .

La constante A_F y la fuerza de esparcibilidad tienen impacto en los dos componentes. De acuerdo a lo descrito, A_F y la fuerza de esparcibilidad tienen un alto impacto en la descripción del comportamiento general de las mezclas de hidrocoloides.

3.3.2. PCA

Del análisis PCA se obtuvieron ocho componentes principales. Los dos primeros componentes explican el 84% del total de la varianza de los datos.

En la **Tabla 16** se puede observar que en el primer componente principal todas las variables presentan una contribución positiva de aproximadamente la misma magnitud, a diferencia de n el cual tiene una contribución negativa. En el segundo componente principal la mayor contribución, aunque negativa, la tienen las constantes A_F y la fuerza de esparcibilidad lo cual implica que son las variables que más afectan el segundo componente principal. Al sumar el impacto de las variables en los dos primeros componentes se puede corroborar la conclusión realizada previamente. A_F y fuerza de esparcibilidad son las variables con más impacto en la descripción de los comportamientos de la mezcla.

En la **Figura 15** se puede ver la disposición de los ensayos de mezcla y de los productos del mercado en el espacio bidimensional. De esta figura se puede concluir que es posible simular la textura de la sopa instantánea y el yogur. También se puede concluir que no es posible simular la textura de los productos mermelada de mora, mayonesa y salsa de tomate con las mezclas planteadas, ya que se encuentran alejados en el análisis PCA. Adicional se muestran como los objetos de estudio están divididos en 4 subgrupos (círculos rojos).

Tabla 16. Contribución de cada variable a cada componente principal

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
A_F	0,257	-0,655	0,091	0,340	-0,258	0,061	-0,528	-0,178
z	0,369	0,118	-0,410	-0,410	-0,668	0,234	-0,081	-0,083
K	0,405	-0,008	-0,274	-0,115	0,187	-0,826	-0,043	-0,17
n	-0,301	-0,424	0,432	-0,680	-0,147	-0,217	0,084	-0,064
Fuerza Esparcibilidad	0,315	-0,546	-0,219	-0,052	0,321	0,200	0,482	0,420
Viscosidad Sensorial	0,406	0,082	0,277	-0,176	0,393	0,350	0,102	-0,658
Creмосidad Sensorial	0,357	0,131	0,593	0,326	-0,379	-0,204	0,441	0,133
Gomosidad Sensorial	0,389	0,237	0,291	-0,317	0,173	0,090	-0,518	0,548

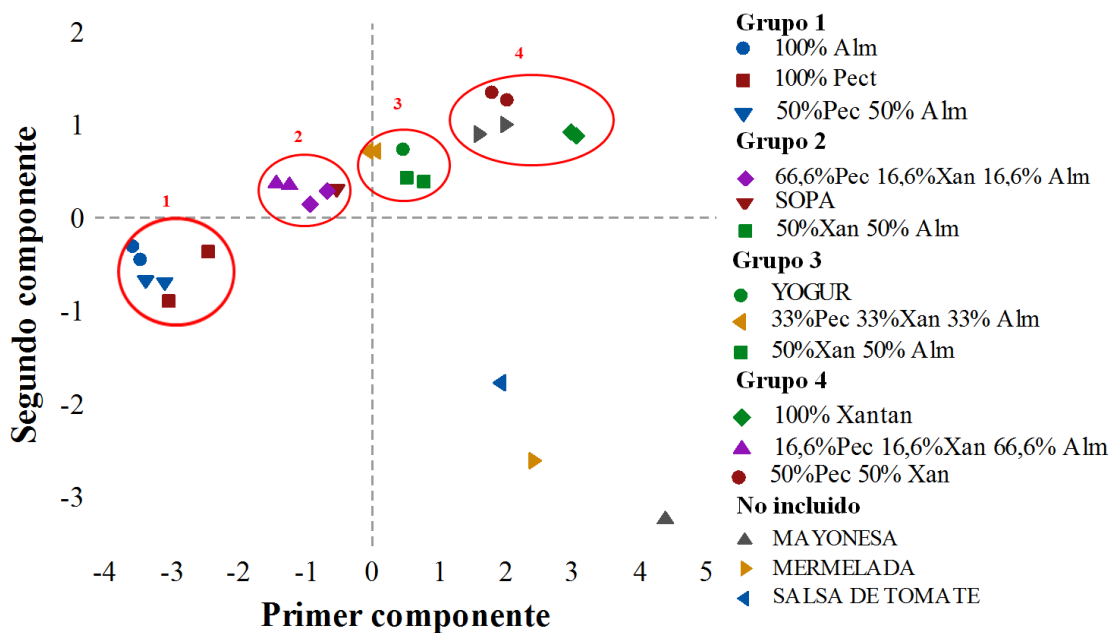


Figura 15. Proyección de los objetos de estudio en los dos primeros componentes. Subgrupos obtenidos en el análisis PCA.

3.4. Optimización de respuesta

Luego de obtenidos y validados los modelos del diseño de mezcla, de haber realizado el análisis multivariado y concluir que se pueden simular las texturas de la sopa instantánea y el yogur se realizó una optimización de respuesta a objetivo (búsqueda de los mismos valores referencia) con el mismo nivel de importancia para todas las variables.

De este proceso se obtuvieron dos mezclas con dos diferentes niveles de deseabilidad compuesta para cada producto (**Tabla 17**). De las diferentes optimizaciones realizadas para los productos, las mezclas con mayor acercamiento a los valores objetivos fueron 11,11% pectina + 26,91% xantana + 61,97% almidón para la sopa y 31,31% pectina + 28,74% xantana + 39,94% almidón para el yogur. Las dos mezclas obtenidas para simular las texturas de los productos tienen valores similares a los obtenidos directamente de los productos. Las variables evaluadas, a excepción de A_F y z , son representadas correctamente con las mezclas obtenidas.

Tabla 17. Resultados de optimización de respuesta para la sopa y el yogur.

