



SEP

SES

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS
SINÉRGICAS DE HIDROCOLOIDES UTILIZANDO PECTINA DEL
FRUTO DE *OPUNTIA ROBUSTA* Y ANÁLISIS DE SU APLICACIÓN”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

JAQUELINNE MOTA NAVARRETE

No. CONTROL: 0128D1502

DIRECTOR DE TESIS:

DR. FRANCISCO JAVIER ILLESCAS MARTÍNEZ

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DRA. CLAUDIA ROSARIO MURO URISTA

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, JULIO DE 2021.



Instituto Tecnológico de Toluca

Metepec, Edo. De México., 01/julio/2021
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
DEPI-3200-245/2021.

**C. JAQUELINNE MOTA NAVARRETE
CANDIDATA AL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS AMBIENTALES**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su trabajo de Tesis titulado **"OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS SINÉRGICAS DE HIDROCOLOIDES UTILIZANDO PECTINA DEL FRUTO OPUNTIA ROBUSTA Y ANÁLISIS DE SU APLICACIÓN"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo.

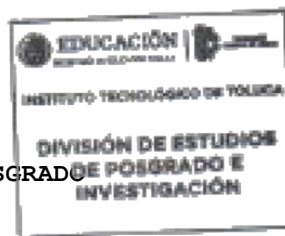
Sin más por el momento, quedo de usted.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en educación tecnológica

Educación, integridad y ciencia

**JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN**



ccp. Archivo

JLGR/NTG

Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista C.P.52149.
Metepec, Edo. de México. Tels. Dirección 722 208 7205,
Subd. Académica 722 208 7207; Subd. de Planeación 722 208 7206;
Subd. Administrativa 722 208 7208; Conmutador 208 72 00.
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | toluca.tecnm.mx





Metepec, Edo. de México, 02/julio/2021

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada **“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS SINÉRGICAS DE HIDROCOLOIDES UTILIZANDO PECTINA DEL FRUTO DE OPUNTIA ROBUSTA Y ANÁLISIS DE SU APLICACIÓN”**, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctora en Ciencias Ambientales presenta el **C. JAQUELINNE MOTA NAVARRETE** con número de control **0128D1502** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

DR. FRANCISCO JAVIER ILLESCAS MARTÍNEZ
DIRECTOR DE TESIS

DRA. CLAUDIA ROSARIO MURO URISTA
CODIRECTORA DE TESIS

DRA. MARÍA DEL CARMEN DÍAZ NAVA
REVISORA DE TESIS

DR. ALBERTO TECANTE CORONEL
REVISOR DE TESIS

DRA. MARÍA SONIA MIREYA MARTÍNEZ
GALLEGOS
REVISORA DE TESIS

DR. ERNESTO RIVERA GARCÍA
REVISOR DE TESIS

ccp. Archivo



Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola, Metepec, Edo. de México. Tels. Dirección 722 208 7205, Sub. Académica 722 208 7207; Sub. de Planeación 722 208 7206; Sub. Administrativa 722 208 7208; Conmutador 722 208 72 00.
e-mail: info@toluca.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada.

A mi Director de Tesis **Dr. Francisco Javier Illescas Martínez** por la oportunidad y el apoyo.

A mi Co-directora de Tesis la **Dra. Claudia Rosario Muro Urista**, por su enseñanza, el tiempo, por sus consejos y aprecio.

A el **Dr. Alberto Tecante Coronel** y la I. A. **Mariana Ramírez Gilly** por sus enseñanzas.

A la Facultad de Química de la **UNAM** por el apoyo con sus equipos e instalaciones.

A el **Dr. Ernesto Rivera García**, **Dra. María del Carmen Díaz Nava** y a la **Dra. María Sonia Mireya Martínez Gallegos** por sus aportaciones para la mejora de este trabajo.

Al **Instituto Tecnológico de Toluca** y al **Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental (LIIA)**, por sus instalaciones.

DEDICATORAS

A mi hijo Marco Eliud que observa mis actos y aprende todo ya sea bueno o malo.

RESUMEN

Con el fin de obtener mezclas sinérgicas a base de pectina, en este trabajo se realizó una investigación sobre la obtención y caracterización de pectina de *Opuntia robusta* para la preparación de mezclas sinérgicas con propiedades de emulsión y gelificación.

La metodología de investigación se basó en tres etapas. 1) Extracción y caracterización de la pectina de *O. robusta*. 2) Preparación y caracterización de mezclas sinérgicas de pectina de *O. robusta* utilizando alginato de sodio y aislado de proteína de haba y suero de leche en diferentes proporciones. 3) Evaluación de la aplicación de las mezclas sinérgicas de pectina *O. robusta* en la obtención de dos productos requeridos por una industria de alimentos.

Para la obtención de la pectina de *O. robusta*, se utilizaron dos métodos de extracción, uno asistido por técnicas ultrasónico-microondas y otro convencional mediante extracciones sucesivas utilizando EDTA, a fin de determinar la eficiencia en la obtención de pectina, el tipo de pectina, pureza, actividad antioxidante y características de emulsión y reológicas.

Los métodos de extracción de pectina de *O. robusta* proporcionaron dos tipos de pectina de acuerdo con su grado de esterificación, una de alto metoxilo (PAM) y la otra de bajo metoxilo (PBM). Ambos tipos de pectina exhibieron rendimientos de extracción similares de 14.64 y 15.71%, con masas moleculares de 32,689 y 20,339 KDa, respectivamente. Sin embargo, la PBM mostró el mayor contenido de ácido galacturónico (47.05%), indicando una mayor pureza del producto en comparación con la PAM (31.74%).

Las propiedades antioxidantes de las pectinas mostraron un contenido similar de polifenoles; sin embargo, el mayor porcentaje de inhibición de los radicales DPPH y ABTS se encontró en la PBM.

Las características reológicas de las pectinas indicaron que la PAM presentó la máxima capacidad y estabilidad de emulsión.

A su vez ambas pectinas presentaron un comportamiento de fluido adelgazante con características sólido elástico o gel fuerte.

En la etapa de elaboración de mezclas de pectina de *O. robusta* con otros hidrocoloides, se obtuvieron mezclas binarias de pectina con alginato de sodio, proteína de suero de leche y proteína de haba en proporciones 1:1, 3:1 y 1:3.

Dentro de las propiedades de las mezclas de pectina se encontró que todas las muestras presentaron sinergismo en la propiedad antioxidante, potenciando la captación de los radicales DPPH y ABTS, destacando de este resultado, las pectinas PBM y proteína de suero y haba, las cuales presentaron un incremento notorio, en comparación con las pectinas en forma individual.

Con respecto a las propiedades reológicas de las mezclas de pectinas, el análisis mostró, que todas las pectinas en mezclas con alginato de sodio aumentaron su porcentaje de capacidad y estabilidad de emulsión, mediante el sinergismo con este hidrocoloide.

En el análisis de viscosidad, todas las mezclas PAM presentaron un incremento en la viscosidad; por lo tanto, también se identificó un comportamiento sinérgico de potenciación de esta propiedad con los hidrocoloides de las mezclas.

Por su parte, en el análisis reológico todas las mezclas presentaron un comportamiento de fluido no newtoniano o adelgazante al corte, mostrando características de gel fuerte o sólido elástico en el intervalo de frecuencia oscilatoria de 1-100 rad/s, revelando un incremento en los módulos de almacenamiento por efecto de los hidrocoloides en las mezclas. Por tanto, se consideró que todas las mezclas estudiadas fueron sinérgicas,

debido al incremento en la zona de estabilidad del gel. A su vez, el ángulo de desfase confirmó los resultados anteriores, proporcionando valores de $\tan \delta < 1$ en función de la frecuencia oscilatoria, lo cual indicó que en las mezclas predominó el comportamiento de sólido elástico.

En la etapa de la evaluación de las aplicaciones de las mezclas sinérgicas de *O. robusta* con propiedades de emulsión y gel, se obtuvo un aderezo tipo mayonesa y una gelatina vegana. En cada caso, se utilizaron mezclas pectina-alginato de sodio-proteína de haba en diferentes proporciones. El resultado obtenido indicó que, en el aderezo de mayonesa, las mezclas pectina-alginato de sodio 1:1 y pectina-alginato de sodio-proteína de haba 1:1:1 presentaron mayor capacidad de emulsión; adicionalmente, esta última mezcla también presentó estabilidad térmica, lo que es favorable para que se pueda utilizar la pasteurización del producto.

A su vez, la prueba sensorial del aderezo de mayonesa arrojó que el producto a base de la mezcla pectina-alginato de sodio 1:1 obtuvo el valor más alto en apariencia, color y cremosidad; la aceptabilidad del producto fue semejante al producto comercial.

Con respecto a la aplicación de las mezclas de pectina en la preparación de una gelatina vegana, el producto obtenido con la mezcla de pectina-alginato-proteína de haba con agar, proporcionó similar resistencia a la deformación del gel en comparación con la gredina.

ÍNDICE

	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	1
1 FUNDAMENTOS	2
1.1 Hidrocoloides	4
1.2 Tipos de hidrocoloides de acuerdo a su origen	5
1.2.1 Hidrocoloides de origen vegetal	6
1.2.2 Hidrocoloides de origen animal	8
1.2.3 Hidrocoloides de algas marinas	9
1.2.4 Hidrocoloides semisintéticos	10
1.2.5 Hidrocoloides sintéticos	12
1.3 Propiedades funcionales de los hidrocoloides	12
1.3.1 Viscosidad	13
1.3.1.1 Modelos que definen el tipo de fluidos de un hidrocoloide	17
1.3.2 Propiedades emulsionantes y estabilizantes	18
1.3.3 Propiedades de espesante	19
1.3.4 Propiedades de gel	19
1.3.4.1 Características reológicas de los geles	21
1.4 Mezclas sinérgicas de los hidrocoloides	24
1.5 Aplicación de los hidrocoloides	25
1.6 Hidrocoloides de pectinas	29
1.6.1 Estructura química de las pectinas	31
1.6.2 Grado de esterificación de las pectinas	33
1.7 <i>Opuntia robusta</i> , fuente de origen de pectinas	37
2 MÉTODO	41
2.1 Extracción y caracterización de pectina de la corteza de <i>O. robusta</i>	42
2.1.1 Extracción de pectina de la corteza de <i>O. robusta</i>	42
2.1.2 Caracterización de pectina de <i>O. robusta</i>	44
2.1.2.1 Grado de metoxilación y porcentaje de ácido galacturónico	44

2.1.2.2	Viscosidad intrínseca y masa molecular	45
2.1.2.3	Análisis infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR)	46
2.1.2.4	Actividad antioxidante	47
2.1.2.5	Propiedades de emulsión	48
2.1.2.6	Propiedades reológicas	49
2.2	Preparación y caracterización de mezclas de pectina de <i>O. robusta</i> con hidrocoloides	51
2.3	Aplicación de las mezclas en un producto alimentario	53
2.3.1	Preparación de aderezo tipo mayonesa con mezclas de hidrocoloides	53
2.3.1.2	Evaluación sensorial del aderezo de mayonesa	54
2.3.2	Preparación de la gelatina vegana con mezclas de pectina	55
3	RESULTADOS	56
3.1	Extracción de pectina de la corteza de <i>O. robusta</i>	56
3.2	Características fisicoquímicas de pectina de <i>O. robusta</i>	58
3.2.1	Porcentaje de ácido galacturónico	58
3.2.2	Viscosidad intrínseca y masa molar	59
3.2.3	Grupos funcionales	60
3.2.4	Actividad antioxidante	61
3.3	Características reológicas de las pectinas de <i>O. robusta</i>	62
3.3.1	Propiedades de emulsión	63
3.3.2	Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de corte	64
3.3.3	Variación de la viscosidad con la temperatura y pH	66
3.3.4	Descripción de las propiedades de gel	67
3.4	Características de mezclas sinérgicas de pectina de <i>O. robusta</i> con otros hidrocoloides	70
3.4.1	Grupos funcionales de las mezclas sinérgicas de pectina	70
3.4.2	Actividad antioxidante de las mezclas de pectina	73
3.4.3	Propiedades de emulsión de las mezclas de pectina	75
3.5	Propiedades reológicas de las mezclas de pectina	77

3.5.1	Viscosidad aparente y definición del tipo de fluidos	77
3.5.2	Descripción de las propiedades de gel	80
3.6	Aplicaciones de las mezclas sinérgicas de pectina de <i>O. robusta</i>	86
3.6.1	Aprovechamiento de la propiedad de emulsión de mezclas de pectina de <i>O. robusta</i> en la obtención de un aderezo tipo mayonesa	86
3.6.2	Análisis sensorial	88
3.6.3	Propiedades reológicas de las gelatinas veganas de mezclas de pectina de <i>O. robusta</i>	90
	CONCLUSIONES	96
	REFERENCIAS	100

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA	
1.1	Clasificación de los hidrocoloides	5
1.2	Clasificación de algunos hidrocoloides de acuerdo con su estructura	6
1.3	Modelos reológicos utilizados para caracterizar fluidos cuyo comportamiento de la viscosidad es independiente del tiempo de agitación	17
1.4	Mezclas conocidas de hidrocoloides y sus aplicaciones	25
1.5	Hidrocoloides utilizados en alimentos y su función	29
1.6	Contenido de pectina de algunas frutas y verduras	30
1.7	Contenido de pectina en algunas especies de <i>Opuntia</i> y en algunas frutas	39
2.1	Identificación de hidrocoloides y de las mezclas de pectinas de <i>O. robusta</i>	52
2.2	Mezcla de pectina utilizadas en la preparación del aderezo de mayonesa	53

2.3	Formulación del aderezo tipo mayonesa	54
2.4	Escala hedónica en la evaluación sensorial del aderezo de mayonesa	54
2.5	Mezclas de hidrocoloides para gelatinas veganas	55
3.1	Rendimiento de la extracción de pectina de la cáscara de <i>O. robusta</i>	56
3.2	Características de la pectina extraída de la corteza de <i>O. robusta</i>	58
3.3	Propiedades de emulsión de pectina de <i>O. robusta</i>	63
3.4	Contenido de polifenoles y actividad antioxidante (AA) de las mezclas de pectina PAM y PBM como porcentaje de inhibición de los radicales DPPH y ABTS	73
3.5	Capacidad y estabilidad de emulsión de las mezclas de pectina PAM y PBM de <i>O. robusta</i> al 4%.	76
3.6	Parámetros de los modelos reológicos de las mezclas PAM y PBM con los hidrocoloides ALG, PHAB y PSUE en proporciones 1:1, 1:3 y 3:1	79
3.7	Tangente del ángulo de desfase de muestras de pectina al 5%	84
3.8	Resumen de resultados de las mezclas de pectina de <i>O. robusta</i>	85
3.9	Propiedades de emulsión de los aderezos tipo mayonesa de las mezclas de hidrocoloides	86
3.10	Promedio del análisis sensorial de los aderezos tipo mayonesa de mezclas de hidrocoloides (de acuerdo con la escala hedónica de la Tabla 2.4)	88

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
1.1	Comportamiento de los fluidos dependientes del tiempo	14
1.2	Comportamiento de fluidos newtonianos y no newtonianos	16

1.3	Respuesta típica a un barrido de tensión o tensión que muestra la región viscoelástica lineal definida por el valor crítico del parámetro de barrido	22
1.4	Respuesta reológica de un material real sometido a un ensayo oscilatorio en función de la frecuencia angular	23
1.5	Extremos de ángulo de fase	23
1.6	Representación esquemática de la estructura de pectina. A) Estructura convencional y B) alternativa, recientemente propuesta	32
1.7	Estructura química de las pectinas	33
2.1	Bosquejo del método	41
3.1	Curvas de viscosidad reducida en función de la concentración de las pectinas PAM y PBM de la corteza de <i>O. robusta</i>	59
3.2	Espectro FTIR de PAM y PBM extraída de la corteza de <i>O. robusta</i>	61
3.3	Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de corte de soluciones de pectina PAM y PBM (10, 20 y 40 mg/mL de izquierda a derecha) extraídas de la cáscara de la fruta de <i>O. robusta</i>	65
3.4	Influencia de la temperatura y el pH en la viscosidad de la pectina de la cáscara de <i>O. robusta</i>	67
3.5	Módulo de almacenamiento G' y módulo de pérdida G'' para los geles de pectina PAM y PBM de <i>O. robusta</i> en función del porcentaje de deformación ($\gamma\%$) y la velocidad oscilatoria (ω rad/s)	68
3.6	Espectros IR de mezclas pectina. PAM (izquierda) y PBM (derecha) con alginato de sodio en una relación 1:1	71
3.7	Espectros IR de mezclas de pectinas PAM (izquierda) y PBM (derecha) con proteína de haba en una relación 1:1	72

3.8	Espectros IR de mezclas de pectina. PAM (Izquierda) y PBM (derecha) con proteína de suero de leche en una relación 1:1	72
3.9	Contenido de actividad antioxidante (AA) de las mezclas de pectina PAM y PBM como porcentaje de inhibición de los radicales DPPH y ABTS	74
3.10	Viscosidad aparente contra velocidad de corte de las mezclas de pectina PAM (parte superior) y PBM (parte inferior) con ALG, PHAB y PSUE en relación 1:1, 3:1 y 3:1 (izquierda a derecha)	78
3.11	Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de mezclas de pectina PAM al 4% con ALG, PSUE y PHAB (1:1, 3:1 y 1:3); y PBM al 4% con ALG (1:1, 3:1 y 1:3) en función del porcentaje del porcentaje de deformación 1Hz de frecuencia	81
3.12	Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de mezclas de pectina PAM y PBM al 4% en función de la frecuencia oscilatoria	92
3.13	Tangente del ángulo de desfase de mezclas de pectina al 5% con ALG, PSUE y PHAB (1:1, 3:1 y 1:3)	84
3.14	Muestras de aderezo tipo mayonesa con mezclas de hidrocoloides (1A, 2A, 3A y 4A son muestras en refrigeración 4°C; 1B, 2B, 3B y 4B son muestras a temperatura ambiente 25 °C)	88
3.15	Resultados de prueba sensorial	89
3.16	Comparación de muestras de aderezos tipo mayonesa con mezcla de hidrocoloides y mayonesa comercial	90
3.17	Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de las gelatinas veganas de mezclas de pectina PBM con AGA, ALG y PHAB en función del porcentaje de deformación a 1Hz de frecuencia.	91
3.18	Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de las gelatinas veganas de mezclas de pectina PBM con ALG y	

	PHAB en función del porcentaje de deformación a 1Hz de frecuencia	92
3.19	Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de las gelatinas veganas de mezclas de PBM, AGA, ALG y PHAB en función de la frecuencia oscilatoria	93
3.20	Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de las gelatinas veganas de mezclas de PBM, ALG y PHAB en función de la frecuencia oscilatoria	94
3.21	Tangente del ángulo de desfase de las gelatinas veganas de mezclas de PBM, ALG, AGA y PHAB	95

INTRODUCCIÓN

Muchos de los alimentos que se consumen hoy en día requieren de la adición de hidrocoloides para proporcionarles ciertas características reológicas, estabilizarlos, darles mejor apariencia, e incluso, mejorar la sensación en la boca, una vez que es degustado. Es por esta razón que el estudio de hidrocoloides tiene un gran aporte en este sector industrial.

Los hidrocoloides se utilizan de acuerdo con sus características específicas, como agentes espesantes, de homogeneización o de gelificación. Sin embargo, pocas veces cumplen su función en forma individual, ya que algunos hidrocoloides son débiles en ciertas funciones o su alcance se ve limitado por las condiciones especiales a las que son sometidos (temperatura, pH, sólidos solubles); por lo que ha sido necesario el uso de mezclas sinérgicas de estos componentes, y/o previa alteración química de algunos de ellos para potenciar o inhibir sus propiedades reológicas, incluyendo también la mejora en sus propiedades sensoriales, organolépticas y cualidades de solubilidad, textura, resistencia del gel, o para evitar la sinéresis.

El objetivo de esta investigación fue la obtención de mezclas sinérgicas de pectina de *Opuntia robusta* para mejorar propiedades funcionales y reológicas con el fin de obtener productos con aplicación en una industria alimenticia.

Como hipótesis se planteó la posibilidad de obtener mezclas sinérgicas de pectina de *Opuntia robusta* que cumplan con las especificaciones establecidas de un sustituto de mayonesa con alto poder emulsionante, y un sustituto de gretina con semejante poder de gelificación.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en el apartado 1 se presentan los fundamentos en los cuales se describen los conceptos que enmarcan la investigación. En el apartado 2 se describe la metodología y los resultados obtenidos se presentan y discuten en el apartado 3, de los cuales se generan las conclusiones.

1 FUNDAMENTOS

Hoy en día existe un gran interés en la industria alimentaria por el uso de hidrocoloides, ya que constituyen unos de los principales agentes estructurales de alimentos y desempeñan un papel importante para su estabilidad.

Los hidrocoloides son ampliamente utilizados para realizar una serie de funciones que incluyen espesar y gelificar soluciones acuosas, obtener espumas, emulsiones y dispersiones, inhibir la formación de cristales y liberar sabores, entre otros (Nishinari et al., 2018). Sin embargo, en muchos de los casos, los hidrocoloides individuales no pueden proporcionar las propiedades y la consistencia requeridas en las formulaciones de alimentos.

Una de las alternativas para mejorar la capacidad de los hidrocoloides es su uso como mezclas sinérgicas, las cuales se emplean para alcanzar diferentes objetivos. Entre ellos, sustituir grasas y azúcares sin perder la textura y con una formulación baja en calorías, lo cual hoy en día, es de gran interés para el consumidor y la industria alimentaria. También se ha incrementado su estudio como materiales combinados para la preparación de sistemas de liberación de biomoléculas, sabores y pigmentos, a fin de proporcionar mejores propiedades de resistencia, textura y porosidad.

Dentro de los hidrocoloides de gran aplicación se encuentran los de origen vegetal como la pectina, el almidón, agar y el alginato de sodio; y los de origen animal, como el colágeno, la gelatina y proteína de suero de leche entre otros. En mezclas estos hidrocoloides han sido estudiados para diferentes objetivos y áreas.

Algunos de los estudios recientes realizados con mezclas de pectina se pueden encontrar en Dekkers et al. (2018), quienes estudiaron la mezcla de pectina y aislado de proteína de soya; Zhang et al. (2018) y Ma et al. (2019) analizaron la mezcla de pectina y almidón. Los autores obtuvieron resultados reológicos importantes por acción de la pectina.

Guo et al. (2019), obtuvieron complejos emulsionantes utilizando pectina con un aislado de proteína de suero de leche: Nešić et al. (2017) combinaron pectina y alginato de sodio para realizar películas reticuladas con zinc con actividad antimicrobiana que se puede utilizar como protección y desinfecciones de dispositivos médicos. A su vez, Jin et al. (2018) obtuvieron nanopartículas de pectina y proteína de soya para mejorar la estabilidad fisicoquímica de matrices alimentarias, farmacéuticas y cosméticas.

Dafe et al. (2017) obtuvieron hidrogeles de pectina y almidón para encapsular bacterias gástricas a fin de resistir reacciones adversas del tracto digestivo. Mientras que Karimi et al. (2016) utilizaron la mezcla de pectina y carboximetilcelulosa para preparar una bebida de leche; Protte et al. (2019) aplicó la mezcla de pectina con proteína de suero para mejorar la estabilidad de pudín y Krzeminski et al. (2014) estudiaron la mezcla de pectina y proteína de suero de leche en un yogurt bajo en grasa.

Otras mezclas de hidrocoloides se pueden encontrar en Volić et al. (2018), quienes mezclaron alginato y proteína de soya para encapsular aceite de tomillo en micro perlas que podrían usarse como administrador de sustancias. También, Garrido et al. (2016) mezclaron agar y proteína de soya para crear películas que podrían ser utilizadas para suministro de sustancias activas.

De acuerdo con las investigaciones que se han hecho en relación con mezcla de pectina, en general se ha encontrado, que este hidrocoloide aporta propiedades de emulsión, textura y sabor en mezcla y producto terminado y su costo ha resultado más económico que otros hidrocoloides que se encuentran en el mercado como el agar, alginato de sodio, aislados de proteína y colágeno, entre otros.

Industrialmente, la pectina se extrae de la cáscara de cítricos y el orujo de manzana (Abid et al., 2016). Sin embargo, actualmente se han estudiado otras fuentes alternativas de obtención, entre las que se encuentran el uso de residuos alimentarios como el orujo de durazno y zanahoria (Faravash & Ashtiani, 2008; Jafari et al., 2017), cáscaras de plátano (Swamy & Muthukumarappan, 2017), cáscara de granada (Abid

et al., 2017), piel de maracuyá (Oliveira et al., 2016), y cáscara de tomate (Grassino et al., 2016).

Recientemente, también se han analizado otras fuentes de obtención de pectina como los cladodios y frutos de nopal de diferentes especies de *Opuntia* (Bayar et al., 2018; Kalegowda et al., 2017; Lefsih et al., 2016; Lira-Ortiz et al., 2014; Morales-Martínez et al., 2018); lo cual resulta muy atractivo en México, dada la gran cantidad y variedad con la que se cuenta en el país y sus requerimientos de cultivo.

1.1 Hidrocoloides

Los hidrocoloides son macromoléculas (polisacáridos y proteínas) cuyas cadenas poseen en su estructura un gran número de grupos hidroxilo; por tanto, presentan una alta afinidad por las moléculas de agua, con gran facilidad para absorberlas: por tanto, son compuestos hidrófilos. Una vez que se mezclan con el agua, tienen la propiedad de formar dispersiones viscosas y/o geles con diferentes propiedades reológicas.

Los hidrocoloides tienen una amplia gama de propiedades reológicas, incluyendo las de espesante, gelificante, emulsionante y estabilizante; al adicionarlos tienen la capacidad de modificar la reología de los sistemas a los que se incorporan; razón por la cual son ampliamente utilizados en la industria alimenticia.

Las propiedades reológicas que los hidrocoloides proporcionan a los alimentos incluyen dos propiedades básicas, el comportamiento de flujo viscoso y el comportamiento de sólido elástico. En ambos casos los hidrocoloides modifican la textura del producto, y a su vez, sus propiedades sensoriales; como consecuencia, los hidrocoloides son aprobados como aditivos alimentarios para lograr la viscosidad deseada y la sensación de boca.

De esta forma, los hidrocoloides se encuentran en diferentes formulaciones de productos comerciales para obtener la textura deseada y sabor adecuado, entre los que se encuentran, sopas, salsas, aderezos para ensaladas y coberturas, así como helados, mermeladas, jaleas, postres gelificados, pasteles y caramelos.

Considerando su papel en el ajuste de la viscosidad y la textura de las formulaciones de alimentos, los hidrocoloides han sido estudiados ampliamente de forma individual y en combinación para obtener mezclas sinérgicas (Yousefi & Jafari, 2019).

1.2 Tipos de hidrocoloides de acuerdo con su origen

Los hidrocoloides pueden ser de origen 1) natural, siendo de tipo vegetal, animal y microbiano; 2) semisintéticos, en los cuales se encuentran aquellos derivados de los naturales y los modificados químicamente; 3) sintéticos, en los que se encuentran los polímeros vinílicos y los de óxido de etileno.

En la Tabla 1.1 se presentan la clasificación de algunos hidrocoloides según su origen, y en la Tabla 1.2 su clasificación de acuerdo con su estructura.

Tabla 1.1 Clasificación de los hidrocoloides (Li & Nie, 2016).

Base	Fuente	Ejemplos
Origen	Plantas	Pectina, inulina, almidón, goma arábica, goma ghatti, goma de tragacanto, goma de karaya, goma de semilla de cassia, semilla de albahaca, semilla de mezquite, alholva, chicle, avena, centeno, konjac, psilio, guar, linaza, arcilla.
	Animal	Quitina, quitosano, colágeno, gelatina, albúmina, caseína
	Algas marinas	Agar, carragenina, ácido algínico, alginato, furcellarén, ulván, fucoidano, alga roja xilano
	Microbiana	Xantana, gelano, goma de tara, dextrano, pululano, goma welana, curlana, levana
	Sintético	Metilcelulosa, metiletilcelulosa, carboximetilcelulosa, hidroxietilcelulosa, hidroxilpropilcelulosa, hidroxipropilmetilcelulosa, celulosa microcristalina

Tabla 1.2 Clasificación de algunos hidrocoloides de acuerdo con su estructura (Li & Nie, 2016).

Base	Fuente	Ejemplos
Estructura	Glucano	Almidón, goma de avena, goma de cebada, curlano, welano, pullulan, dextrano
	Fructano	Inulina, levana
	Xilano	Alga roja xilana
	Rhamnano	Ulvana
	Galactomanano	Guar, algarrobo, goma de tara, goma de semillas de cassia, goma de semillas de albahaca, goma de mezquite, goma de alholva
	Glucomanano	Konjac, alginato
	Arabinoxilano	Psyllium, chicle de linaza (que contiene otra fracción de galacturonano), goma de centeno, goma de trigo
	Galactano	Agar, carragenina, fucoidano, furcellarana
	Arabinogalactano	Goma arábica
	Galacturano	Pectina
	Glicano-rhamnogalacturona	Goma karaya, goma tragacanto (que contiene otra fracción de arabinogalactano)
	Glicano-glucuronomano	Goma ghatti
	Polímero de glucosamina	Quitina, quitosano
	Proteína	Gelatina

De acuerdo con la propiedad que se desea obtener en el producto, los hidrocoloides se aplican de forma individual o en mezcla, combinando naturales con semisintéticos o sintéticos para mejorar las propiedades reológicas, funcionales, de textura y sensoriales.

1.2.1 Hidrocoloides de origen vegetal

Los hidrocoloides de origen vegetal son obtenidos a partir de exudados y semillas de plantas terrestres, como las gomas, almidón y proteínas vegetales.

1) Las gomas son generalmente extraídas de semillas de diferentes árboles; las más conocidas son la arábica, tragacanto y algarrobo. En su mayoría son polisacáridos constituidos de manosa y galactosa. Se disuelven en agua fría o en agua caliente y presentan varios grados de viscosidad y gelificación; algunas requieren de mezclas con otros hidrocoloides para incrementar su gelificación.

Las gomas se usan como espesante, estabilizante de emulsiones, e inhibidor de la sinéresis en diversos productos, como alimentos enlatados, salsas, sobremesas, gaseosas, quesos, helados y carnes procesadas.

La goma de algarrobo se utiliza para acelerar la coagulación del queso, las gomas tragacanto produce viscosidades altas.

La goma arábica proviene de árboles de la acacia; es una sal neutra o levemente ácida de un polisacárido complejo que contiene iones calcio, magnesio y potasio en su molécula; y está formada por seis carbohidratos: galactosa, ramnosa, arabinopiranos, arabinofuranosa, ácido glucourónico y ácido 4-o-metilglucourónico (Pasquel, 2001).

2) El almidón. Es un hidocoloide utilizado comúnmente como espesante, es económico y no altera el sabor del alimento si se usa a una concentración del 2 al 5% (Saha & Bhattacharya, 2010).

El almidón tiene solubilidad limitada, por esta razón se han estudiado los almidones modificados, a fin de obtener estructuras con funciones específicas (Hui et al., 2009; Singh et al., 2007; Verdalet et al., 2013).

La introducción de grupos carboxilo y carbonilo en almidón modificado ha dado como resultado un menor contenido de amilosa y un poder de hinchamiento.

En almidones oxidados, se incrementa la solubilidad y menor temperatura de pegado que el almidón nativo (Sandhu et al., 2008).

Por el contrario, la acetilación en el almidón disminuye la resistencia de unión y eleva el poder de hinchamiento y la solubilidad, mejorando la estabilidad congelación-descongelación. De esta forma, se pueden usar almidones acetilados para evitar la retrogradación durante el almacenamiento del producto terminado (Chi et al., 2008).

3) Las proteínas vegetales como la de guisantes, soya y habas, entre otras, son una gran alternativa de obtener hidrocoloides que pueden sustituir a aquellos que provienen de proteínas de origen animal.

Las proteínas vegetales son bajas en grasas. Su principal una ventaja contra las proteínas de origen animal es alta solubilidad; de esta forma, el organismo las absorbe y digiere fácilmente, lo cual es aprovechado para preparar diferentes formulaciones.

1.2.2 Hidrocoloides de origen animal

Algunos hidrocoloides de origen animal son el colágeno, la gelatina, albúmina y la caseína.

1) El colágeno y la gelatina son el constituyente fibroso de la proteína en los huesos, cartílagos y pieles. La gelatina es un compuesto proteínico soluble obtenido por hidrólisis parcial del colágeno. Se pueden obtener dos tipos de gelatina dependiendo del procedimiento de pretratamiento y se conocen comercialmente como gelatina de tipo A (punto isoeléctrico a pH 8-9) y gelatina de tipo B (punto isoeléctrico a pH 4-5) obtenida bajo pretratamiento en condiciones ácidas y alcalinas respectivamente.

La calidad de la gelatina para una aplicación particular depende en gran medida de sus propiedades reológicas (Roy et al., 2012).

Recientemente en la industria alimentaria, se han encontrado nuevas aplicaciones para la gelatina en productos tales como agente emulsionante, agentes espumantes, estabilizador coloidal, agentes de aglutinación, materiales de embalaje biodegradables y agentes microencapsulantes.

2) Aislado de proteína de suero de leche. Son denominadas proteínas séricas y son altamente utilizados en la industria alimenticia (Bryant & McClements, 2000). En

mezclas sinérgicas con polisacáridos, se combinan las propiedades anfífilas de las proteínas y las propiedades hidrófilas de los polisacáridos para mejorar las propiedades funcionales de gelificación y emulsión; así como la estabilidad térmica a las proteínas. Sin embargo, en tratamiento térmicos drásticos, las proteínas pueden romper la emulsión, y desnaturalizarse, lo cual ocurre alrededor de 75 a 80 °C causando agregación y floculación (Wijayanti et al., 2014).

Las proteínas más utilizadas del suero son la alfa-lactoalbúmina (α -La) y beta-lactoglobulina (β -Lg), ya que son las que se encuentran en mayor proporción. En menor cantidad se encuentran la lactoperoxidasa (Lp), lactoferrina (Lf), inmunoglobulinas (Ig) y seroalbúmina (BSA). Las proteínas del suero son compactas y globulares; su peso molecular varía de 14,000 a 1,000,000 Dalton (Da) y son solubles en un intervalo de pH amplio (Acevedo Correa, 2010).

1.2.3 Hidrocoloides de algas marinas

Los alginatos, el agar y la carragenina son extractos de algas rojas y marrones, que en conjunto, son conocidas como *seaweeds*.

1) Los alginatos son extraídos de algas marrones conocidas como *Phaeophyceae*, se describen como compuestos que incluyen una variedad de productos constituidos por los ácidos D-manurónico y L-gulurónico.

Los alginatos producen geles irreversibles en agua fría, son usados como espesantes, estabilizantes de emulsiones, gelificantes, inhibidores de sinéresis, y *mouthfeel* (Pasquel, 2001). Dependiendo de su origen y concentración, se obtiene el grado de gelificación.

2) El agar es obtenido a partir de algas rojas de la clase *Rhodophyceae*, siendo las más importantes la *Gelidium cartilagineum*, *Gracilaria confervoides* y *Pteroclaia capillacea*.

El agar está constituido de galactosa y anhidrogalactosa parcialmente esterificada con ácido sulfúrico, produce una gelificación perceptible en concentraciones tan bajas como 0.04%. No es soluble en agua fría, pero se disuelve completamente en agua caliente, y la gelificación se inicia entre 35 y 40 °C, resultando un gel fuerte, claro y termorreversible que sólo se liquidifica si la temperatura llega a 85 °C. Su uso en niveles del orden de 0.12% mejora la suavidad de helados y su uso en la fabricación del queso mejora la textura y calidad de los cortes (Pasquel, 2001).

3) La carragenina (Kappa lambda) es un polímero sulfatado, constituido de unidades de galactosa y anhidrogalactosa, extraída de algas rojas donde destaca la *Chondrus crispus*.