Variable	Sopa			Yogur		
	Objetivo	Mezcla		Objetivo	Mezcla	
		1*	2**		1***	2****
A_F	140	25,00	27,53	109,00	59,23	39,45
z	4,11	1,73	1,80	3,51	2,93	2,39
K	12,57	12,65	9,84	11,53	21,95	14,97
n	0,19	0,21	0,31	0,16	0,15	0,21
Fuerza de esparcibilidad	14,69	15,26	13,17	22,06	38,36	22,08
Viscosidad sensorial	2,66	3,00	3,19	3,44	3,57	3,43
Cremosidad sensorial	3,45	3,02	3,28	4,35	3,33	3,32
Gomosidad sensorial	1,94	2,41	2,68	2,74	3,03	2,79
Deseabilidad compuesta		0,777	0,757		0,449	0,684

*11,11% pectina + 26,91% xantana + 61,97% almidón.

**66,55% pectina + 16,60% xantana + 16,84% almidón.

***45,77% xantana + 54,22% almidón.

****31,31% pectina + 28,74% xantana + 39,94% almidón.

Tabla 18. Resultados de optimización de respuesta para la sopa y el yogur con mayor importancia en constantes A_F y z .

Variable	Sopa			Yogur		
	Objetivo	Importancia		Objetivo	Importancia	
		A_F^*	z^{**}		A_F^{***}	z^{****}
A_F	140	56,08	-	109,00	54,72	-
z	4,11	-	2,28	3,51	-	3,19
K	12,57	24,39	23,74	11,53	24,25	23,69
n	0,19	0,18	0,16	0,16	0,15	0,14
Fuerza de esparcibilidad	14,69	37,41	35,65	22,06	36,87	38,86
Viscosidad sensorial	2,66	3,50	3,83	3,44	3,46	3,73
Cremosidad sensorial	3,45	3,29	3,49	4,35	3,27	3,43
Gomosidad sensorial	1,94	2,97	3,26	2,74	2,93	3,19
Deseabilidad compuesta		0,511	0,661		0,611	0,384

*43,43% xantana + 56,57% almidón.

** 9,98% pectina + 47,04% xantana + 42,98% almidón.

*** 42,42% xantana + 57,58% almidón.

**** 3,03% pectina + 48,48% xantana + 48,48% almidón.

Las constantes A_F y z son sinónimo de estabilidad como se ha mencionado previamente. En las optimizaciones resultantes que se observan en la **Tabla 17** estas dos variables no son representadas correctamente y tienen valores muy inferiores a los objetivo. Por esta razón se realizaron optimizaciones en donde se le dio el nivel de importancia más alto a las constantes A_F y z por separado, esto para los dos productos. Con el nuevo enfoque de la optimización se obtuvieron valores más altos para A_F y z más altos. Sin embargo las demás variables se alejaron del objetivo (**Tabla 18**). Las deseabilidades compuestas disminuyeron en todos los casos a excepción de la optimización del yogur cuando se le dio mayor importancia a la constante A_F .

Teniendo en cuenta los resultados de las **Tablas 17 y 18** las mezclas que mejor simulan los productos son 11,11% pectina + 26,91% xantana + 61,97% almidón para la sopa y 31,31% pectina + 28,74% xantana + 39,94% almidón para el yogur.

Los resultados obtenidos en las diferentes optimizaciones muestran que existen combinaciones ternarias entre los hidrocoloides evaluados que pueden simular las texturas de la sopa instantánea y el yogur. Estas mezclas pueden proporcionar las características reológicas de flujo (K y n), así como las de textura sensorial e instrumental - esparcibilidad, sin contenido alguno de grasa o azúcar. Este resultado permite tener una base sólida para obtener reducciones de calorías en los productos evaluados sin perder las características de textura conocidas para los mismos.

En el caso del yogur se podría reemplazar la textura dada por el azúcar y grasa en una formulación normal. Sería posible obtener una bebida láctea fermentada de bajo contenido en grasa y cero azúcar. Si se adicionara algún contenido de azúcar al sistema se debe tener en cuenta que para mezclas que contienen almidón y goma xantana, como las evaluadas, al adicionar azúcar la viscosidad aumenta, cambiando el desempeño de los hidrocoloides. Este aumento se debería a que se generan ambientes localizados de aumento de viscosidad por capas de hidratación que produce el azúcar sobre el almidón (Chantaro & Pongsawatmanit, 2010). De ser necesaria la adición de azúcar se debería disminuir el porcentaje de la mezcla hidrocoloide para no aumentar así la sensación de viscosidad del producto final.

En el caso de la sopa instantánea se podría emplear una de las mezclas analizadas para hacer una sustitución de los 10 g de almidón de maíz y demás modificadores reológicos por porción contenidos de acuerdo a la tabla nutricional y la lista de ingredientes. Ravindran & Matia-Merino (2009) realizaron una sustitución parcial del almidón de maíz en sopas instantáneas. Los autores lograron un reemplazo del 18% de almidón de maíz (el cual se encontraba en un 5% p/p en base seca) por semilla de fenogreco, obteniendo calificaciones similares de cremosidad sensorial al patrón. En esta ocasión estaríamos obteniendo un reemplazo del 38% de reemplazo de almidón de maíz (el cual se encuentra al 60% p/p en base seca en el producto) por hidrocoloides no calóricos, ya que el porcentaje restante de peso lo estamos obteniendo de almidón de yuca.

Se debe enfatizar que las mezclas de hidrocoloides están planteadas como simulador de textura, siendo este el primer paso de una metodología para reformular productos. El ajuste de textura se considera como uno de los pasos más importantes a realizar en una

reformulación(Saha & Bhattacharya, 2010) teniendo como premisa que la textura tiene influencia en varios aspectos importantes, uno de ellos es la liberación de los sabores, la cual afecta la percepción de los mismos por el consumidor. De acuerdo a la experiencia en la industria y a casos de éxito propios esta transición es posible con resultados exitosos.