La carragenina es usada como gelificante, espesante, estabilizante, y emulsionante; sin embargo, debido a su capacidad de reacción con ciertas proteínas, es usada en pequeñas concentraciones (del orden de 0.01 a 0.03%) en la industria de los lácteos (Pasquel, 2001).

1.2.4 Hidrocoloides semisintéticos

Los hidrocoloides semisintéticos son el resultado de la biosíntesis de microorganismos y la modificación química de polisacáridos naturales; entre éstos se encuentran la goma xantana, gelana, y los derivados de celulosa.

1) La goma xantana es producida por la fermentación de carbohidratos con la bacteria *Xantomonas campestris*. Está constituida por una estructura básica celulósica con ramificaciones de trisacáridos, y aun cuando no sea un agente gelificante, en

combinación con la goma locuste puede formar geles elásticos y termoreversibles. Es completamente soluble en agua fría o caliente y produce elevadas viscosidades en bajas concentraciones, además de poseer una excelente estabilidad al calor y pH, pues la viscosidad de sus soluciones no cambia entre 0-100 °C y 1-13 de pH; y, es utilizada en muchos productos como espesante, estabilizante y agente para mantener suspensiones (Glicksman, 1987).

2) La gelana es un agente gelificante producido por la fermentación de carbohidratos utilizando *Sphingomonas paucimobilis*.

La gelana es un hidrocoloide multifuncional tipo polisacárido con potencial para ser usado en una gran variedad de alimentos como gelificante, texturizante, estabilizante, formador de películas, y agente estructurante y de suspensión (Sworn et al., 1995); posee una estructura principal lineal formada por cuatro unidades de sacáridos: glucosa, ácido glucurónico y ramnosa. Forma geles muy fuertes en concentraciones tan bajas como 0.05%.

3) Los derivados de la celulosa también pertenecen a los hidrocoloides semisintéticos. Se obtienen por modificación química de la celulosa, siendo sus ejemplos más importantes la carboximetilcelulosa, metilcelulosa e hidroxipropilmetilcelulosa.

La carboximetilcelulosa sódica, comúnmente conocida como celulósica o CMC, es generalmente utilizada como espesante, estabilizante, gel, y modificador de las características de flujo de soluciones acuosas o suspensiones.

La metilcelulosa (MC) y la hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) son las únicas que gelifican con el calor; al enfriarse, retornan a su viscosidad original líquida, lo que las hace muy importante para ser utilizadas con alimentos fritos (Pasquel, 2001).

1.2.5 Hidrocoloides sintéticos

Entre los hidrocoloides sintéticos se encuentran el alcohol polivinílico, ácidos poliacrílicos, y poliacrilatos.

1) El alcohol de polivinilo (PVOH, PVA, o PVal), también llamado polietenol o poli (alcohol vinílico) es un polímero sintético soluble en agua. Su principal uso está en la polimerización en emulsión; también se utiliza como coloide protector, y para hacer dispersiones de acetato de polivinilo.

2) La polivinilpirrolidona (PVP), también llamado comúnmente polividona o povidona, es un polímero soluble en agua que se obtiene a partir del monómero N-vinilpirrolidona. Generalmente se utiliza para unir a otros hidrocoloides.

3) El poli(óxido de etileno) (PEO) es un homopolímero lineal no iónico de óxido de etileno. Su mayor uso está en la preparación de sistema de matriz para liberación controlada, ya que funciona como un aglutinante de tabletas por compresión directa. También se utiliza como bioadhesivo de mucosa y agente espesante.

1.3 Propiedades funcionales de los hidrocoloides

Las propiedades funcionales de los hidrocoloides se refieren a características que son capaces de proporcionar a la solución o matriz donde se dispersan. Entre estas se encuentran la de espesantes, agentes gelificantes, emulsionantes, estabilizadores, sustitutos de grasas, agentes clarificantes, floculantes, y agentes de turbidez y de batido. Algunas de las propiedades funcionales de los hidrocoloides dependen de su viscosidad.

1.3.1 Viscosidad

La viscosidad de cualquier fluido se analiza en forma de dispersiones delgadas y gruesas para definir su comportamiento, y se examina convencionalmente empleando un viscosímetro o reómetro, donde se analizan los fluidos en movimiento, determinando su resistencia a fluir debido a una fuerza al corte, la cual se conoce como tensión superficial o velocidad de corte. A mayor viscosidad los fluidos presentan mayor resistencia a fluir. Por tanto, los fluidos más viscosos se desplazan con mayor lentitud.

La viscosidad de un fluido depende del pH, temperatura, concentración, y significativamente de la masa molecular y la estructura de la molécula.

La viscosidad también determina el comportamiento de gelación de un hidocoloide. Aunque todos los hidocoloides imparten viscosidad a dispersiones acuosas, sólo algunas gelifican, y se necesitan ciertas condiciones de concentración temperatura y pH para que esto suceda.

Dependiendo del comportamiento de fluidez con la velocidad de corte, los fluidos, se distinguen en 1) newtonianos, 2) no-newtonianos.

En un fluido newtoniano su viscosidad no varía con la velocidad de corte; por tanto, su consistencia no se modifica con la agitación, y, su viscosidad solo depende de la temperatura y composición.

En el caso contrario, se encuentran los fluidos no newtonianos; éstos no presentan una viscosidad definida, ya que varía de acuerdo con la velocidad de corte que se le aplica y con la temperatura; por tanto, su consistencia se modifica con la velocidad de agitación. En esta clasificación se encuentran la gran mayoría de los fluidos en la industria alimentaria.

Dentro de los fluidos no newtonianos, existen los que son dependientes e independientes del tiempo de mezcla; los que son dependientes del tiempo se dividen en Tixotrópicos y Anti-tixotrópicos.

En la Figura 1.1 se presenta el comportamiento de fluidos no newtonianos dependientes del tiempo.

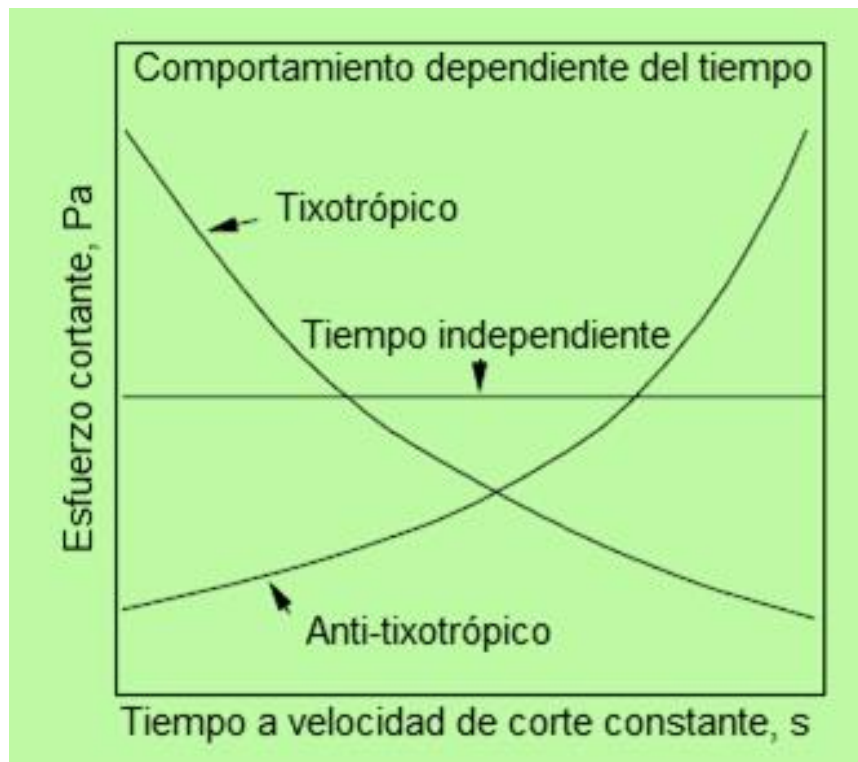


Figura 1.1. Comportamiento de los fluidos dependientes del tiempo (Steffe, 1996).

a) En los fluidos tixotrópicos, la viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de agitación. Como ejemplos se encuentran las gelatinas, mieles y algunas salsas. Durante el proceso de mezclado, una zona del material menos viscoso se forma alrededor del agitador, esto es más evidente cuanto mayor es el tiempo de agitación, pero mayor parte del alimento permanece estacionario.

b) Los fluidos anti-tixotrópicos se comportan de forma opuesta al de los tixotrópicos, es decir, su viscosidad aumenta con el tiempo de agitación. Sin embargo, muchos

fluidos, pierden sus propiedades anti-tixotrópicas a niveles altos de cizalla. Un ejemplo de estos fluidos es la clara de huevo.

Los fluidos no newtonianos que son independientes del tiempo tienen la siguiente clasificación:

i) Plásticos, permanecen rígidos mientras que el esfuerzo sea menor a un valor determinado (llamado punto de cedencia) dependiendo de cada fluido. Una vez superado dicho valor, el comportamiento es muy semejante a un fluido newtoniano. Este modelo de fluido se puede encontrar en emulsiones como la pintura, en lodos y en líquidos con sólidos en suspensión.

ii) Espesantes, estos fluidos aumentan su viscosidad al aumentar la velocidad de corte; por tanto, deben mezclarse con sumo cuidado, para ello requieren de una alta potencia y resistencia, ya que el aumento que se produce en su consistencia puede dañar los mecanismos de tratamiento y los ejes de los mezcladores. Como ejemplos de estos fluidos se encuentran la harina de maíz, disoluciones de almidón muy concentradas, chocolate, entre otros.

iii) Adelgazante, son aquellos fluidos que disminuyen su viscosidad al aumentar el gradiente de velocidad de corte. Sin embargo, a velocidades altas, la viscosidad se hace casi constante. Este comportamiento lo presentan la mayoría de los fluidos que se utilizan en la industria.

Durante el proceso de mezcla, al igual que los tixotrópicos, se forma alrededor del agitador una zona de material menos viscoso (más evidente cuanto mayor es la agitación) pero la mayor parte del fluido permanece estacionario. Ejemplos de estos fluidos son las salsas, mostaza, zumos de fruta, algunos tipos de cátsup y pulpa de papel entre otros.

iv) Viscoelásticos o de comportamiento plástico: se caracterizan por poseer propiedades viscosas y elásticas como son la relajación de la tensión y la recuperación. Esta mezcla de propiedades puede ser debida a la existencia en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos. Como ejemplo de estos fluidos se encuentran la nata, masa de panadería, helados y gelatinas.

La gran mayoría de los hidrocoloides a baja concentración, se comportan como fluidos newtonianos. Sin embargo, por encima de una concentración crítica conocida como concentración de solapamiento (C^*), los hidrocoloides pueden exhibir un comportamiento no-newtoniano del tipo adelgazante, con variación en la viscosidad al corte; es el caso cuando el hidrocoloide se utiliza como espesante (Li & Nie, 2015). Por tanto, el hidrocoloide puede tener ambos comportamientos, dependiendo de la concentración, el pH y la temperatura.

En la Figura 1.2 se muestra una imagen del comportamiento de los fluidos de acuerdo con su viscosidad.

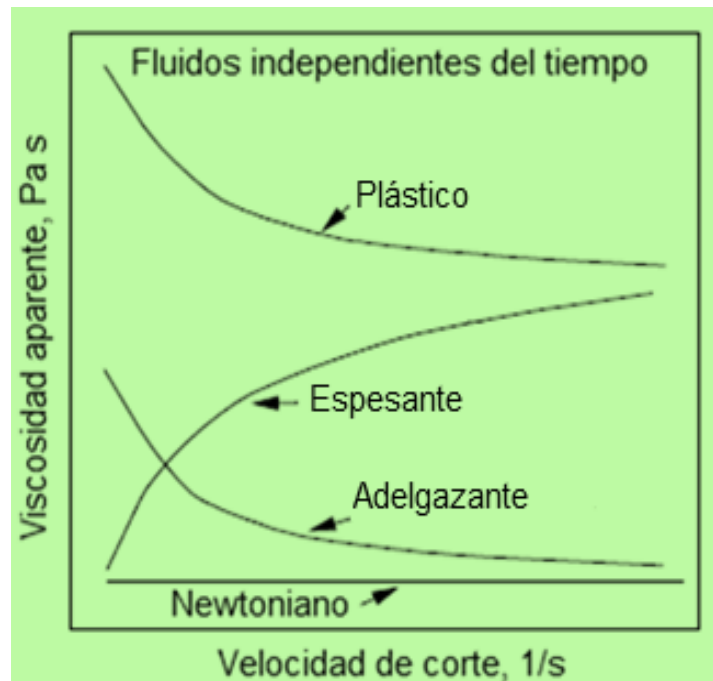


Figura 1.2. Comportamiento de fluidos newtonianos y no newtonianos (Steffe, 1996).

1.3.1.1 Modelos reológicos de fluidos de acuerdo con la viscosidad

Se han desarrollado varios modelos para describir el comportamiento de los fluidos de acuerdo con su viscosidad, principalmente aquellos que tienen un comportamiento reológico independiente del tiempo.

Los modelos que se utilizan para describir el comportamiento de acuerdo con su viscosidad son el de Ostwald-De-Waele (modelo de la ley de la potencia), el modelo de Carreau, el modelo de Cross, y Casson, entre otros.

En la Tabla 1.3 se presentan los modelos reológicos y la expresión matemática que describe el modelo y caracteriza el comportamiento de los fluidos.

Tabla1.3. Modelos reológicos utilizados para caracterizar fluidos cuyo comportamiento de la viscosidad es independiente del tiempo de agitación (Steffe, 1996).

Tipo de fluido	Modelo	Ecuación que expresa el modelo
Newtoniano	Newton	$\sigma = \eta \dot{\gamma}$
No newtoniano	Plástico	$\eta = \eta_0 + \eta_p \dot{\gamma}$
No newtoniano	Ostwald de Waele o ley de la potencia	$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$
No newtoniano	Cross	$\eta = \eta_\infty + \frac{(\eta_0 + \eta_\infty)}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^m}$
No newtoniano	Carreau	$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 + \eta_\infty) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^{(2)} \right]^{\frac{n-1}{2}}$

El comportamiento de los fluidos no-newtonianos se describe generalmente mediante el modelo de Ostwald-De-Waele; donde η es la viscosidad aparente (Pa.s), $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla (s^{-1}), K es el índice de consistencia ($Pa s^n$) y n es el índice de flujo. A su vez, el valor de n determina el tipo de fluido. Si $n < 1$ el fluido es adelgazante, $n > 1$ el fluido es espesante y $n = 1$ fluido newtoniano.

1.3.2 Propiedad de emulsión y estabilización

La mayoría de los hidrocoloides son considerados agentes emulsionantes y estabilizantes, debido a que facilitan o propician la formación de emulsiones, las cuales presenta un sistema bifásico en lo que uno de estos componentes está disperso en otro en forma de pequeñas gotitas.

La emulsión agua y aceite es conocida como O/W si la fase dispersa es aceite y la fase discontinua es agua, o viceversa, W/O, si la fase dispersa es agua y la fase discontinua es aceite.

El emulgente o agente emulsionante estabiliza las emulsiones impidiendo que sus fases se dispersen, haciendo las veces de material aglutinante.

La funcionalidad de los hidrocoloides como emulsionantes y/o estabilizantes se correlaciona con fenómenos tales como retraso de la precipitación de las partículas sólidas dispersas, prevención de la agregación de las partículas dispersas, prevención de sinéresis de los sistemas gelificados que contienen aceites y retraso de la coalescencia de las gotitas de aceite.

El hidrocoloide emulsionante más conocido es la goma arábica; se utiliza para emulsionar aceites aromatizantes a bajo pH y alta fuerza iónica, y emulsionar agentes colorantes de bebidas (Nakauma et al., 2008).

La goma ghatti también se conoce por su capacidad de emulsión; puede usarse en combinación con goma arábica u otras gomas comerciales disponibles (Hobbs et al., 2011; Kang et al., 2012).

Otros agentes estabilizadores de emulsión son los derivados de la celulosa, tales como como hidroxipropil(metil)celulosa (Dickinson, 2009).

La pectina altamente acetilada de la remolacha azucarera también exhibe actividad superficial y funciona como estabilizador. Lo mismo sucede con las pectinas de los cítricos y las manzanas con un bajo contenido de acetilo (<0,8%) (Dickinson, 2009).

El almidón modificado obtenido por reacción con el anhídrido de octenil succinato es hidrofóbico, por tanto es fuertemente tensoactivo, por lo cual también se utiliza como estabilizador de emulsiones (Prochaska et al., 2007).

1.3.3 Propiedad de espesante

Los hidrocoloides pueden ser agentes espesantes, lo que significa que tienen la propiedad de hacer más densa o condensada una sustancia, solución o alimento, proporcionándole consistencia o textura, debido a que absorben y retienen parte del agua que está presente en la matriz e incrementan la viscosidad.

Generalmente los almidones y las harinas con el líquido hirviendo se utilizan para espesar la matriz a la que se le añade.

Otro espesante es la pectina, la cual se utiliza para espesar mermeladas; mientras que el agar y la gelatina, son espesantes que se utilizan en sopas y salsas.

1.3.4 Propiedad de gel

Algunos hidrocoloides tienen la propiedad de formar geles al ponerse en contacto con el agua bajo ciertas condiciones. Entre algunas definiciones de gel que se encuentran en la literatura se tienen las siguientes.

Un gel se forma cuando un semisólido que contiene un agente gelificante que le proporciona rigidez a la solución o dispersión coloidal.

Un gel también se define como una dispersión coloidal donde una matriz sólida es la fase continua mientras que un líquido es la fase discontinua (Saha & Bhattacharya, 2010).

También se dice, que un gel es un estado de dispersión formado por una red ordenada de moléculas enlazadas en una red tridimensional, donde la fase continua líquida es atrapada dentro de la red.

En cualquiera de esas definiciones sobresalen la forma sólida y líquida que posee un gel.

La firmeza del gel (característica sólida) depende del tipo y concentración del hidrocoloide, así como de sales, pH, temperatura, sinéresis (compactación y pérdida de agua) y retrogradación (precipitación del gel).