3.5. Verificación de la optimización

A las dos mezclas obtenidas del proceso de optimización de respuesta (11,11% pectina + 26,91% xantana + 61,97% almidón para la sopa y 31,31% pectina + 28,74% xantana + 39,94% almidón para el yogur) se les realizaron los análisis reológicos, instrumental y sensoriales. En la **Tabla 19** se comparan los resultados obtenidos de la validación de las mezclas optimizadas con los de los productos del mercado. Al comparar se observa que: **1)** En cuanto constantes reológicas el número n no presentó diferencias estadísticas para ambos productos. El número z no presentó diferencias en la validación de sopa, pero por el contrario si las presentó en el yogur. Tanto la constante A_F como la K presentaron diferencias significativas en ambos productos. Sin embargo los valores de K obtenidos difieren muy poco (1,1 veces) de los valores objetivo. **2)** No existen diferencias estadísticas para la fuerza de esparcibilidad. **3)** No existen diferencias estadísticas para casi todos los resultados sensoriales. La única diferencia se presentó en la cremosidad sensorial de la mezcla que simula el yogur la cual se presentó un valor un poco inferior (1,2 veces menor).

Los resultados obtenidos demuestran que aunque existen diferencias en algunas variables de respuesta, las mezclas simulan la textura, en gran parte de las variables planteadas como superficie de estudio, tanto reológica (sin incluir la variable A_F), instrumental como sensorialmente.

Tabla 19. Resultados de la validación de las mezclas optimizadas para la sopa y el yogur.

Variable	Sopa		Yogur	
	Objetivo	Experimental	Objetivo	Experimental
A_F	140,00 ^a	20,12 ^d	109,00 ^b	28,44 ^c
z	4,11 ^b	4,42 ^b	3,51 ^d	5,46 ^a
K	12,57 ^a	11,67 ^c	11,53 ^c	12,25 ^b
n	0,19 ^a	0,22 ^a	0,16 ^b	0,15 ^b
Fuerza de Esparcibilidad	14,69 ^b	14,99 ^b	22,06 ^a	23,32 ^a
Viscosidad sensorial	2,66 ^b	3,06 ^b	3,44 ^a	3,69 ^a
Cremosidad sensorial	3,45 ^c	3,38 ^c	4,35 ^a	3,53 ^b
Gomosidad Sensorial	1,94 ^b	2,25 ^b	2,74 ^a	2,50 ^a

^{a-b} Valores con diferentes superíndices dentro de una misma fila son significativamente diferentes según ANOVA-prueba de Tukey.

4. Conclusiones y Recomendaciones

- Fue posible simular la textura de la sopa instantánea y el yogur obteniendo una reducción calórica del 38% aproximadamente para la sopa y del 62% para el yogur.
- Se estableció que es necesario la unión de las tres variables de medición, reología, esparcibilidad y sensorial para diferenciar muy bien los productos y caracterizar fluidos como los productos del mercado o las mezclas de hidrocoloides evaluados en este trabajo.
- Cuando se utilizó goma xantana como parte de la formulación, se obtuvo productos con características similares a productos del mercado por lo que se identifica este ingrediente como el de mayor potencial para este tipo de formulaciones reducidas en calorías. A mayor cantidad de goma xantana los geles son más fuertes. Existe una interacción cooperativa de la goma xantana con la pectina. La presencia de almidón de yuca tiene una influencia muy baja en cuanto a la fuerza de gel.
- El análisis multivariado permitió concluir que el índice de flujo (n) como variable de medición tiene un comportamiento diferente comparado con las otras constantes. Así como que los dos primeros componentes del PCA explican el 84% del total de la varianza de los datos.
- Se obtuvieron dos mezclas mediante el método de optimización de respuesta. 11,11% pectina + 26,91% xantana + 61,97% almidón para la sopa y 31,31% pectina + 28,74% xantana + 39,94% almidón para el yogur las cuales fueron validadas y no presentaron diferencias estadísticas con los valores de los productos para la fuerza de esparcibilidad y las variables sensoriales. n no presentó diferencias significativas, las demás variables reológicas tuvieron valores muy cercanos a los esperados a excepción de la constante A_F .

4.1. Recomendaciones

- Para poder simular la textura de los demás productos del mercado caracterizados se sugiere realizar un entendimiento con un mayor porcentaje de hidrocoloides en la mezcla final para poder así obtener las características deseadas.
- Validar un mayor porcentaje de hidrocoloides en la mezcla final para poder así obtener las características deseadas.
- Emplear la misma metodología experimental con diferentes hidrocoloides para generar una matriz de referencia de comportamientos de textura.

Anexo A. Formato evaluación sensorial.

Nombre: _____

Fecha: _____

Frente a usted encontrará 5 muestras, por favor califique cada uno de los 3 aspectos de textura. Recuerde neutralizar la boca entre cada muestra con agua y galletas de soda.

Calificación Viscosidad

Para la calificación de las muestras por favor tenga en cuenta la siguiente escala

CÓDIGO	Escala de Viscosidad					
	0= Agua	1= Crema ligera	2= Crema espesa	3= jarabe de maple	4= mayonesa/ crema	5= Leche condensada
	0	1	2	3	4	5
432						
351						
876						
258						
706						

Calificación Cremosidad

Para la calificación de las muestras por favor tenga en cuenta la siguiente escala

	Escala Cremosidad					
	0= Agua	1= Agua/Leche	2= Leche	3= 75% Leche 25% Crema de leche	4= 50% Leche 50% Crema de leche	5= Crema de leche
	0	1	2	3	4	5
432						
351						
876						
258						
706						

Calificación gomosidad

	Escala Gomosidad					
	0= Agua	1= Pasta de harina 40%	2= Pasta de harina 45%	3= Pasta de harina 50%	4: Pasta de harina 55%	5: Pasta de harina 60%
	0	1	2	3	4	5
432						
351						
876						
258						
706						

Anexo B. Ajustes a modelos lineal y cúbico.

Tabla B-1. Ecuaciones y significancias obtenidas para el modelo lineal obtenido mediante análisis del diseño estadístico de mezclas para las variables reológicas, de textura sensorial e instrumental-esparcibilidad.

Variable	Ecuación	R ² (%)		
		Global*	Predictivo**	Ajustado***
A_F	8,84 P + 135,073 X - 1,71 A	76,29	75,19	75,85
z	0,57 P + 8,46 X + 1,04 A	85,97	80,65	84,32
K	1,20 P + 53,82 X - 2,61 A	84,78	82,79	84,17
n	0,44 P + 0,01 X + 0,27 A	78,44	67,96	75,90
Esparcibilidad	0,21 P + 54,61 X + 6,62 A	81,76	76,87	79,61
Viscosidad	2,80 P + 5,16 X + 1,53 A	75,55	62,50	72,67
Creemosidad	3,16 P + 4,17 X + 2,14 A	75,04	61,08	72,11
Gomosidad	2,42 P + 4,79 X + 0,97 A	83,36	75,36	81,40

Tabla B-2. Ecuaciones y significancias obtenidas para el modelo cúbico obtenido mediante análisis del diseño estadístico de mezclas para las variables reológicas, de textura sensorial e instrumental-esparcibilidad.

Variable	Ecuación	R ² (%)		
		Global*	Predictivo**	Ajustado***
A_F	9,10 P + 136,1 X - 0,30 A + 20,6 PX + 16,7 PA + 10,3 XA - 411,4 PXA	87,29	85,17	86,04
z	0,56 P + 8,44 X + 1,03 A - 0,94PX + 1,88 PA - 5,68 XA - 6,41 PXA	89,59	81,42	84,79
K	-0,90P + 50,90 X - 0,90 A + 38,10 PX - 4,3 PA + 3,2 XA - 123,2	91,02	87,42	90,64
n	0,50 P + 0,09 X + 0,26 A - 0,71 PX + 0,12 PA - 0,10 XA - 0,66 PXA	95,57	89,40	93,99
Esparcibilidad	9,90 P + 54,30 X + 6,30 A - 32,60 PX + 7,30 PA + 50,20 XA - 156,8 PXA	89,23	80,54	84,26
Viscosidad	2,24 P + 4,17 X + 1,16 A + 5,62 PX + 0,05 PA + 3,89 XA + 6,44 PXA	96,35	92,48	94,66
Creemosidad	2,85 P + 3,62 X + 1,86 A + 2,87 PX + 0,47 PA + 2,63 XA + 1,75 PXA	95,56	88,31	93,51
Gomosidad	2,11 P + 4,06 X + 0,78 A + 3,85 PX - 0,97 PA + 2,79 XA + 5,79 PXA	94,15	87,24	91,45

Anexo C. Validación de los modelos obtenidos para las variables medidas

Se realizaron análisis de varianza para validar la dependencia de las variables de respuesta de los hidrocoloides. Se realizó el análisis de varianza para los ajustes a los modelos obtenidos para todas las medidas realizadas (sección 3.2.5.). Los resultados del análisis de varianza se presentan en la **Tabla C-1**.

Tabla C-1. Valores p para los análisis de varianza a los modelos de las variables reológicas analizadas.

Fuente	Valores p							
	z	A_F	K	n	Esparcibilidad	Viscosidad	Cremosidad	Gomosidad
Regresión	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Lineal*	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cuadráticos **	0,238	0,949	0,113	0,000	0,091	0,000	0,000	0,002
PX	0,655	0,878	0,027	0,000	0,063	0,000	0,000	0,002
PA	0,621	0,878	0,352	0,522	0,909	0,611	0,278	0,578
XA	0,057	0,627	0,725	0,357	0,073	0,000	0,000	0,011

*Influencia individual de los hidrocoloides.

**Influencia de las interacciones entre hidrocoloides.

z y A_F constantes weak gel. K = Índice de consistencia. n = Índice de flujo. PX = Pectina-Xantana. PA = Pectina-Almidón. XA = Xantana- Almidón.

Los resultados del valor p de estos análisis son mostrados en la **Tabla C-1**. De esta tabla se puede concluir que todas las variables se ven influenciadas de manera significativa por la parte lineal del modelo cuadrático ($p < 0,05$). Sin embargo, la constante A_F no se vio influenciada por las interacciones entre los factores ni por la relación cuadrática. La constante K fue influenciada de manera significativa por el factor lineal y la interacción entre pectina y goma xantana. La constante n fue influenciada de manera significativa por la relación cuadrática y la interacción entre la pectina y la goma xantana. Adicionalmente n pudo ser modificado con la cantidad de xantana y almidón en la mezcla. Además, la constante z fue modificada con las cantidades de la pectina y xantana en las mezclas.

De la misma tabla se puede concluir que la esparcibilidad fue influenciada de manera significativa por los componentes lineales del modelo cuadrático ($p < 0,05$). Las interacciones entre los hidrocoloides no influyeron significativamente en la esparcibilidad.

Las tres variables sensoriales evaluadas fueron influenciadas de manera significativa por los componentes lineales del modelo cuadrático ($p < 0,05$), las relaciones cuadráticas y las interacciones pectina-xantana y almidón-xantana. La interacción pectina-almidón fue la única que no influyó en las variables sensoriales de manera significativa.

- **Análisis comportamiento de residuos**

Para las variables tanto instrumentales como sensoriales se les realizó un análisis gráfico del comportamiento de los residuos para comprobar estadísticamente la validez de los modelos obtenidos. De las subfiguras evaluadas y las distribuciones de los residuos en cada una de ellas se pudo concluir que los modelos seleccionados para los análisis fueron correctos al cumplir con las tres hipótesis propuestas: la distribución normal de los residuales, la independencia entre las observaciones y la homogeneidad de los residuales. Por esta razón las conclusiones a realizar sobre los modelos fueron confiables.

Las pruebas de normalidad y homogeneidad que se pueden observar en las **Figura A-1**. En esta figura se encuentran 4 subfiguras para cada variable de medición. En todas las subfiguras **I** (Gráfica de probabilidad normal) se observa que los residuos se encuentran distribuidos aleatoriamente alrededor de la recta.