Entre los hidrocoloides de gelificación se incluyen el agar, alginato, carragenano, pectina, gelatina, gellan, furcellaran, almidón modificado, metilcelulosa, entre otros. Estos hidrocoloides son utilizados en mermeladas, jaleas, budines, así como alimentos reestructurados y rellenos de panadería (Saha & Bhattacharya, 2010; Sultani et al., 2014).

La textura de gel varía desde el gel elástico hasta el gel quebradizo. Dentro de los geles quebradizos se encuentran la pectina, carragenano y alginato, donde éstos últimos son reticulados por iones de calcio; sin embargo, esta estructura de gel es fácil de encoger y produce sinéresis.

La sinéresis es indeseable en algunos productos como la gelatina, pero puede ser útil en la producción de queso (Mateva et al., 2013). Para evitar este fenómeno, se emplean otros hidrocoloides junto con gomas que forman geles frágiles para construir sinergia. Por ejemplo, la adición de goma de algarroba al gel a base de kappa-carragenano conduce a la transformación en un gel más elástico y transparente, que

es el resultado de la auto-asociación de la goma de algarroba en solución (Amos Nussinovitch, 1997).

1.3.4.1 Características reológicas de los geles

Las pruebas fundamentales para determinar las propiedades de los geles incluyen su deformación al someterse a pruebas oscilatorias dinámicas y pruebas de fluencia, entre otras, lo cual define su reología.

En la reometría oscilatoria dinámica, la muestra se somete a una frecuencia oscilatoria con un amplio rango de velocidad angular (rad/s) para determinar el cambio de forma que experimenta un material bajo la acción de la fuerza de cizalla, indicando el rango en que el gel presenta un comportamiento de gel fuerte y débil con características de sólido elástico o líquido viscoso respectivamente. Los parámetros de gel que definen dicho comportamiento son los siguientes.

- 1) El módulo de almacenamiento o elástico (G') describe las propiedades del gel fuerte como un sólido (respuesta elástica).
- 2) El módulo de pérdida o módulo viscoso (G''), que describe el comportamiento del gel débil o como un líquido (respuesta viscosa).
- 3) La relación del módulo elástico y viscoso G''/G' que representa tangente del ángulo de pérdida o desfase ($\tan \delta$) en función de la frecuencia de oscilación (ω). La función $\tan \delta$ también se conoce como la medida del desfasamiento entre el estrés y la tensión. Las unidades de ambos módulos G' y G'' son pascal (Pa) en el Sistema Internacional.

En las Figuras 1.3 y 1.4 se presentan las curvas características de los módulos reológicos de almacenamiento y pérdida en función de la velocidad de corte y la frecuencia angular, respectivamente.

Para el gel débil se cumple que $G' < G''$, predominando G'' y el comportamiento de un fluido con respuesta viscosa. En este caso, la estructura de la red se destruye con la velocidad angular o de cizallamiento, debido a que las zonas de unión de este gel se rompen fácilmente, incluso a una velocidad de cizallamiento muy baja.

De forma inversa, en un gel fuerte se cumple $G' > G''$, predominando el comportamiento de un sólido de respuesta elástica, indicando la prevalencia de un gel fuerte o sólido elástico.

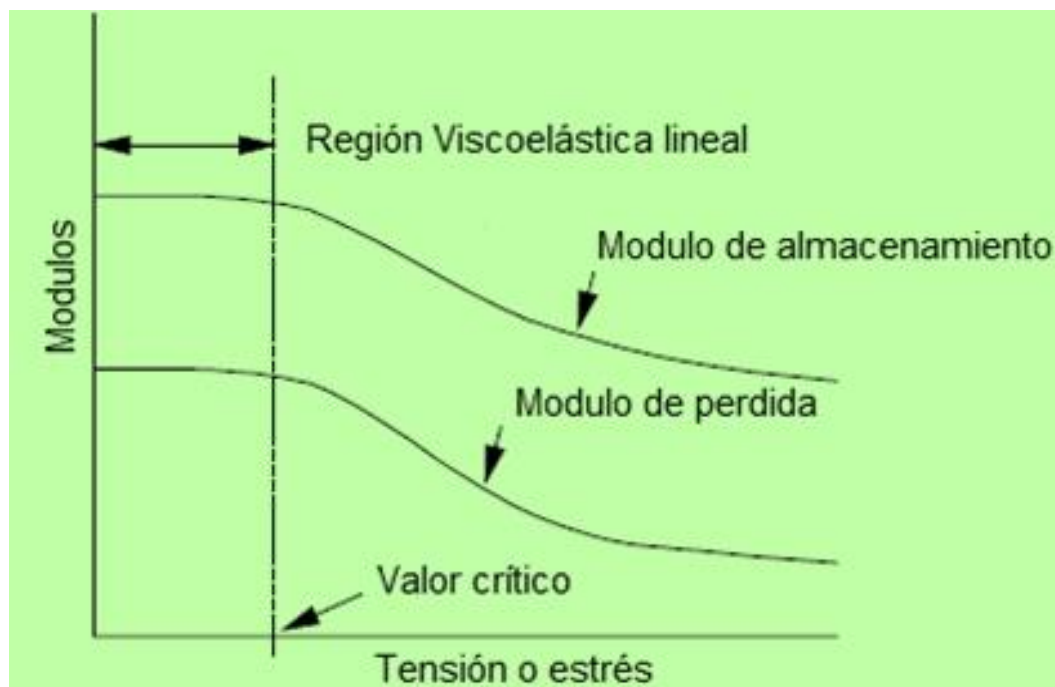


Figura 1.3. Respuesta típica a un barrido de tensión o tensión que muestra la región viscoelástica lineal definida por el valor crítico del parámetro de barrido (Steffe, 1996).

En consecuencia, para un gel fuerte o sólido elástico el ángulo δ tiene un valor que varía entre 0° y 90° con $\tan \delta < 1$; mientras que en los gels que son de naturaleza débil o viscosos, $\tan \delta > 1$, este comportamiento se puede observar en la Figura 1.5.

Todas estas propiedades reológicas varían con respecto al fluido, y su vez, con la frecuencia de oscilación, y a la temperatura de trabajo. Por lo tanto, un fluido puede tener un comportamiento muy viscoso a una cierta frecuencia o un comportamiento elástico a otra frecuencia y puede presentar los dos tipos de geles.

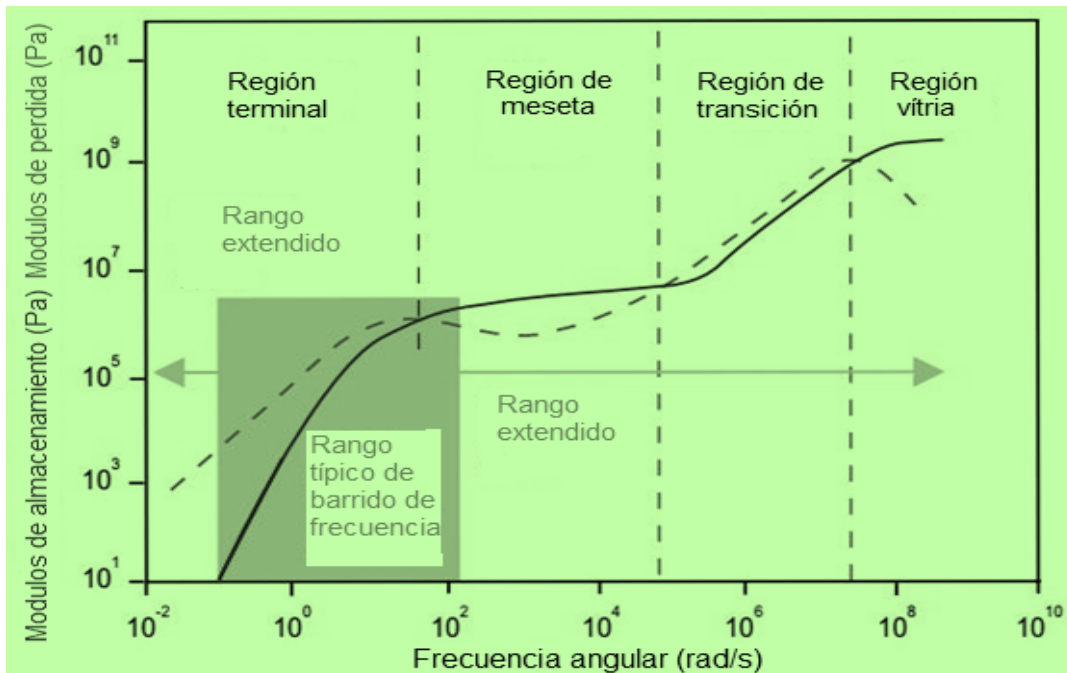


Figura 1.4. Respuesta reológica de un material real sometido a un ensayo oscilatorio en función de la frecuencia angular (Steffe, 1996).

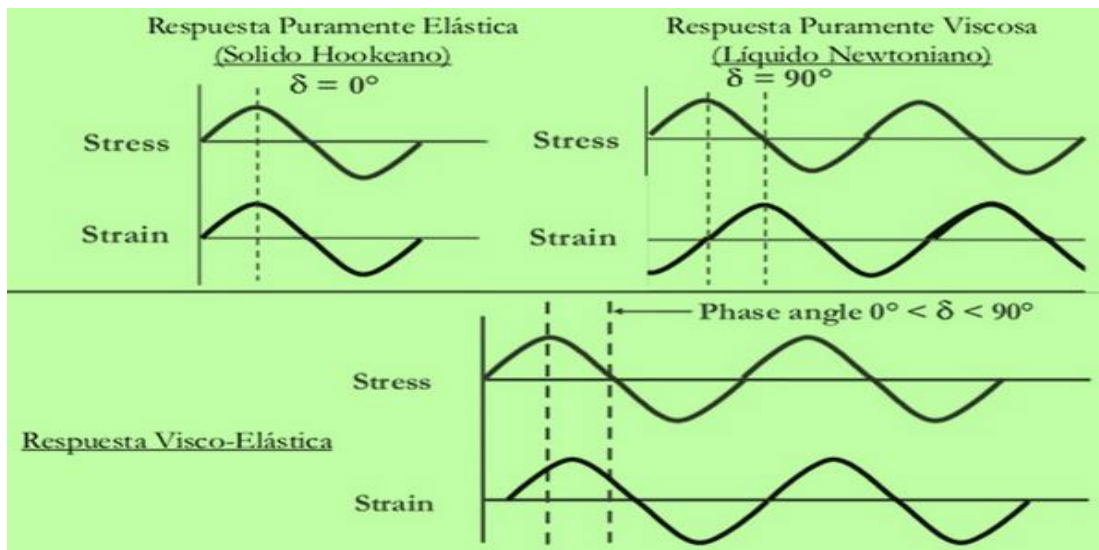


Figura 1.5. Extremos de ángulo de fase.

1.4 Mezclas sinérgicas de hidrocoloides

Las propiedades de los hidrocoloides pueden aprovecharse formando mezclas para potenciar, disminuir, o modificar el resultado que se obtiene con el uso de un solo hidrocoloide en el sistema donde se adicionan. Cuando se consigue el resultado deseado, las mezclas se identifican como sinérgicas, logrando mejoras en las características finales, inclusive con menores cantidades de los agentes o efectos más allá de la propiedad original.

En la Tabla 1.4 se presentan algunas mezclas de hidrocoloides que se han estudiado y su aplicación.

Dentro de las mezclas estudiadas destacan las compuestas por carrageninas con gomas de algarrobo o guar, en donde se ha obtenido un gel con mayor cohesión.

También se conoce el sinergismo que existe entre la xantana y algarrobo o guar, en donde ninguna de las dos combinaciones empleadas por separado presenta propiedades gelificantes, sino solamente espesantes; en cambio, al ser mezcladas, se genera una interacción entre zonas de ambas moléculas, produciéndose un importante incremento en la viscosidad.

Otros casos conocidos de sinergias son las pectinas de alto metoxilo y alginatos con algunos hidrocoloides y proteínas (BeMiller, 2011; Cui et al., 2006; Liu et al., 2003; Wu et al., 2011).

Por otra parte, la mezcla de dos agentes no gelificantes a veces genera inesperadamente un gel (Chaisawang & Suphantharika, 2006; Rodríguez-Hernández & Tecante, 1999); o bien la propiedad de textura, tales como merengues, rellenos de tarta y malvaviscos se puede mejorar mediante la adición de hidrocoloides no hidrolizantes. Un ejemplo es la adición de goma arábica a los chabacanos a base de agar para suavizar su textura.

La adición de carboximetilcelulosa a geles de postre de alginato mejora su resistencia al deterioro textural en los ciclos de congelación y descongelación (Nussinovitch & Hirashima, 2014).

Tabla 1.4. Mezclas conocidas de hidrocoloides y sus aplicaciones.

Mezcla	Beneficios	Autor/año
Pectina y aislado de proteína de soya	Mezclas para determinar sus propiedades viscoelásticas considerando temperaturas altas.	(Dekkers et al., 2018)
Agar y maltodextrina	Películas con cera de abeja que pudieran usarse para envases de alimentos	(Zhang et al., 2019)
Pectina y almidón	Mezclas para determinar características reológicas, de pegado y digestibilidad.	(Ma et al., 2019)
Pectina y proteína de suero de leche	Complejos para potenciar emulsiones	(Guo et al., 2019)
Pectina y proteína de soya	Nano partículas para su posible uso para mejorar la estabilidad fisicoquímica de matrices alimentarias, farmacéuticas y cosméticas.	(Jin et al., 2018)
Pectina y alginato de sodio	Películas reticuladas con zinc con actividad antimicrobiana se puede utilizar como protección y desinfección de dispositivos médicos.	(Nesic et al., 2017)
Pectina y almidón	Hidrogeles para encapsular bacterias y resistir reacciones adversas al tracto digestivo	(Dafe et al., 2017)
Carboximetilcelulosa y Pectina	Bebida de leche para determinar propiedades sensoriales y reológicas	(Karimi et al., 2016)
Pectina y Proteína de suero de leche	Pudin para determinar sus propiedades sensoriales y reológicas	(Protte et al., 2019)
Pectina y Proteína de suero de leche	Yogurt bajo en grasa para determinar sus propiedades reológicas y sensoriales	(Krzeminski et al., 2014)
Alginato y proteína de soya	Perlas para encapsular aceite de tomillo, que podría usarse como administrados de sustancias.	(Volic et al., 2018)
Agar y proteína de soya	Películas que podrían ser utilizadas para suministro de sustancias activas en alimentos y fármacos.	(Garrido et al., 2016)

1.5 Aplicación de los hidrocoloides

Los hidrocoloides tienen diferentes aplicaciones y se utilizan en diferentes áreas industriales y de investigación.

Una de sus aplicaciones importantes de los hidrocoloides que se aprovecha en el ramo alimenticio es su sustitución de grasa. Como un ejemplo, el aderezo “italiano” incluye

xantana como espesante y la mayonesa “ligera” contiene guar y xantana, sustituyendo cada uno, a componentes de grasa para mejorar su viscosidad. Los sustitutivos de grasa basados en hidrocoloides implican inulina, pectina, beta-glucano de cebada, guar, goma de okra, goma de tragacanto, xantano, kappa-carragenano, alginato de sodio, curdlan, algarroba, entre otros (Aziznia et al., 2008; Brennan & Tudorica, 2008).

La inulina sirve como sustituto de grasa o un modificador de la textura bajos en calorías (Bayarri et al., 2010). Es utilizada en productos lácteos y de carne (Berriain et al., 2011; Rodríguez Furlán et al., 2014). La algarroba y el konjac también se han investigado en los alimentos con bajo contenido de grasa (García-García & Totosaus, 2008; Ruiz-Capillas et al., 2012).

Otra aplicación de los hidrocoloides es en la preparación de bioplásticos. El almidón es un hidrocoloide que es un componente importante de los bioplásticos, constituyen una alternativa para el poliestireno, que se han aplicado con éxito a nivel industrial para extrusión, soplado de película, moldeo por inyección y moldeo por soplado. Marks & Spencer Group PLC (Inglaterra) ha hecho uso de bandejas de maíz en chocolates de leche, mientras que los supermercados Iper (Italia) aplicaron maicena en envases de tomate orgánico. La celulosa es otro hidrocoloide que puede formar una película de celofán y se ha utilizado para empaquetar pastas, frutas y papas fritas en grandes corporaciones (Birkel, Boulder Canyon, Wal-Mart, entre otras). Además, hay varios ejemplos para producir bioplásticos usando mezclas de hidrocoloides, tales como almidón / celulosa, quitosano / gelatina, quitosano / pectina, pectina / gelatina, gelatina /alginato de sodio, gelatina /konjac glucomanano, entre otros (Farris et al., 2009; Imran et al., 2010). Dado que estos bioplásticos de hidrocoloides son hidrófilos, las películas de envasado a base de estos materiales tienen una barrera de vapor de agua baja, lo que causa una estabilidad de conservación limitada y unas propiedades mecánicas deficientes (sensibles al contenido de humedad) (Kristo et al., 2007). Sin embargo, si se utilizan en forma de gel, pueden retardar la pérdida de humedad durante el almacenamiento a corto plazo. Roy et al. (2012) informaron sobre la preparación de la

película de hidrogel como material de envasado de alimentos usando carboximetilcelulosa (CMC) y polivinilpirrolidona (PVP).

La encapsulación de diferentes sustancias también es una aplicación de los hidrocoloides. La encapsulación es el proceso mediante el cual los ingredientes activos u otros materiales de núcleo están atrapados dentro de un material de pared (cubierta / revestimiento) para protección y / o liberación posterior. Los hidrocoloides se emplean como cubierta de las sustancias a encapsular, ya que son comestibles, biodegradables y capaces de formar una barrera entre el núcleo y sus alrededores (Nedovic et al., 2011). Cada año aparecen artículos sobre la caracterización de nuevos sistemas proteínicos-hidrocoloides para la encapsulación en alimentos (Polowsky & Janaswamy, 2015).

De forma particular, la microencapsulación a base de hidrocoloides ha surgido como una alternativa para la protección de los probióticos, proporcionando un microambiente particular para el microorganismo encapsulado y mejorando su viabilidad. Shi et al. (2013) desarrollaron microesferas de leche recubiertas de goma de carraena-algarroba para encapsular el probiótico *Lactobacillus bulgaricus*.