En las subfiguras **II** (residuo vs ajuste) se puede observar que los residuos se distribuyen aleatoriamente a ambos lados de la línea central por lo cual se puede concluir que la varianza es constante siendo homogéneos. En las subfiguras **III** (Histogramas) se observa que los datos son asimétricos pero no presentan datos anómalos. En las subfiguras **IV** (residuo versus orden de observación) se puede ver que no existe ninguna tendencia relacionada con el orden de observación, aumentos o disminuciones pronunciadas de los residuos. Por esto se puede concluir que los residuos no están correlacionados entre ellos y por lo tanto las observaciones son independientes.

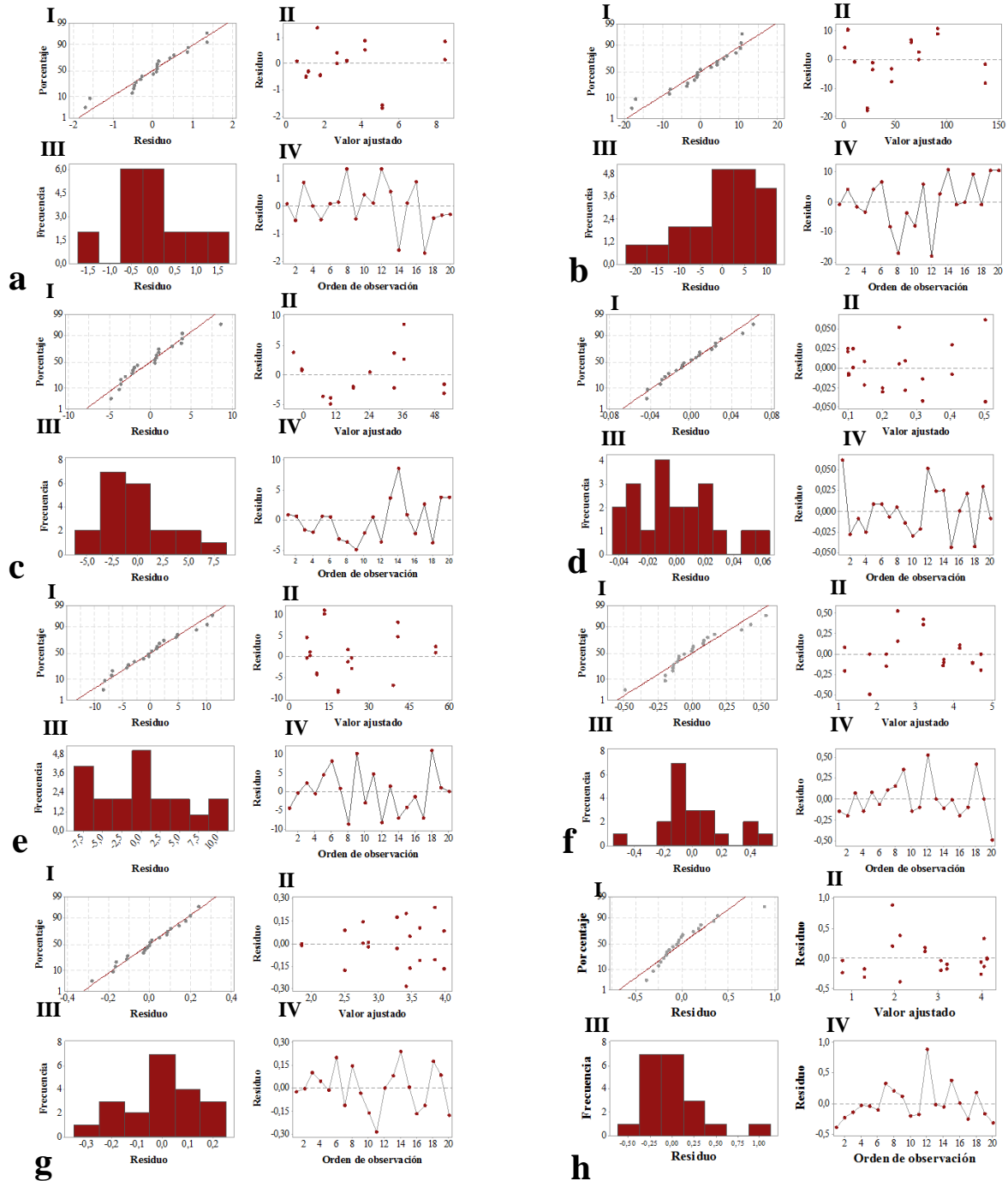


Figura 16 Prueba de normalidad y homogeneidad de residuales realizada para: (a) Constante z . (b) Constante A_F . (c) Constante índice de consistencia, K . (d) Constante índice de flujo, n . (e) Fuerza esparcibilidad. (f) Viscosidad sensorial. (g) Cremosidad sensorial. (h) Gomosidad sensorial. I: Grafica de probabilidad normal. II: Gráfica de residuo vs ajuste. III: Histograma de residuos. IV: Gráfica de residuo versus orden de observación.

5. Bibliografía

- Abedi, F., Sani, A. M., & Karazhiyan, H. (2012). Effect of some hydrocolloids blend on viscosity and sensory properties of raspberry juice-milk. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 1–5.
- Aehlert, U., & Pigman, W. W. (2012). *Chemistry of The Carbohydrates*. Elsevier Science.
- Agudelo, A., Varela, P., Sanz, T., & Fiszman, S. M. (2014). Native tapioca starch as a potential thickener for fruit fillings. Evaluation of mixed models containing low-methoxyl pectin. *Food Hydrocolloids*, 35, 297–304.
- Alvarez-Lorenzo, C., Duro, R., Gómez-Amoza, J. L., Martínez-Pacheco, R., Souto, C., & Concheiro, A. (2001). Influence of polymer structure on the rheological behavior of hydroxypropyl-methylcellulose ± sodium carboxymethyl-cellulose dispersions. *Colloid and Polymer Science*, 1057, 1045–1057.
- Azira, T. N., Man, Y. B. C., Mohd, R. N. R., Aina, M. A., & Amin, I. (2014). Use of principal component analysis for differentiation of gelatine sources based on polypeptide molecular weights. *Food Chemistry*, 151, 286–292.
- Balaghi, S., Mohammadifar, M. A., Zargaraan, A., Gavlighi, H. A., & Mohammadi, M. (2011). Compositional analysis and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of Iranian Astragalus. *Food Hydrocolloids*, 25, 1775–1784.
- Baldino, N., Gabriele, D., & Migliori, M. (2010). The influence of formulation and cooling rate on the rheological properties of chocolate. *European Food Research and Technology*, 231(6), 821–828.
- Ballabio, D., Consonni, V., & Costa, F. (2012). Relationships between apple texture and rheological parameters by means of multivariate analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 111(1), 28–33.
- Barreto R, F. M., Ortiz Q, B. L., & Restrepo S, L. P. (2012). Estudio de los efectos de la pectina sobre el metabolismo de lípidos y glucosa (Ensayo In Vitro). *Vitae*, 19, s306–s308.
- Batt, C. A., & Robinson, R. K. (2014). Production of Xanthan Gum. In *Encyclopedia of Food Microbiology* (pp. 817–819). Elsevier Science.
- Belitz, H. D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009). Food Additives. In *Food Chemistry* (p. 331). Springer Berlin Heidelberg.
- Bello-Lara, J. E., Balois-Morales, R., Sumaya-Martínez, M. T., Juárez-López, P., Inés, A., Sánchez-Herrera, L. M., & Jiménez-Ruiz, E. I. (2014). Extracción y caracterización reológica de almidón y pectina en frutos de plátano “Pera” (Musa ABB). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8, 1501–1507.
- BeMiller, J.N and Whistler, R. . (1960). Chapter 10. Pectin. In *Industrial Gums. Polysaccharides and Their Derivatives* (Third, Vol. 185, pp. 414–414).
- Bemiller, J. N. (2011). Pasting, paste, and gel properties of starch-hydrocolloid combinations. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), 386–423.
- BeMiller, J. N., & Whistler, R. L. (2009). Chap.5: Structural Features of Starch Granules I-Chap. 12:Tapioca/Cassava Starch: Production and Use. In *Starch: Chemistry and Technology* (pp. 176–178, 541–564). Elsevier Science.
- Ben Jeddou, K., Bouaziz, F., Zouari-Ellouzi, S., Chaari, F., Ellouz-Chaabouni, S., Ellouz-Ghorbel, R., & Nouri-Ellouz, O. (2017). Improvement of texture and sensory properties of cakes by addition of potato peel powder with high level of dietary fiber and protein. *Food Chemistry*, 217, 668–

677.

- Bhattacharyya, L., & Rohre, J. (2012). Appendix 2. Dissociation constants (pKa) of common sugars and alcohols. In *Applications of Ion Chromatography for Pharmaceutical and Biological Products* (pp. 455–456). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Braun, D. B., & Rosen, M. R. (1999). Rheology Modifiers. In *Rheology Modifiers Handbook* (pp. 2–3). Elsevier.
- Broze, G. (2011). Rheological Modifiers for Aqueous Solutions. In *Handbook of Detergents: Properties* (p. 757). Taylor & Francis.
- Bülichen, D., Kainz, J., & Plank, J. (2012). Working mechanism of methyl hydroxyethyl cellulose (MHEC) as water retention agent. *Cement and Concrete Research*, *42*(7), 953–959.
- Casas, J. A., Mohedano, A. F., & García-Ochoa, F. (2000). Viscosity of guar gum and xanthan/guar gum mixture solutions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *80*(12), 1722–1727.
- Chaisawang, M., & Suphantharika, M. (2005). Effects of guar gum and xanthan gum additions on physical and rheological properties of cationic tapioca starch. *Carbohydrate Polymers*, *61*, 288–295.
- Chaisawang, M., & Suphantharika, M. (2006). Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, *20*, 641–649. <http://doi.org/3>
- Chantaro, P., & Pongsawatmanit, R. (2010). Influence of sucrose on thermal and pasting properties of tapioca starch and xanthan gum mixtures. *Journal of Food Engineering*, *98*, 44–50.
- Chen, C. R., & Ramaswamy, H. S. (1999). Rheology of tapioca starch. *Food Research International*, *32*(5), 319–325.
- Commission of European Communities. (2002). *DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 95/2/EC on food additives other than colours and sweeteners*.
- De Godoy, F., Bermúdez, L., Lira, B. S., De Souza, A. P., Elbl, P., Demarco, D., ... Rossi, M. (2013). Galacturonosyltransferase 4 silencing alters pectin composition and carbon partitioning in tomato. *Journal of Experimental Botany. Oxford Journals.*, *64*(8), 2449–2466.
- Dergal, S. B. (2006). Polisacáridos. In *Química de los alimentos*. México D.F: Pearson Educación.
- Edwards, W. P. (2000). Chapter 3 Ingredients. In *The Science of Sugar Confectionery* (p. 51). Royal Society of Chemistry.
- Eriksson, L. (2008). Mixture design. In *Design of Experiments: Principles and Applications* (p. 231). Umetrics Academy.
- Espinal-Ruiz, M., Parada-Alfonso, F., Restrepo-Sánchez, Luz Patricia. Narváez-Cuenca, C. E., & McClements, D. J. (2014). Impact of dietary fibers [methyl cellulose, chitosan, and pectin] on digestion of lipids under simulated gastrointestinal conditions. *Food & Function*, *4*, 3083–3095.
- Espinal-Ruiz, M., Parada-Alfonso, F., Restrepo-Sánchez, L. P., & Narváez-Cuenca, C. E. (2014). Inhibition of digestive enzyme activities by pectic polysaccharides in model solutions. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, *4*(1), 27–38. <http://doi.org/10.1016/j.bcdf.2014.06.003>
- Espinal-Ruiz, M., Restrepo-Sánchez, L.-P., Narváez-Cuenca, C.-E., & McClements, D. J. (2016). Impact of pectin properties on lipid digestion under simulated gastrointestinal conditions: Comparison of citrus and banana passion fruit (*Passiflora tripartita* var. *mollissima*) pectins. *Food Hydrocolloids*, *52*, 329–342. <http://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.05.042>
- Fennema, O. R. (1996). Carbohydrates. In *Food Chemistry* (3rd ed., p. 211). Taylor & Francis.