Koupantsis *et al.* (2014) investigó la coacervación compleja de proteínas de la leche con carboximetilcelulosa (CMC) para la encapsulación de compuestos β -pineno.

Otras mezclas de hidrocoloides como goma arábica/gelatina, goma arábica/albúmina, goma arábica/proteína de suero, goma arábica/ β -lactoglobulina, pectina/ β -lactoglobulina, pectina/gelatina de metoxi baja, goma de xantano/gelatina, goma de xantano/Proteínas de suero de leche, κ -carragenano/gelatina, κ -carragenano/albúmina de suero bovino, κ -carragenano/gelatina, sulfato de dextrano/caseinato de sodio, sulfato de dextrano/proteína de soja han sido utilizadas como encapsulantes de alimentos (Kruif et al., 2004).

Otras de las características que se aprovecha de los hidrocoloides son sus propiedades adhesivas.

La eficacia de los hidrocoloides como adhesivo está relacionada principalmente con sus propiedades gelificantes. La gelificación de pectina, gelano, alginatos, carragenano, MC y HPMC produce una adhesión mejorada (Varela & Fiszman, 2011).

Los adhesivos hidrocoloides son de gran interés para la ciencia farmacéutica, ya que son hidrófilos, no tóxicos y comestibles, y tienen una excelente propiedad de humectabilidad mejorando su penetración en sustratos porosos.

Particularmente los mucoadhesivos pueden prolongar el tiempo de contacto de los fármacos con la capa mucosa tanto en la boca como en el tracto gastrointestinal (Prajapati et al., 2013).

Los mucoadhesivos hidrocoloides también pueden usarse en productos alimenticios con el fin de controlar el suministro de ingredientes específicos tales como sabores, aditivos nutricionales, entre otros.

Amidi et al. (2009) investigaron el comportamiento mucoadhesivo de la pectina (con grado de esterificación ~ 60%); mientras que el alginato de sodio y la carboximetilcelulosa sódica fueron estudiados desde la perspectiva de su resistencia mecánica (Ali & Bakalis, 2011), encontrando que el alginato de sodio ejerció un efecto mucoadhesivo más fuerte.

Otros hidrocoloides que se utilizan como adhesivos, incluyen quitosano, pectina, pululano, dextrano, goma arábica, goma ghatti, goma karaya, goma tragacanto, goma talha, MC, CMC y HPMC (Phillips & Williams, 2000).

La goma arábica y la talha, que se utilizan como adhesivos comestibles, pueden añadirse a las migas de pan para obtener una mejor adherencia a las chuletas de

cerdo, bifes, chuletas de pollo o filetes de pescado, que tienden a desprenderse de los productos empanados recubiertos sin necesidad de un revestimiento (Nussinovitch, 2009).

El quitosán es un mucoadhesivo que se ha investigado extensamente para el uso en sistemas de liberación de fármacos y sustancias activas (Bernkop-Schnürch & Dünnhaupt, 2012; Chaudhury & Das, 2011).

En la Tabla 1.5 se resumen algunas funciones que proporcionan los hidrocoloides a los alimentos (Hollingworth, 2010).

Tabla 1.5. Hidrocoloides utilizados en alimentos y su función.

Hidrocoloide		Principales funciones	
Polisacárido	Agar	Agente gelificante	
	Alginato	Agente gelificante	
	Carragenina	Agente gelificante	
	Derivados de celulosa	CMC HPC HPMC MC	Espesante Espesante y Emulsificante Espesante Espesante, emulsificante y gelificante
	Quitosano		Agente gelificante Antimicrobiano
	Goma Arábica		Emulsificante
	Guar		Espesante
	Xantana		Espesante
	Pectina		Agente gelificante
	Almidones		Espesante y agente gelificante
Proteína	Gelatina	Bovina Pesquera Porcina	Agente gelificante Agente gelificante Agente gelificante

1.6 Hidrocoloides de pectinas

La pectina es un hidrocoloide que se encuentra en muchos vegetales, constituyen el 30% del peso seco de la pared celular primaria de células.

En el vegetal de procedencia, las pectinas regulan el pH de la pared celular y el balance iónico (Voragen et al., 2009). También funcionan como agentes de hidratación y material de unión de la red celulósica.

Las pectinas están en mayor cantidad en los frutos inmaduros y especialmente en algunos tejidos suaves, como en la cáscara de los cítricos (naranja, limón, toronja, lima), manzanas, peras, entre otros.

En la tabla 1.6 se presentan algunas fuentes vegetales que contienen pectina, indicando su contenido en porcentaje.

Tabla 1.6. Contenido de pectina de algunas frutas y verduras (Thakur et al., 1997).

Origen	% Pectina
Manzana (<i>Malus spp.</i>)	0.5-1.6 b.h.; 5.5 b.s
Pulpa de manzana	1.5-2.5 b.h.
Torta de manzana (residuos)	17.5 b.s.
Plátano (<i>Musa acuminata L.</i>)	0.7-1.2 b.h.
Pulpa de remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	1.0 b.h.
Carambola (<i>Averrhoa carambola</i>)	0.66 b.h.
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	0.2-0.5 b.h.; 10.0 b.s.
Granadilla gigante (<i>Passiflora quadrangularis L</i>)	0.4 b.h.
Guayaba (<i>Psidium guajava L.</i>)	0.77-0.99 b.h.
Pulpa de limón (<i>Citrus limon</i>)	2.5-4.0 b.h.; 25 b.s.
Lichi (<i>Lichi chinensis S.</i>)	0.42 b.h.
Mango (<i>Mangifera indica L.</i>)	0.26-0.42 b.h.
Cáscara de naranja (<i>C. sinensis</i>)	3.5-5.5 b.h.
Papaya (<i>Carica papaya</i>)	0.66-1.0 b.h.
Fruta de pasión (<i>Passiflora edulis S.</i>)	0.5 b.h.
Cáscara de fruta de pasión	2.1-3.0 b.h.
Melocotones (<i>Prunus persica</i>)	0.1-0.9 b.h.
Piña (<i>Ananna comosis L.</i>)	0.04-.13 b.h.
Fresas (<i>Fragaria ananassa</i>)	0.6-0.7 b.h.
Tamarindo (<i>Tamarindus indica L.</i>)	1.71 b.h.
Zarza hoja de rosa (<i>Rubus rosafolius</i>)	0.72 b.h.
Fruta de tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	0.2-0.6 b.h.; 3.0 b.s.
Patata	2.5 b.s.
Girasol	25.0 b.s.
Albedo de agrios	32.5 b.s.
Fibra de algodón	0.7 b.s.
Pepitas de limón	6.0 b.s.
Corteza de limón	32.0 b.s.

Nota: b.s.: base seca, b.h.: Base húmeda.

Dentro del vegetal existe una distribución de las pectinas; las más esterificadas están en la parte más interna y las menos esterificadas en la periferia (Seymour & Knox, 2002).

Las pectinas se encuentran asociadas con otros hidratos de carbono, principalmente con hemicelulosas en las paredes celulares de frutas y vegetales; y son responsables de la firmeza de algunos productos.

Las propiedades físicas (viscosidad, gelificación, estabilización y emulsión) y químicas (contenido de metoxilo, ácido galacturónico y grado de esterificación) en la molécula de pectina, dependen de su origen, del estado de maduración de la fuente de donde provienen, y de la metodología de extracción, estableciéndose variaciones en cuanto a sus características más importantes.

Las pectinas se utilizan como aditivo y como fuente de fibra dietética en los alimentos. A su vez, los geles de pectina son importantes para crear o modificar la textura de un producto o mezcla.

1.6.1 Estructura química de las pectinas

La estructura básica de las pectinas está constituida por tres polisacáridos “pécticos”, todos con ácido galacturónico (AGal). 1) Homogalacturano (HG), 2) Ramnogalacturano I (RGI) y 3) Ramnogalacturano II (RGII).

El ramnogalacturano y el homogalacturano constituyen el esqueleto principal de los polímeros “pécticos” como se muestra en la Figura 1.6 A. Sin embargo, recientemente se ha propuesto una estructura alternativa (Figura 1.6 B), en la cual el homogalacturano es una cadena lateral o ramificación de la cadena principal de ramnogalacturano (Willats et al., 2006).

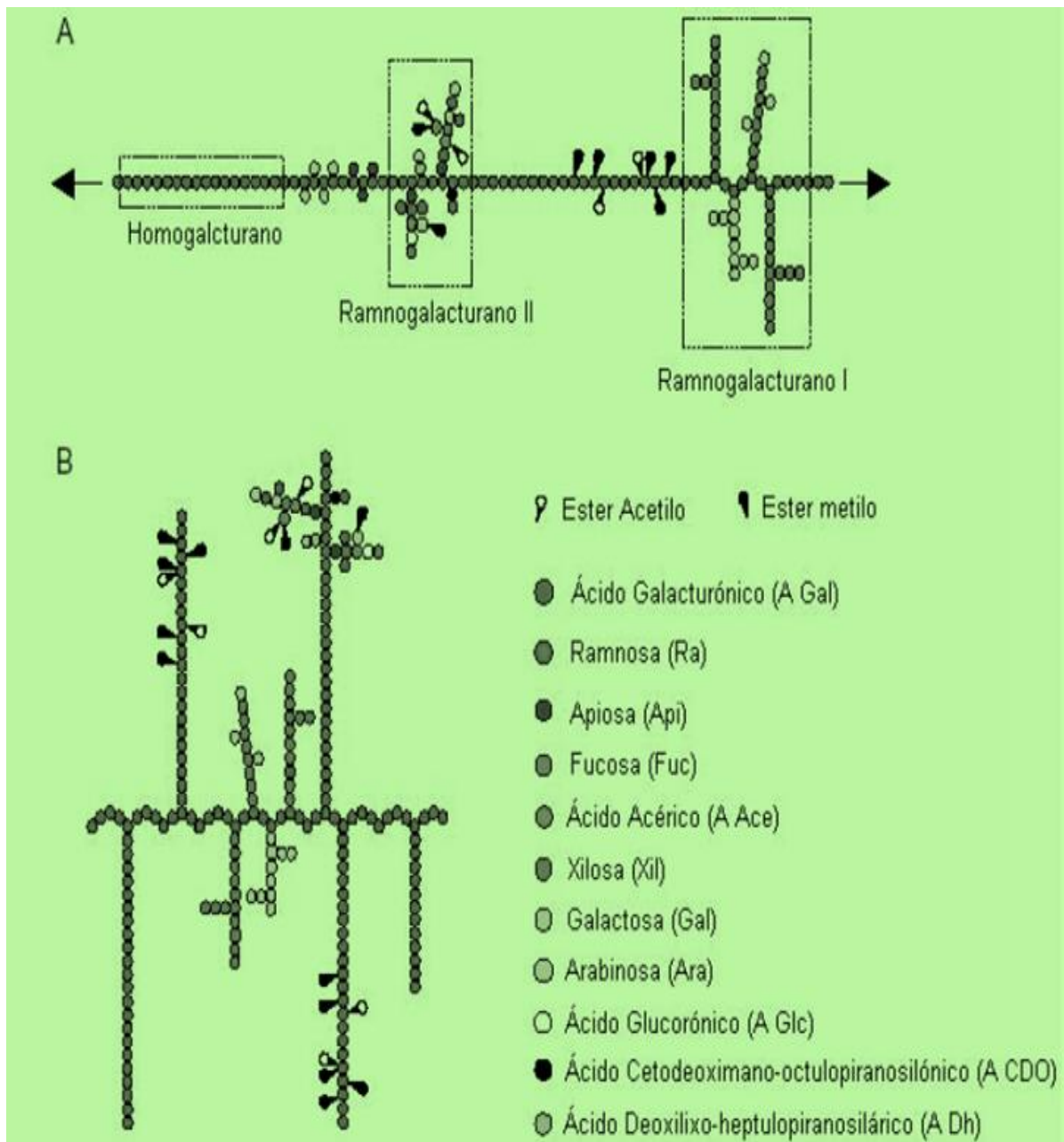


Figura 1.6. Representación esquemática de la estructura de pectina. A) Estructura convencional y B) alternativa, recientemente propuesta.

El homogalacturano (HG) es un polímero lineal constituido por $(1\rightarrow4)\text{-}\alpha\text{-D-ácido galacturónico}$. El ramnogalacturano I (RGI). Es un polímero cuya unidad estructural básica es el disacárido $[\rightarrow4)\text{-}\alpha\text{-D-AGal-(1}\rightarrow2)\text{-}\alpha\text{-L-Ram-(1}\rightarrow]$ con cadenas de azúcares, principalmente arabinosas y galactosas, unidas a las ramnosas. Mientras que el ramnogalacturano II (RGII), es llamado confusamente así, ya que su cadena

principal es un homogalacturano en lugar de un ramnogalacturano, con cadenas laterales compuestas de diversos azúcares, unidos a los residuos de ácido galacturónico.

Las moléculas de ácido D-galacturónico están unidas por enlaces glucosídicos α -D-(1 \rightarrow 4), en la cual algunos de los carboxilos pueden estar en forma de sal o esterificados con metilos como se muestra en la Figura 1.7.

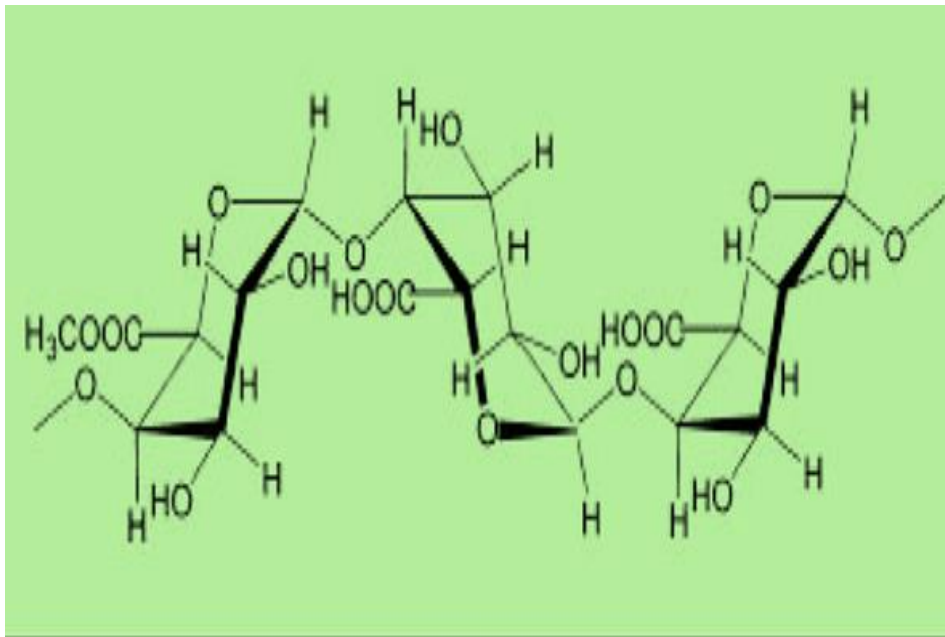


Figura 1.7. Estructura química de las pectinas (Nordby et al., 2003).

1.6.2 Grado de esterificación de las pectinas

Independientemente de la estructura secundaria de las pectinas, el ácido galacturónico presente tanto en la cadena de homogalacturano como de ramnogalacturano puede estar metil-esterificado y/o acetilado; y en ambos, el grado de esterificación (GE) y de acetilación (GA), tienen un fuerte impacto sobre las propiedades funcionales.

De acuerdo con su esterificación, las pectinas se clasifican en “alto éster” o “bajo éster”, indicadas a través de grados de esterificación >50% y <50%, respectivamente (Willats et al., 2006). Cuando más del 50% de los grupos carboxilo del ácido galacturónico de la pectina se encuentra esterificados con metanol, se conocen como pectinas de alto metoxilo. Estas pectinas son capaces de formar geles en condiciones de pH entre 2.8 y 3.5 presentan un contenido de sólidos solubles (azúcar) entre 69 y 70 °Bx (Ardila, 2007).

La adición de más azúcar en este tipo de pectinas ejerce efecto “deshidratante” sobre los polímeros, lo que favorezca las interacciones polisacárido-polisacárido de manera hidrófoba, y crece una estructura tridimensional que rodea las moléculas de sacarosa altamente hidratadas, por lo que aumenta el poder de gelificación.

El grado de metilación en las pectinas contribuye por un lado a regular la velocidad de gelificación y también es responsable de algunas propiedades organolépticas de las pectina-azúcar ácido que forman las pectinas de alto metoxilo.

A su vez, las pectinas de alto metoxilo se pueden dividir en dos grupos, las de gelificación rápida, que tienen un tiempo de gelificación menor a cinco minutos y un grado de esterificación con metanol entre 68 y 75%, y las de gelificación lenta, que tienen un tiempo de gelificación mayor a cinco minutos y un grado de esterificación con metanol entre 60 y 68% (Ferreira-Dias et al., 2003).

La proporción entre grupos hidrofóbicos e hidrofílicos en la molécula de la pectina determina su solubilidad. El grupo éster es menos hidrofílicos que el grupo ácido y en consecuencia una pectina de alto metoxilo con un grado de esterificación mayor gelifica a temperaturas más altas que otra con menor grado de esterificación. Esta diferencia se refleja en la clasificación de las pectinas como pectinas de gelificación rápida, normal o lenta.

Con respecto a las pectinas de bajo metoxilo, éstas requieren de la presencia de cationes divalentes, para la formación de gel; comúnmente se emplea el calcio. En este caso la formación del gel ocurre por la formación de enlaces de dichos cationes con moléculas de pectina adyacentes formando una red tridimensional con los grupos carboxilo de la pectina (Ardila, 2007).

Dentro de las pectinas de bajo metoxilo, también se encuentran las pectinas amidadas las cuales son pectinas obtenidas a partir de otras pectinas de alto metoxilo mediante una esterificación alcalina con amoníaco, el grado de amidación y el grado de metoxilación fijan el poder gelificante de la pectina.

Los geles de pectina se pueden obtener entre pH 1.0 a 7.0 o incluso uno superior; el pH no afecta la textura del gel ni el intervalo de sólidos solubles y puede fluctuar entre 0 y 80%. Sin embargo, la presencia de calcio o magnesio (40 y 100 mg/L) en pectinas de bajo metoxilo, es el factor predominante en la formación del gel.

La cantidad de calcio o magnesio necesaria para la formación de gel depende de la cantidad de sólidos solubles así, para 30% de sólidos solubles se requieren de 40 a 100 mg/L de calcio y para 45% de sólidos solubles de 20 a 40 mg/L de calcio (Ardila, 2007).

De acuerdo a la velocidad de gelificación, las pectinas de bajo metoxilo pueden dividirse en tres grupos, 1) las de gelificación rápida que posee una alta reactividad con iones calcio y contienen un grado de esterificación aproximadamente del 30%; 2) las de gelificación media, que posee en una reactividad intermedia y contiene un grado de esterificación aproximada del 32%; y 3) las de gelificación lenta que posee una reactividad media con iones calcio y contienen un grado de esterificación aproximada del 35% (Seixas et al., 2014).

Otra clasificación de las pectinas obedece al número de grupos carboxílicos que están esterificados en la cadena o polímero.

Cuando todos los carboxilos están esterificados, la pectina se llama protopectinas; mientras que las que poseen un contenido medio de éster metílico, se les llama ácidos pectínicos. Las sales de estos ácidos se denominan pectatos.

También existen aquellas pectinas que contienen ácidos pécticos, que son compuestos que no poseen grupos carboxílicos esterificados. Las sales de los ácidos pectínicos se llaman pectinatos.

La principal característica de estas pectinas es su capacidad de formar geles en presencia de suficientes sólidos solubles, ácidos o iones polivalentes. y reaccionan fácilmente con los iones calcio de las células para producir compuestos insolubles en los jugos de frutas, dando un precipitado visible comúnmente en la separación de fases o abanderamiento en los néctares.

El mayor uso de la pectina se encuentra en el sector alimenticio y médico. Generalmente se utilizan como agentes gelificantes en mermeladas y jaleas (manufacturadas con pectinas de bajo grado de esterificación), gelatinas (con pectinas de alta esterificación) y también se usa para estabilizar de forma eficaz los jugos de frutas y bebidas acidificadas de leche (Srivastava & Malviya, 2011), confitería, productos de relleno y glaseado en panes, bebidas de frutas fortificadas con proteína y antioxidantes (Wicker et al., 2014). Se emplea en pastas, helados y productos cárnicos emulsionados, la pectina se desempeña como sustituto de grasa (Prakash Maran et al., 2013).

Las pectinas de bajo grado de metoxilación, también se pueden emplear normalmente en la elaboración de recubrimientos comestibles ya que son capaces de formar geles firmes en presencia de iones de calcio, los cuales forman puentes estables con los grupos carboxilos de la pectina (Mancini & McHugh, 2000).

Otra de las grandes propiedades de las pectinas es su poder emulsificante; tal es el caso de la pectina de la remolacha azucarera que muestra propiedades gelificantes deficientes, pero excelentes propiedades emulsionantes (Zhang et al., 2013).

Con respecto a la aplicación de la pectina en la medicina, ésta disminuye la grasa en la sangre, alivia dolor (Liu et al., 2010), reduce la incidencia de enfermedades cardíacas (Bagherian et al., 2011), inhibe la lipasa (Kumar & Chauhan, 2010), el crecimiento y la metástasis de las células cancerosas e induce su apoptosis (Jackson et al., 2007), lo cual permite su uso en la industria farmacéutica. Además, la pectina también se ha explotado para la administración de fármacos, la administración de genes, la cicatrización de heridas (permite la eliminación de exudados, crea un ambiente ácido, no apto para el crecimiento bacteriano) y la ingeniería de tejidos (Munarin et al., 2012).

1.7 *Opuntia robusta*, fuente de origen de pectinas

La *Opuntia* es un género de plantas de la familia de las cactáceas llamada comúnmente nopal. Consta de más de 300 especies, las cuales se diferencian por el grosor, color y espinas de sus tallos, y por el color, espinas y forma de su fruto, al cual se le llama tuna cuando tiene un sabor dulce, y cuando el sabor es ácido se denomina xoconostle (Granados Sánchez et al., 1991).

Actualmente, tanto el nopal como su fruto son de gran interés para la ciencia, industria alimentaria, fármaco y de plásticos, ya que ha demostrado un alto contenido en antioxidantes, entre los que se encuentran los polifenoles, betalaínas en su fruto y vitamina C entre otros. Además, es una fuente natural de minerales (K, Ca, Na, Fe, Mg, Mn, Zn), ácidos orgánicos (málico, oxálico y otros), aminoácidos (alanina, arginina, asparagina, ácido glutámico, glutamina, histidina, metionina, prolina, serina, valina y otros en menores cantidades). También es rico en azúcares, fibra, celulosa y pectina. Dado los componentes químicos que contiene, la opuntia es conocida en el área

médica por su funcionalidad nutricional y gran aporte de calcio y fibra (Yahia & Mondragon Jacobo, 2011).

Entre las variedades del fruto de *Opuntia* que son de interés comercial por su consumo, son las pertenecientes a los grupos *Opuntia ficus-indica*, *O. streptacantha*, y de *Castilla* las cuales son conocidas como tuna de agua, tuna fina y tuna blanca.

También existen otras que por sus características no son comerciales, ya que son más pequeñas, menos jugosas y su corteza es más gruesa y contiene mayor cantidad de espinas. Entre este tipo se encuentran la, *O. robusta* y *O. leucotricha*. Los nombres comunes con los que se conocen estas variedades son tuna taponá, tuna cardona y tuna cascarona.

Particularmente la *O. robusta* crece en áreas silvestres, su consumo es bajo y básicamente se llega a consumir por la población aledaña y por los animales.

Por su bajo consumo, es vista comúnmente tirada en los plantíos, y se considera un residuo agrícola.

La tuna es una falsa baya con ovario ínfero simple y carnoso. Los frutos pueden ser ovoides, redondos, elípticos y oblongos, con los extremos aplanados, cóncavos o convexos. Los colores son diversos: pueden encontrarse frutos rojos, anaranjados, púrpuras, amarillos y verdes, con pulpas también de los mismos colores. La epidermis de los frutos es similar a la del cladodio, incluso con aréolas y abundantes gloquidios y espinas, que a diferencia del cladodio, persisten aún después de la sobre madurez del fruto.

La cáscara de los frutos difiere mucho en grosor, siendo también variable la cantidad de pulpa, la cual es jugosa y dulce. Esta última presenta numerosas semillas, que se consumen junto con la pulpa. Hay frutos que presentan semillas abortadas, lo que aumenta la proporción de pulpa comestible.

En general, cualquier clase de tuna posee propiedades bioactivas, pero especialmente algunas variedades presentan una importante actividad antioxidante, teniendo la posibilidad de producir alimentos funcionales con un alto valor agregado.

Tanto los cladodios como los frutos de *Opuntia* contienen pectinas, cuyas propiedades reológicas que van desde gelificantes, espesantes y emulsificantes (Martínez et al., 2010; Sumaya-Martínez et al., 2011).

La presencia de pectinas en varias especies de *Opuntia* de México fue documentado desde hace casi tres décadas (Goycoolea & Cardenas, 2003).

La Tabla 1.7 muestra los datos de estos primeros estudios en los que se compararon los contenidos de pectina encontrados en ocho especies y variedades de *Opuntia*. El rendimiento de pectina soluble fue de 0.13 a 2.64% en base húmeda y de 1 a 23.87% en peso seco.

Tabla 1.7. Contenido de pectina en algunas especies de *Opuntia* y en algunas frutas (Goycoolea & Cardenas, 2003).

Especie	Pectina Total (%)	
	Peso húmedo	Peso seco
<i>Opuntia ficus-indica</i> var I	1.91	13.84
<i>O. ficus.indica</i> var II	1.10	8.39
<i>O. spp. (Blanca I)</i>	0.95	7.6
<i>O. spp (Blanca II)</i>	0.84	7.05
<i>O. amyloacea</i>	1.40	9.58
<i>O. megacantha</i>	0.80	5.06
<i>O. streptacantha</i>	0.97	6.59
<i>O. robusta</i>	3.30	26.61
Orujo de manzana	0.5-1.06	10-15
Cáscara de cítricos	-	20-30

Se hace hincapié en el alto contenido de pectina encontrado para *O. robusta* en comparación con *O. ficus indica* y las otras especies. Es interesante observar que el contenido de pectina en *O. robusta* está dentro del intervalo reportado para cáscara

de cítrico (20 a 30%), la cual constituye una fuente industrial de pectina. Por lo que esta variedad de Opuntia puede ser atractiva para la obtención de pectina.

2 MÉTODO

En la Figura 2.1 se muestra el desarrollo experimental para la presente investigación.

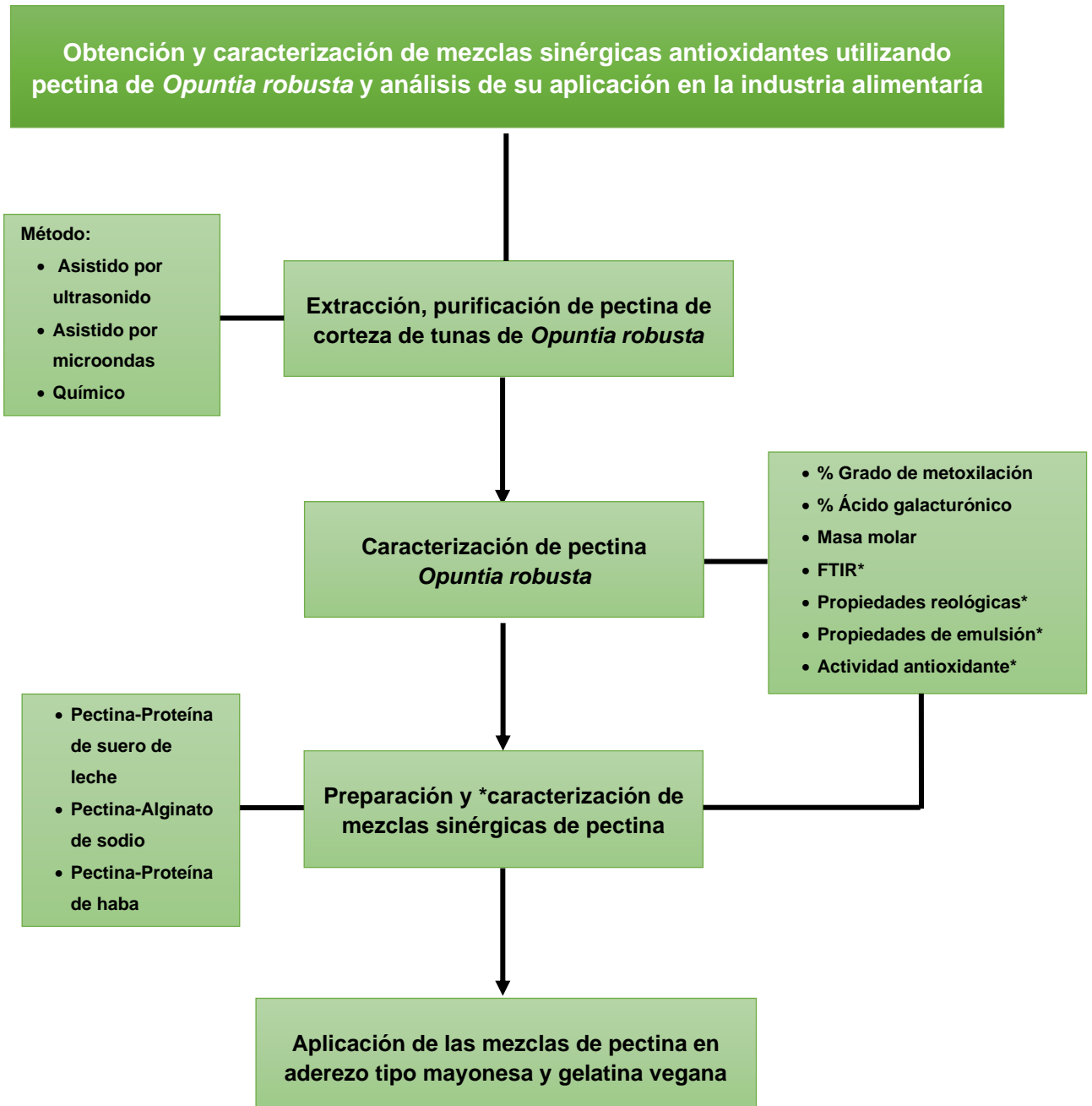


Figura 2.1. Bosquejo del método.

2.1 Extracción y caracterización de pectina de la corteza de *O. robusta*

2.1.1 Extracción de pectina de la corteza de *O. robusta*

Se utilizó la corteza de tuna *Opuntia robusta* (tuna silvestre) como fuente de obtención de pectina. Las tunas de *O. robusta* se recolectaron directamente del campo (de una parcela de San Antonio Calpulalpan, Tlaxcala, México). Se tomó un lote de 5 kg separado a su vez esta cantidad en lotes pequeños de 500 g colocados en bolsas de polietileno debidamente etiquetadas para pruebas subsecuentes.

El procedimiento de extracción inicio con el lavado de las tunas con agua de la llave, se le quitaron las espinas con un cuchillo y se separó la corteza del fruto.

El fruto se guardó en refrigeración y las cortezas se cortaron en trozos pequeños y se trituraron perfectamente en una licuadora Osterizer BLENDER, se secaron en un horno con recirculación de aire Riossa Digital FCF-62B a 45 °C durante 48 h, se trituraron y guardaron herméticamente en un recipiente de vidrio hasta su uso en la extracción.

Para llevar a cabo la extracción de pectinas se utilizaron dos métodos 1) asistido por microondas (MAE) y 2) método químico (Q).

1) Asistido por microondas (MAE). La extracción se llevó a cabo usando 1.5 g de muestras seca y se adicionaron 50 mL de agua destilada ajustando su pH a 1.8 (con HCl 5 M), se colocó en un baño ultrasónico (Bransonic CPX1800H, Emerson, México) a 60 °C durante 60 min. Posteriormente, la muestra tratada se transfirió a un microondas MARSX CEM, usando el método pectina, que consiste en el uso de potencia de 1200 W, con una rampa de calentamiento de 0-90 °C en 40 min, con un periodo de mantenimiento de 60 min en 90 °C, un periodo enfriamiento de 10 min, usando contenedores para ácidos HP-500 plus.

2) Químico (Q). Se pesaron 5 g de cáscara de tuna seca y se colocaron en un matraz de 250 mL y se sometieron a una extracción secuencial de 3 etapas. En la primera etapa, la extracción se realizó con agua destilada (150 mL) a temperatura ambiente, durante 2 h. En la segunda etapa el extracto en solución fue eliminado y los sólidos se suspendieron en agua destilada (150 mL) durante 2 h a 60 °C. En la tercera etapa, el extracto en solución se eliminó y a los sólidos se resuspendieron en una solución acuosa de ácido acetilendiamino tetracético (EDTA) 1.0% (150 mL) durante 2 h a 70 °C (pH 4.0).

Una vez que se enfrió la mezcla proveniente de cada método, se filtró y el recuperado de la filtración, se mezcló con alcohol etílico absoluto en una proporción 1:2, y se dejó reposar por una noche para precipitar las pectinas a una temperatura de 5 °C.

Después de la precipitación, las muestras se centrifugaron a 2408 x g durante 5 min, se decantaron y recuperando el sólido obtenido como pectina.

El producto se secó a 40 °C; ya seco, se trituró en un mortero onix, se pesó y se guardó en un recipiente cerrado para su posterior análisis.

Finalmente, de cada muestra se calculó el porcentaje de rendimiento en la extracción (R) de pectina obtenido de acuerdo a la Ecuación 1.

$$R (\%) = \frac{MPE}{MR} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

MPE=masa de la pectina extraída (g)

MR=masa de cáscara (g)

2.1.2 Caracterización de pectina de *O. robusta*

Para la caracterización de la pectina se determinaron las siguientes propiedades. Porcentaje de metoxilación, porcentaje de ácido galacturónico, masa molar, análisis de grupos funcionales mediante FTIR en base al ácido galacturónico, actividad antioxidante, propiedades de emulsión y reológicas.

2.1.2.1 Grado de metoxilación y porcentaje de ácido galacturónico

En el análisis del grado de metoxilación (DE), se utilizó un método volumétrico según siguiendo la metodología establecida en United States Pharmacopeia National Formulary (Rockville. Us. United States Pharmacopeial Convention, 2003) con una ligera modificación.

Las muestras de pectina (100 mg) se transfirieron a un matraz de 250 mL, se humedecieron con 2 mL de etanol y se disolvieron en 20 mL de agua libre de dióxido de carbono. Después de que las muestras se disolvieron completamente, la solución se tituló con NaOH 0.1 N en presencia de cinco gotas de indicador de fenolftaleína y el resultado se registró como el volumen 1 (V1). A continuación, se añadieron 10 mL de NaOH 0.1 N bajo agitación y la mezcla se dejó reposar durante 15 minutos para desesterificar la pectina antes de añadir 10 mL de HCl 0.1 N, seguido de agitación hasta desaparecer el color rosa. Se añadieron tres gotas de fenolftaleína y se tituló la solución con NaOH 0.1 N hasta un color rosa débil que persistió después de agitación vigorosa (punto final). Este volumen de titulación se registró como el título de saponificación (V2). El grado de esterificación se calculó con la Ecuación 2.

$$DE (\%) = \frac{V_2}{V_1+V_2} \times 100 \quad (2)$$

El porcentaje de ácido galacturónico (AG) fue determinado conjuntamente con el grado de metoxilación. Cada mL de solución 0.1 N de hidróxido de sodio consumido en la valoración total (valoración inicial más valoración de saponificación, determinadas en

grado de esterificación), fue equivalente a 97.07 mg de $C_6H_{10}O_7$. Para calcular el porcentaje de ácido galacturónico se utilizó la Ecuación 3.

$$AG (\%) = \frac{(V_1+V_2+10)N \text{ NaOH}-(10xN \text{ HCl})(194.14)}{m} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

V_1 = Volumen inicial de NaOH gastado (mL)

V_2 =Volumen final de NaOH gastado (mL)

m =Peso de la muestra (mg)

$N \text{ NaOH}$ N =Normalidad del Hidróxido de sodio

$N \text{ HCl}$ =Normalidad del Ácido clorhídrico

194.14=masa molar del ácido galacturónico (g/mol)

2.1.2.2 Viscosidad intrínseca y masa molar

La masa molar de las pectinas se determinó a partir de los datos de viscosidad intrínseca y la ecuación de Mark-Houwink. La viscosidad intrínseca, $[\eta]$, se determinó a partir de la viscosidad específica, η_{sp} , calculada con la ecuación (4), y la viscosidad reducida, η_r , dada por la ecuación (5). En la ecuación (4) η y η_s son las viscosidades de las soluciones de pectina (Pa.s) y el disolvente; 0.1 mol/L de cloruro de sodio acuoso (Pa.s), respectivamente. La concentración de soluciones de pectina, C , se expresa en g/dL.