- Ferry, J. R. (1980). *Viscoelastic properties of polymers* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Friberg, S., Larsson, K., & Sjoblom, J. (2003). Food Emulsions: Their Chemical and Physical Properties. In *Food Emulsions* (p. 45). Taylor & Francis.
- Gabriele, D., De Cindio, B., & D'Antona, P. (2001). A weak gel model for foods. *Rheologica Acta*, 40(2), 120–127.
- García-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: Production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 18(7), 549–579.
- Garibay, M. G., Ramírez, R. Q., & Canales, A. L. M. (1993). Biopolímeros. In *Biotecnología alimentaria* (pp. 423–432). Limusa.
- Goldberg, I., & Williams, R. (1991). Chapter 9 Biogums Used in Food and Made by Fermentation. In *Biotechnology and Food Ingredients* (pp. 235–237). Springer.
- Gómez-Díaz, D., Navaza, J. M., & Quintáns-Riveiro, L. C. (2008). Influence of mixing and temperature on the rheological properties of carboxymethyl cellulose/ κ -carrageenan mixtures. *European Food Research and Technology*, 227(5), 1397–1402.
- Gomis, A. M. (2012). Estructura y Propiedades de los polímeros. In *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades* (p. 35). Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones.
- Guest, S., Mcglone, F., Hopkinson, A., Schendel, Z. a, Blot, K., & Essick, G. (2013). Perceptual and Sensory-Functional Consequences of Skin Care Products. *Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications*, 2013(January), 66–78.
- Gutiérrez, J. B. (2000a). Capítulo 10. Propiedades tecnológicas de los alimentos. In *Ciencia bromatológica: principios generales de los alimentos* (p. 214). Díaz de Santos.
- Gutiérrez, J. B. (2000b). Estudio bromatológico de los carbohidratos. In *Ciencia bromatológica: principios generales de los alimentos* (p. 93). Díaz de Santos.
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). Diseño de experimentos con mezclas. In *Análisis y diseño de experimentos* (2nd Editio, p. 480). México: Mc Graw Hill.
- Hall, I. S. (1998). Quantitative measurement of food spreadability using the vane method. *Journal of Texture Studies*, 29, 427–435.
- Hernandez Gil, A. (2010). Fibra dietética. In *Tratado de Nutrición: Bases Fisiológicas y bioquímicas de la nutrición, Volumen 1* (p. 251). Ed. Médica Panamericana.
- Huang, P. M., Li, Y., & Sumner, M. E. (2011). Soils Physics. In *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes, Second Edition* (pp. 3–9). Taylor & Francis.
- Hui, Y. H., Barta, J., Cano, P., Gusek, T. W., Sidhu, J. S., & Sinha, N. (2008). Food Additives in Fruit Processing. In *Handbook of Fruits and Fruit Processing* (p. 164). Wiley.
- ICONTEC. (1998). NTC 4489. Análisis Sensorial. Metodología. Perfil de Textura. ICONTEC.
- Kjellin, M., & Johansson, I. (2010). *Surfactants from Renewable Resources. Surfactants from Renewable Resources*.
- Klemelä, J. (2009). Cluster Analysis. In *Smoothing of Multivariate Data: Density Estimation and Visualization* (pp. 199–200). Wiley.
- Koleske, J. V. (1995). Thickeners and Rheology Modifiers. In *Paint and Coating Testing Manual* (14th Ed., p. 269).
- Kreith, F. (1999). Dimesional Analysis and Data. In *Fluid Mechanics* (p. 33). Taylor & Francis.

- Krystcio, D. R., Sathe, P. M., Lionberger, R., Yu, L., Bell, M. A., Jay, M., & Hilt, J. Z. (2008). Spreadability Measurements to Assess Structural Equivalence (Q 3) of Topical Formulations — A Technical Note. *PharmSciTech*, 9(1), 84–86.
- Krystijan, M., Ciesielski, W., Khachatryan, G., Sikora, M., & Tomasik, P. (2015). Structure, rheological, textural and thermal properties of potato starch – Inulin gels. *LWT - Food Science and Technology*, 60(1), 131–136.
- Legiscomex. (n.d.). *Exportaciones a latinoamerica de Almidón de yuca. Periodos I-2013/I-2014 y I-2014/I-2015*. Colombia.
- Li, J. M., & Nie, S. P. (2014). The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food Hydrocolloids*, 53, 46–61.
- Löfgren, C., & Hermansson, A. M. (2007). Synergistic rheological behaviour of mixed HM/LM pectin gels. *Food Hydrocolloids*, 21(3), 480–486.
- Luvielmo, M., & Scamparini, A. (2009). Goma xantana: produção, recuperação, propriedades e aplicação. *Estudos Tecnológicos Em Engenharia*, 5, 50–67.
- Mataix Verdú, J., & Gassul, M. A. (2005). Capítulo 7. Fibra alimentaria. In *Nutrición y alimentación humana*. (Vol.1. 2a., pp. 121–128). Barcelona: Editorial Océano.
- May, C. D. (1990). Industrial pectins: Sources, production and applications. *Carbohydrate Polymers*, 12(1), 79–99.
- Meyer, D., Bayarri, S., Tárrega, A., & Costell, E. (2011). Inulin as texture modifier in dairy products. *Food Hydrocolloids*, 25, 1881–1890.
- Migliori, M., Gabriele, D., Baldino, N., Lupi, F. R., & De Cindio, B. (2011). Rheological properties of batter dough: Effect of egg level. *Journal of Food Process Engineering*, 34(4), 1266–1281.
- Minitab(R). (2016a). ¿Qué es un diseño simplex? Retrieved November 14, 2016, from <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/mixture-designs/what-is-a-simplex-design/>
- Minitab(R). (2016b). Diseños Factoriales. Retrieved September 24, 2016, from <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/factorial-designs/factorial-designs/>
- MINTEL. (2016). Base de datos. *Búsqueda,Products/Ingredients/Tapioca Starch. Usuario Quala Privado*.
- Moreira, R., Chenlo, F., & Torres, M. D. (2013). Effect of chia (*Sativa hispanica* L.) and hydrocolloids on the rheology of gluten-free doughs based on chestnut flour. *LWT - Food Science and Technology*, 50, 160–166.
- Neiryneck, N., Meeren, P. Van Der, & Lukaszewicz-lausecker, M. (2007). Influence of pH and biopolymer ratio on whey protein – pectin interactions in aqueous solutions and in O / W emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 298, 99–107.
- Norton, I. T., Spyropoulos, F., & Cox, P. (2010). Dairy Systems. In *Practical Food Rheology: An Interpretive Approach* (p. 149). Wiley.
- Orives, J. R., Galvan, D., Coppo, R. L., Rodrigues, C. H. F., Angilelli, K. G., & Borsato, D. (2014). Multiresponse optimisation on biodiesel obtained through a ternary mixture of vegetable oil and animal fat: Simplex-centroid mixture design application. *Energy Conversion and Management*, 79, 398–404.
- Rao, A. (2010). Spreadability: Using force and under normal gravity. In *Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications* (p. 412). Springer US.