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_s}{\eta_s}$$

(4)

$$\eta_r = \frac{\eta_{sp}}{C} \quad (5)$$

Las viscosidades de las soluciones de pectina se determinaron a 25 °C en un reómetro rotatorio (RheolabQC, Anton Paar, Alemania) utilizando el accesorio de cilindros coaxiales de doble pared (diámetro de copa = 44.15 mm, diámetro exterior del estator = 42 mm, diámetro interno de rotor = 39 mm, diámetro externo de rotor = 41.15 mm, longitud de inmersión=60.00 mm). Las concentraciones de pectina fueron 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 g/dL.

La viscosidad intrínseca $[\eta]$ se expresó de acuerdo con la ecuación (6). Este valor se calculó por extrapolación a concentración cero a partir de la gráfica η_r contra C de acuerdo con la ecuación de Huggins (7).

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{C} \quad (6)$$

$$\frac{\eta_{sp}}{C} = [\eta] + k_H [\eta]^2 C \quad (7)$$

La masa molar de pectina se estimó a partir de la ecuación de Mark-Houwink (8);

$$[\eta] = k \bar{M}_v^a \quad (8)$$

Donde:

\bar{M}_v = masa molar promedio

$k = 9.55 \times 10^{-4}$ dL/g

$a=0.73$ a 25 °C para la pectina (Zouambia et al., 2017).

2.1.2.3 Análisis infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR)

Para el análisis de grupos funcionales, se tomó como base el ácido galacturónico. Se utilizó un espectrofotómetro FT-IR Varían 640-IR equipado con un ATR. Las regiones

espectrales utilizadas fueron de 4000 a 500 cm^{-1} , con 20 exploraciones y una resolución de 4 cm^{-1} . Se usó el software "Resolutions Pro". Los datos fueron procesados en Origin Pro 2016 software 93, para su presentación.

2.1.2.4 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante (AA) de la pectina se determinó a partir de la actividad de barrido de los radicales libres DPPH \cdot ; ABTS \cdot^+ y el contenido de polifenoles estables.

Las pruebas DPPH \cdot y ABTS \cdot^+ se realizaron mediante un método colorimétrico utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (Perkin-Elmer, Lambda 35, EE. UU.).

Se prepararon muestras de pectina de 20mg/mL en agua destilada y solución de ácido ascórbico a la misma concentración, esta última para utilizarla como estándar de comparación. Para esto se mezclaron 4 mililitros de una solución de DPPH \cdot 100 $\mu\text{mol/L}$ en etanol al 80% con 2 mL de la solución de muestra. La absorbancia se midió después de 30 minutos en la oscuridad a 521 nm.

El radical ABTS \cdot^+ se generó a 25 °C a partir de 7 mmol/L de ABTS y 2.45 mmol/L de soluciones acuosas de persulfato de potasio entre 12 y 16 h antes de usarlo. Una muestra de esta mezcla se diluyó en etanol absoluto hasta una absorbancia de 0.70 ± 0.1 a 750 nm. Posteriormente, se mezclaron 2 mL de una solución de muestra de 0,5 mg/mL con 4 mL de la solución diluida por radicales libres. La mezcla se mantuvo durante 6 min en la oscuridad a 25 ° C y luego se midió la absorbancia a 752 nm. Todas las pruebas se realizaron por duplicado.

Las actividades de barrido de DPPH \cdot y ABTS \cdot^+ se calcularon con la ecuación (9).

$$AA (\%) = \frac{B-(S-S_c)}{B} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

B =Absorbancia del blanco (solución de DPPH y ABTS)

S =Absorbancia de la muestra de pectina

S_c =Absorbancia de la muestra control (ácido ascórbico)

Los polifenoles totales de pectina I y II se midieron con el método colorimétrico Folin-Ciocalteu. Se mezcló un volumen de 2 mL de 0,5 mg/mL de pectina en agua con 4 mL de solución de carbonato de sodio al 7,5% y 1 mL de reactivo Folin-Ciocalteu de 1 eq/L (Sigma-Aldrich, México). La mezcla se dejó a temperatura ambiente durante 30 minutos. La absorbancia de las mezclas se midió a 700 nm después de la centrifugación (Hettich EBA 20, Alemania) a 1300 x g durante 5 min. La concentración de polifenoles se calculó por referencia a una curva de ácido gálico como estándar en el rango de concentración de 0-50 µg/mL.

2.1.2.5 Propiedades de emulsión

Para determinar las propiedades de emulsión, se prepararon suspensiones de pectina, mezclando 10 mL a una concentración de 2% (p / v) con 5 mL de aceite de maíz y se homogeneizaron durante 3 min usando un homogeneizador Heidolph SilentCrusher M a temperatura ambiente (25 °C). Las emulsiones obtenidas se centrifugaron durante 5 min a 2038 x g usando una centrífuga Hettich EBA 20. La capacidad de emulsión (CE) se estimó de acuerdo a la ecuación 10:

$$CE(\%) = \frac{V_f}{V_i} \times 100 \quad (10)$$

Donde

V_f = es el volumen de la emulsión (mL)

V_i = es el volumen total (mL).

La estabilidad de la emulsión (EE) se determinó incubando las emulsiones a 80 °C durante 30 min, posteriormente cada una se centrifugó a 2038 x g durante 5 min y se evaluó el porcentaje de EE con la siguiente ecuación:

$$EE(\%) = \frac{V_T}{V_f} \times 100 \quad (11)$$

Donde

V_T es el volumen de la emulsión después de la incubación y la centrifugación (mL)

La resistencia al almacenamiento de las emulsiones (RAE) se determinó almacenando en refrigeración las muestras a una temperatura de 4 °C durante un mes, para después centrifugarlas a 2038 x g durante 5 min y evaluar su resistencia de almacenamiento con la ecuación 10.

2.1.2.6 Propiedades reológicas

Las propiedades reológicas que se determinaron de las pectinas fueron la viscosidad aparente, tipo de fluido, y propiedades de gel para ello se utilizó un reómetro Anton Paar rotatorio y oscilatorio. Las determinaciones se realizaron a en dos pruebas: pruebas de cizalla simple estacionaria y pruebas de cizalla oscilatoria de pequeña amplitud. Enseguida se describe el procedimiento utilizado para cada propiedad reológica.

Para la determinación de viscosidad dependiendo de la concentración se midieron en soluciones de pectina de 10, 20 y 40 mg/mL y el cambio de la viscosidad de la pectina en función de la temperatura y el pH se midió en soluciones de 40 mg/mL en un rango de temperatura de 0-45 °C. Para la variación de pH se prepararon soluciones a pH 4, 7 y 9 ajustando el pH con NaOH o HCl 0.1 M. Las soluciones se prepararon calentando hasta 80 °C en una parrilla magnética, una vez disuelto el polímero, las soluciones se enfriaron a temperatura ambiente.

Para cada prueba, la viscosidad de las soluciones de pectinas se determinó en un reómetro rotatorio, RheolabQC, Anton Paar, Alemania. Con una geometría de cilindros coaxiales de doble pared (diámetro de copa = 44.15 mm, diámetro exterior del estator = 42 mm, diámetro interno de bob = 39 mm, diámetro externo de bob = 41.15 mm, longitud de inmersión=60.00 mm) con un intervalo de velocidad de cizalla 0.1 a 1000 s⁻¹ y a 25 °C. Cada prueba se hizo por duplicado.

Los datos (viscosidad y velocidad de cizalla) se graficaron usando el programa OriginPro 2016 software 93 y se ajustaron a modelos reológicos de Newton (Ecuación 12) y al de Ostwald-de Waele (Ecuación 13),

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (12)$$

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (13)$$

Donde:

σ =esfuerzo cortante (Pa)

η =es la viscosidad aparente (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ =Velocidad de cizalla (s⁻¹)

k =índice de consistencia (Pa sⁿ),

n =índice de comportamiento del flujo adimensional

Si $n < 1$ el fluido es adelgazante $n > 1$ el fluido es espesante y $n = 1$ fluido newtoniano

Las propiedades viscoelásticas de los geles pectina se determinaron por la variación con la frecuencia angular del módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en un reómetro oscilatorio (reómetro compacto modular 302 Anton Paar) con las placas paralelas accesorio (diámetro = 50 mm y espacio de 1 mm).

Se aplicaron barridos de deformación por oscilación para determinar la extensión de la zona de viscoelasticidad lineal (ZLV) a una frecuencia constante de 1 Hz a 25 ° C y de 0.1 a 100 rad/s con 0.01% de deformación dentro del ZLV.

Los geles de pectina se prepararon mezclando 20 mL de solución de pectina (50 mg / L) con 12 g de sacarosa para pectina I y 15 mL de solución de cloruro de calcio dihidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) al 30% para pectina II. Ambas mezclas de pectina se colocaron a 4 °C durante 24 h sobre superficies de vidrio hasta la formación de gel. Se cortaron discos de 25 mm para llevar a cabo la medición.

2.2 Preparación y caracterización de mezclas de pectina de *O. robusta* con hidrocoloides

Para la preparación de mezclas sinérgicas de pectina de *O. robusta* se realizaron en dos etapas, esto debido a la obtención de dos tipos de pectina de *O. robusta*, bajo metoxilo (obtenida por el método químico) y alto metoxilo (obtenida por el método combinado UAE y MAE).

Se realizaron mezclas de pectina con proteína de suero de leche, alginato de sodio y proteína de haba.

Los hidrocoloides que se emplearon fueron: alginato de sodio de Sigma-Aldrich, proteína de suero de leche y proteína de haba extraído en el laboratorio.

Para obtener las proteínas de suero de leche se filtró el suero de leche con papel filtro y una cama de tierra diatomácea para eliminar la grasa, después se pasó por una membrana de 6 kDa para eliminar lactosa, agua y sales y obtener el concentrado de proteína de suero de leche.

La proteína de haba se obtuvo llevando a cabo una hidrólisis, para la cual se utilizaron 10 g de harina de haba en 600 mL de agua, se ajustó el pH a 8.0 (con NaOH 0.5 N), se agitó durante 1 h a 40 °C, después se enfrió y centrifugó a 2408 x g durante 5 min, al sobrenadante se le ajusta el pH a 5.5 con HCl 0.5 N para precipitar la proteína.

Finalmente se centrifugo, separó y se puso a secar a 40 °C, se trituró en un mortero y se guardó en un recipiente cerrado.

El proceso de mezclado se llevó a cabo primero preparando las soluciones de los hidrocoloides en una concentración de 4 % (p/v). Todas las soluciones se agitaron durante 2 horas a 80 °C. Se enfriaron y mezclaron en una relación de 1:1, 1:3 y 3:1 donde el principal componente es la pectina de *O. robusta*.

Para su identificación de las mezclas de los hidrocoloides se generó la siguiente tabla (Tabla 2.1) donde se le asigna unas siglas a la mezcla de acuerdo a su componente y concentración.

Tabla 2.1. Identificación de hidrocoloides y de las mezclas de pectina de *O. robusta*.

Hidrocoloide	Identificación	Mezcla de hidrocoloide	Identificación
Pectina de bajo metoxilo	PBM	Pectina de bajo metoxilo y alginato de sodio	PBM-ALG
Pectina de alto metoxilo	PAM	Pectina de bajo metoxilo y proteína de haba	PBM-PHAB
Alginato de sodio	ALG	Pectina de bajo metoxilo y proteína de suero de leche	PBM-PSUE
Proteína de haba	PHAB	Pectina de alto metoxilo y alginato de sodio	PAM-ALG
Proteína de suero de leche	PSUE	Pectina de alto metoxilo y proteína de haba	PAM-PHAB
		Pectina de alto metoxilo y proteína de suero de leche	PAM-PSUE

Para la caracterización de las mezclas de pectina de *O. robusta* (bajo y alto metoxilo) y los hidrocoloides, así como de estos de forma individual, se determinaron las siguientes propiedades. Análisis de grupos funcionales mediante FTIR, actividad antioxidante (técnica de DPPH, ABTS y Fenoles totales), propiedades de emulsión y reológicas (viscosidad y tipo de fluido a una concentración de 1 y 2%).

2.3 Aplicación de las mezclas en un producto alimentario

2.3.1 Preparación de aderezo tipo mayonesa con mezclas de hidrocoloides

Se prepararon dispersiones al 4% p/v de pectina de bajo metoxilo de *O robusta*, alginato de sodio, proteína de haba en agua destilada mediante agitación mecánica durante 30 min a 80 °C. Se dejaron enfriar y se mezclaron en diferentes proporciones como se muestra en la Tabla 2.2 con el homogeneizador Heidolph SilentCrusher M a 5 000 r/min durante 3 min a temperatura ambiente (25 °C).

Tabla 2.2. Mezclas de pectina utilizadas en la preparación del aderezo de mayonesa.

Mezcla de hidrocoloides	Identificación de muestra
Pectina-Alginato de sodio	PBM-ALG 1:1
Pectina-Alginato de sodio-Proteína de haba	PBM-ALG-PHAB 1:2:1
Pectina-Alginato de sodio-Proteína de haba	PBM-ALG-PHAB 2:1:1
Pectina-Alginato de sodio-Proteína de haba	PBM-ALG-PHAB 1:1:1

La fórmula y el método de preparación del aderezo tipo mayonesa se modificaron a partir de la investigación de Sun et al. (2018). La fase acuosa se preparó en primer lugar mezclando todos los ingredientes (mezcla de hidrocoloides, huevo, jugo de limón, sal, azúcar y mostaza). Los aderezos tipo mayonesa se preparó mezclando el aceite de girasol y fase acuosa utilizando un homogeneizador Heidolph SilentCrusher M a 10 000 r/min durante 4 min a temperatura ambiente (25 °C). La fórmula del aderezo tipo mayonesa se muestra en la Tabla 2.3.

Para la caracterización del aderezo tipo mayonesa se determinaron las propiedades de emulsión, la capacidad de emulsión y la estabilidad térmica.

Para enriquecer el estudio de estabilidad térmica se hicieron muestras de mayonesas y se almacenaron a temperatura ambiente (25 °C) y a refrigeración (4 °C) para observar si hay separación de fases.

Tabla 2.3. Formulación del aderezo tipo mayonesa

	Porcentaje (%)	Peso (g)
Mezcla de pectina	46.87	9.60
Huevo	7.81	1.60
Limón	7.81	1.60
Sal	2.15	0.44
Azúcar	0.97	0.20
Mostaza	0.20	0.04
Aceite de girasol	34.18	7.00

2.3.1.2 Evaluación sensorial del aderezo de mayonesa

Se prepararon muestras del aderezo tipo mayonesa y se almacenaron a 4°C. Después de un día de almacenamiento se llevó a cabo una evaluación sensorial, se empleó a 31 personas para hacer la evaluación, se usó una escala hedónica de 9 puntos (Tabla 2.4), evaluaron diversas características sensoriales de los aderezos tipo mayonesa, incluyendo apariencia, color, olor, cremosidad, sabor y aceptabilidad general. Se incluyó una muestra control (mayonesa comercial McCormick). Para identificación de las muestras se emplearon una combinación de números de 4 dígitos. El formato empleado en la evaluación se encuentra en el Anexo 1.

Tabla 2.4. Escala hedónica en la evaluación sensorial del aderezo de mayonesa.

1= Me disgusta muchísimo
2=Me disgusta mucho
3=Me disgusta moderadamente
4=Me disgusta un poco
5=Ni me gusta Ni me disgusta
6=Me gusta
7=Me gusta moderadamente
8=Me gusta mucho
9=Me gusta muchísimo

2.3.2 Preparación de la gelatina vegana con mezclas de pectina

Para la preparación de las gelatinas veganas, se utilizaron dispersiones al 5% p/v de pectina de bajo metoxilo de *O robusta*, alginato de sodio, proteína de haba y agar en agua destilada. Se mezclaron en diferentes proporciones como se muestra en la Tabla 2.5 y se metieron a refrigeración (4 °C).

Tabla 2.5. Mezclas de hidrocoloides para gelatinas veganas.

Mezcla de hidrocoloides	Identificación de muestra
Pectina-Agar	PBM-AGA 4:1
Pectina-Agar-Alginato de sodio	PBM-AGA-ALG 2:1:2
Pectina-Agar-Alginato de sodio-Proteína de haba	PBM-AGA-ALG-PHAB 1:1:1:1
Pectina-Alginato de sodio	PBM-ALG 1:1
Pectina-Alginato de sodio-Proteína de haba	PBM-ALG-PHAB 2:1:1
Pectina-Alginato de sodio-Proteína de haba	PBM-ALG-PHAB 1:2:1

Se les realizaron pruebas reológicas (barrido de deformación o amplitud y un barrido de frecuencia) a las muestras de gelatina vegana de las mezclas de hidrocoloides, así como a la gelatina comercial al 3% p/v para observar sus diferencias.

3 RESULTADOS

3.1 Extracción de pectina de la corteza de *O. robusta*

En la Tabla 3.1 se presenta el porcentaje de rendimiento R (%), el grado de esterificación DE% y el tipo de pectina obtenido de *O. robusta* utilizando los métodos UAE-MAE y el método químico, Q cuya extracción sucesiva se distinguió por el uso de EDTA.

Los datos muestran que los rendimientos obtenidos con ambos métodos de extracción fueron semejantes, exhibiendo una pequeña diferencia, por lo que se estableció que los métodos utilizados no influyeron en el rendimiento de pectina.