-
- Ravindran, G., & Matia-Merino, L. (2009). Starch-fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) polysaccharide interactions in pure and soup systems. *Food Hydrocolloids*, 23(3), 1047–1053.
- Rinaudo, M., & Moroni, A. (2009). Rheological behavior of binary and ternary mixtures of polysaccharides in aqueous medium. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1720–1728.
- Roberts, J. C. (1996). Dry-Strength Additives. In *Paper Chemistry* (p. 85). Springer Netherlands.
- Roberts, & Quemener, B. (1999). Measurement of carrageenans in food : challenges , progress , and trends in analysis. *Trends in Food Science & Technology*, 10, 169–181.
- Rodríguez-Hernández, A. I., & Tecante, A. (1999). Dynamic viscoelastic behavior of gellan-*κ*-carrageenan and gellan-xanthan gels. *Food Hydrocolloids*, 13(1), 59–64.
- Rosalina, I., & Bhattacharya, M. (2002). Dynamic rheological measurements and analysis of starch gels. *Carbohydrate Polymers*, 48, 191–202.
- Russ, N., Zielbauer, B. I., Ghebremedhin, M., & Vilgis, T. A. (2016). Pre-gelatinized tapioca starch and its mixtures with xanthan gum and *κ*-carrageenan. *Food Hydrocolloids*, 56, 180–188.
- Saha, D., & Bhattacharya, S. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: A critical review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(6), 587–597.
- Salazar, A., & Gamboa, A. (2013). Importancia de las pectinas en la dinámica de la pared celular durante el desarrollo Vegetal. *Revista de Educación Bioquímica*, 32(2), 67–75.
- Shao, P., Shao, J., Han, L., Lv, R., & Sun, P. (2015). Separation, preliminary characterization, and moisture-preserving activity of polysaccharides from *Ulva fasciata*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 924–930.
- Sharma, M. (2015). Effect of hydrocolloid type on rheological and sensory properties of pureed carrots. *Food Hydrocolloids*, 63, 478–487.
- Shi, X., & Bemiller, J. N. (2002). Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting. *Carbohydrate Polymers*, 50, 7–18.
- Sikora, M., Kowalski, S., & Tomasik, P. (2008). Binary hydrocolloids from starches and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 22(5), 943–952.
- Silva, J. A. L. Da, Goncalves, M. ., & Rao, M. A. (1992). Rheological Properties of High-Methoxyl Pectin and Locust Bean Gum Solutions in Steady Shear. *Journal of Food Science*, 57(2), 443–448.
- Soukoulis, C., Lyroni, E., & Tzia, C. (2010). Sensory profiling and hedonic judgement of probiotic ice cream as a function of hydrocolloids, yogurt and milk fat content. *LWT - Food Science and Technology*, 43(9), 1351–1358.
- Steffe, J. F. (1996). Viscoelasticity. In *Rheological Methods in Food Process Engineering* (p. 320). Freeman Press.
- Streblow, R., & Müller, D. (2012). Simulation of Non-Newtonian Fluids using Modelica. In *9th International Modelica Conference* (pp. 57–62). Munich, Germany.
- Tarrega, a., Ramírez-Sucre, M. O., Vélez-Ruiz, J. F., & Costell, E. (2012). Effect of whey and pea protein blends on the rheological and sensory properties of protein-based systems flavoured with cocoa. *Journal of Food Engineering*, 109, 467–474.
- Timm, N. H. (2007). Principal Component, Canonical Correlation, and Exploratory Factor Analysis. In *Applied Multivariate Analysis* (p. 445). Springer New York.

- Toledo, R. T. (2012). Flow of fluids. In *Fundamentals of Food Process Engineering* (p. 160). Springer US.
- Walkenström, P., Kidman, S., Hermansson, A. M., Rasmussen, P. B., & Hoegh, L. (2003). Microstructure and rheological behaviour of alginate/pectin mixed gels. *Food Hydrocolloids*, 17(5), 593–603.
- Welti-Chanes, J., & Aguilera, J. M. (2002). Engineering and Food for the 21st Century. In *Engineering and Food for the 21st Century* (p. 438). CRC Press.
- Yamazaki, E., Kurita, O., & Matsumura, Y. (2008). Hydrocolloid from leaves of *Corchorus olitorius* and its synergistic effect on κ -carrageenan gel strength. *Food Hydrocolloids*, 22, 819–825.
- Zhang, W., Xu, P., & Zhang, H. (2015). Pectin in cancer therapy: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 44(2), 258–271.