Tabla 3.1. Rendimiento de la extracción de pectina de la cáscara de *O. robusta*.

Método de extracción de pectina	Rendimiento %	Grado de esterificación (DE %)	Tipo de pectina	Identificación de la pectina
UAE-MAE	14.64±0.25	66.66±0.12	Alto índice de metoxilo	PAM
Extracción sucesiva con EDTA	15.71±0.32	18.51±0.15	Bajo índice de metoxilo	PBM

En comparación con fuentes similares de pectina, la corteza de *O. robusta* dio como resultado un rendimiento equivalente a la corteza de tuna de *O. dillenii* (16-18%) (Kalegowda et al., 2017). También excedió el rendimiento obtenido de las cáscaras de tuna de *O. ficus albicarpa* y *O. matudae* (Lira-Ortiz et al., 2014; Morales-Martínez et al., 2018) y cladodios de *O. ficus indica* (Lefsih et al., 2017).

Considerando otras fuentes de obtención de pectina, el producto obtenido de *O. robusta* fue mayor al de la corteza de toronja (3.29%) (Chen et al., 2016); corteza de plátano (2.18%) (Swamy & Muthukumarappan, 2017), y cáscara de maracuyá (12.67%) (Oliveira et al., 2016). Pero fue menor que la pectina de la cáscara de naranja agria (Hosseini et al., 2016). Las diferencias en el rendimiento de pectina *O. robusta*

se atribuyeron a las fuentes de obtención y de acuerdo con los métodos utilizados, a las condiciones de extracción.

Con respecto al grado de esterificación, se encontró que mediante el método UAE-MAE se obtuvo el más alto DE % en pectina, en comparación con el método Q.

De acuerdo con los valores de la pectina con DE > 50% se identificó que el producto es un polisacárido con un alto índice de metoxilo (AM), por tanto, el producto obtenido se expresó como PAM. Mientras que la pectina con DE < 50%, se identificó como un polisacárido de bajo índice de metoxilo (BM), expresado como PBM.

El índice AM de la PAM se atribuyó a las condiciones de extracción, como el medio ácido, la temperatura de 90 °C y el tiempo de extracción, que promovieron la esterificación de esta pectina. Además, la presencia de la sal de ácido urónico también podría estar asociada con la DE observada en la PAM. Por el contrario, la extracción con EDTA tuvo influencia en la baja DE de la PBM, pero el tiempo de extracción prolongado promovió la hidrólisis del éster metílico en esta pectina.

El índice BM encontrado en pectinas de *O. robusta* fue similar al reportado por Lira-Ortiz et al. (2014); Morales-Martínez et al. (2018). Los autores utilizaron cáscara de tuna de *O. ficus albicarpa*.

A su vez, el índice AM de pectina de *O. robusta*, también fue encontrado en pectina de las cáscaras de tuna de *O. dillenii* (Kalegowda et al., 2017), cladodios de *O. ficus indica* (Lefsih et al., 2017), cáscara de maracuyá (Oliveira et al., 2016) y casco verde pistacho (Chaharbaghi et al., 2017). En ambos casos, la similitud del tipo de pectina se atribuyó a los métodos de extracción y la fuente de obtención.

En comparación con otras fuentes de obtención de pectina, Hosseini et al. (2016) encontraron el índice BM de pectina hasta 37.5% de la cáscara de naranja agria por el

método de extracción MAE; en este caso, el tiempo de extracción (3 min) de pectina se asoció con este resultado.

3.2 Características fisicoquímicas de pectina de *O. robusta*

En la Tabla 3.2 se presentan las características de las pectinas de *O. robusta* PBM y PAM y a continuación se discuten en forma individual los resultados obtenidos.

Tabla 3.2. Características de la pectina extraída de la corteza de *O. robusta*.

Parámetros	Simbología y unidades	PAM	PBM
Ácido galacturónico	GalA (%)	31.74±0.20	47.05±0.21
Viscosidad Intrínseca	η_i (cm ³ /g)	133.44±0.30	188.61 ±0.25
Masa molecular	\bar{M}_v (KDa)	32.69±0.15	20.34±0.11
Actividad antioxidante/0.5 mg/mL of pectina en solución	DPPH (%)	64.43±0.21	76.92±0.11
	ABTS (%)	41.28±0.28	54.82±0.10
Fenoles totales	Polifenoles (µg/mL Ácido gálico)	9.72±0.08	9.59±0.01

3.2.1 Porcentaje de ácido galacturónico

Las pectinas PAM y la PBM mostraron diferentes contenidos de ácido galacturónico (GalA) presentados en porcentajes en la Tabla 3.2.

Las pectinas PBM mostró el mayor porcentaje de GalA, indicando un valor de 47.05%, lo que muestra una mayor pureza en comparación con la PAM, cuyo contenido fue de 31.74%.

Un alto contenido de GalA está asociado con la pureza de la pectina, entre más bajo sea el valor de GalA, éste se asocia a un alto contenido de azúcar que no corresponde a la estructura de la pectina, o bien, se puede asociar a una pectina degradada, lo cual es debido a las fuentes de obtención métodos de extracción de pectina.

En comparación con otras pectinas, los valores de contenido de GalA (%) en PAM y PBM fueron más altos que la pectina de las cáscaras de tuna de *O. ficus albicarpa* (19.5%) (Lira-Ortiz et al., 2014) y *O. dillenioid* (18.2%) (Kalegowda et al., 2017). Sin embargo, se encontró un contenido similar de GalA en cladodios de *O. ficus indica* (34.47%) (Lefsih et al., 2017) y cáscaras de pomelo (36.33%) (Liew et al., 2016).

3.2.2 Viscosidad intrínseca y masa molar

En la Figura 2 se muestran las curvas de viscosidad reducida η_r contra C para los dos tipos de pectina PAM y PBM de *O. robusta*.

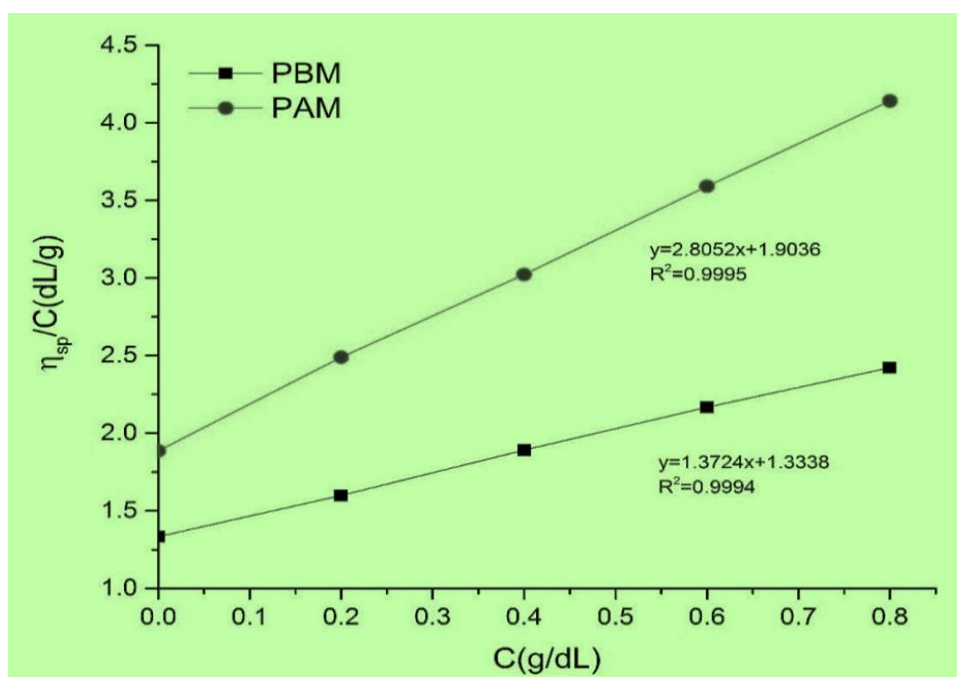


Figura 3.1 Curvas de viscosidad reducida en función de la concentración de las pectinas PAM y PBM de la corteza de *O. robusta*.

El comportamiento lineal entre la viscosidad y la concentración de pectinas dio como resultado diferentes valores de viscosidad intrínseca $[\eta]$ y masas molares (\bar{M}_v) de pectinas, que fueron PAM, 1.90 dL/g y 33.11 kDa; PBM, 1.33 dL/g y 20.34 kDa, respectivamente (Tabla 2).

La diferencia entre $[\eta]$ y \bar{M}_v para ambos tipos de polisacáridos se puede atribuir al distinto grado de esterificación entre ellos. Específicamente, el método de extracción utilizado para la PAM permitió extraer más polisacárido, mostrando un alto valor de $[\eta]$.

Los valores de $[\eta]$ y \bar{M}_v para la PAM y PBM fueron comparables a los de otras pectinas extraídas de distintas especies de *Opuntia*. Kalegowda et al. (2017) reportaron valores $[\eta]$ de 1.4-3.5 dL/g y masas molares en el intervalo de 21.7-76.2 kDa para pectinas AM de *O. dillenii*. Bayar et al. (2018) informaron una masa molar de 60.42 kDa para la pectina BM de cladodios de *O. ficus indica*. Lira-Ortiz et al. (2014) obtuvieron pectina BM de *O. albicarpa* con una masa molar de alrededor de $10.16 \cdot 10^5$ g/mol, mientras que para otras fuentes como el orujo de manzana y la cáscara de mango las masas molares fueron de 589 y 2320 kDa, respectivamente (Wang, et al., 2016; Wikiera et al., 2016).

3.2.3 Grupos funcionales

Los espectros FTIR de las pectinas PAM y PBM de *O. robusta* se muestran en la Figura 3.2, confirmando que los productos obtenidos corresponden a pectinas, debido a que ambos productos exhibieron grupos funcionales relativos a bandas características de pectinas comerciales (Grassino et al., 2016) de índices AM y BM.

Lo anterior significa que los métodos de extracción no alteraron su estructura química de las pectinas. Sin embargo, se observaron algunas diferencias estructurales entre la PAM y PBM en estos espectros. La PAM mostró bandas de absorción alrededor de 1732 y 1612 cm^{-1} , que indican la presencia de grupos éster metilados, confirmando así los datos del índice DE (%) y AM para la PAM.

En común a ambas pectinas, se detectó la presencia de grupos hidroxilo (O-H) de GalA en la región de 3750 a 3300 cm^{-1} . Mientras que las vibraciones de estiramiento C-H se exhibió la banda a 2920 cm^{-1} .

Los picos de absorción entre 1750 y 1500 cm^{-1} corresponden al ácido carboxílico y los grupos éster carboxílico de las moléculas de pectina metilada.

Las bandas de polisacáridos típicos en 1015 , 1021 y 1226 , 1238 cm^{-1} se asignaron a los modos de vibración -C-C- y -C-O- .

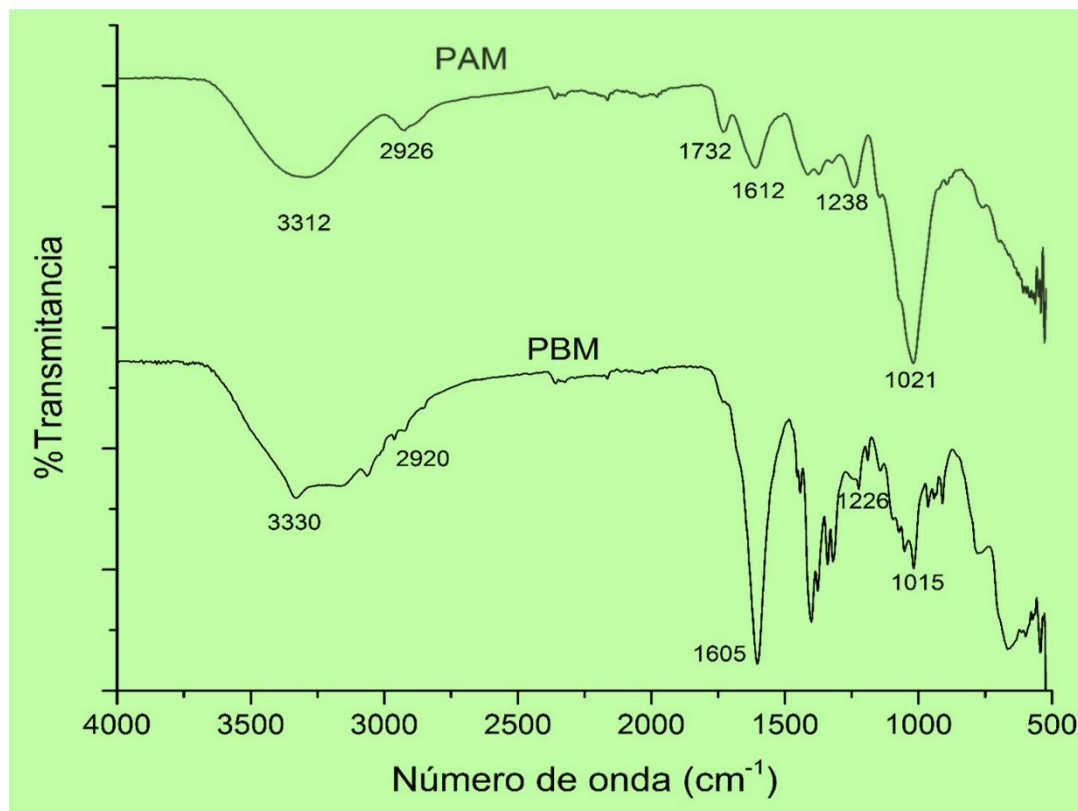


Figura 3.2 Espectro FTIR de PAM y PBM extraída de la corteza de *O. robusta*.

3.2.4 Actividad antioxidante

Las actividades de inhibición del DPPH^{\bullet} y $\text{ABTS}^{\bullet+}$ y los fenoles totales de PAM y PBM se muestran en la Tabla 2. Los datos corresponden a una concentración de pectina de 0.5 mg/mL .

Las dos pectinas de *O. robusta* mostraron actividades antioxidantes semejantes, indicando la inhibición de ambos radicales libres, lo que muestra un contenido significativo y análogo de polifenoles, que fue confirmado y comparable para ambos tipos de pectina extraída.

El mecanismo de inhibición de las pectinas a los radicales libres DPPH[•] o ABTS^{•+}, se asocia a la acción del átomo de hidrógeno del grupo hidroxilo de los polifenoles, el cual se transfiere al radical libre, produciendo una molécula estable de DPPH[•] o ABTS^{•+} (Bayar et al., 2018). Por lo tanto, la capacidad antioxidante depende de la concentración de pectina y el contenido de polifenoles.

La presencia de polifenoles en la pectina de *O. robusta* se explica porque estos compuestos antioxidantes se precipitan juntos durante la extracción de pectina.

Los polifenoles en la pectina se encuentran unidos a la posición O-2 de los residuos Ara unidos a (1 → 5) en las cadenas laterales de arabinán, así como a la posición O-6 de los residuos Gal en galactanos unidos a (1 → 4) (Wikiera et al., 2016).

Bayar et al. (2016); Lefsih et al. (2017); Bayar et al. (2017) también detectaron actividad antioxidante en la pectina extraída de los cladodios de *O. ficus indica*, reportando un porcentaje de inhibición de 85-95% DPPH[•] y ABTS^{•+}, respectivamente; sin embargo, estos autores usaron una concentración de pectina de 2.25 y 40 mg/mL, considerablemente más alta que la utilizada en este trabajo.

3.3 Características reológicas de las pectinas de *O. robusta*

Las propiedades reológicas de las soluciones de PAM y PBM de *O. robusta* se presentan de acuerdo con las características de emulsión, variación de la viscosidad con la velocidad de corte, la temperatura y el pH (pruebas de corte estacionario) y la

prueba de corte dinámico de las soluciones de pectina, evaluando los módulos característicos de geles.

3.3.1 Propiedades de emulsión

Las propiedades emulsionantes (CE, EE y EA) de 20 y 40 mg/mL de PAM y PBM se resumen en la Tabla 3.3. Todas las soluciones de PAM mostraron las capacidades emulsionantes más altas CE=73.81%, EE=66.66% y EA=55.55%, y fueron dependientes de las concentraciones de pectina.

La alta estabilidad de la emulsión provenientes de pectinas de alto metoxilo, PAM se atribuyó a la presencia de grupos e interacción entre los grupos éster metílico y moléculas hidrófobas, causando una disminución significativa del tamaño de las gotas de emulsión, mejorando la estabilidad a largo plazo (Kalegowda et al., 2017; Wang, Huang, et al., 2016).

Tabla 3.3. Propiedades de emulsión de la pectina de *O. robusta*.

Tipo de pectina	Simbología	CE		EE		EA
		2%	4%	2%	4%	4%
Pectina de alto metoxilo	PAM	58.30±0.28	73.81±0.04	54.54±0.76	66.66±0.11	55.55±0.19
Pectina de bajo metoxilo	PBM	46.16±0.32	50.05±0.07	33.33±0.69	56.52±0.23	42.85±0.15

Las propiedades de emulsión de la pectina de *O. robusta* fueron comparables a las extraídas de *O. dillenii*. En este caso, una concentración de pectina de 10 mg/g de esta especie mostró la CE y EE más altas, 80 y 66%, respectivamente (Kalegowda et al., 2017). Esta diferencia se atribuyó al índice de metoxilación de pectina que los autores obtuvieron (DE=85%).

3.3.2 Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de corte

En la Figura 3.3 se representa la viscosidad aparente de las soluciones de pectinas de *O. robusta* de 10, 20 y 40 mg/mL en función de la velocidad de corte en un intervalo de 1-100 s⁻¹.

En términos generales, la viscosidad de las soluciones de ambas pectinas PAM y PBM disminuyó con el aumento de la velocidad de corte aplicada. Por tanto, estas soluciones presentaron un comportamiento de flujo no newtoniano del tipo adelgazante al corte.

Los datos experimentales se ajustaron al modelo de Ostwald-de Waele con un coeficiente de correlación entre 0.985 y 0.999.

La viscosidad aparente más alta se obtuvo en soluciones PBM, destacando la más alta diferencia en soluciones de pectina en concentraciones de 40 mg/L.

Bajo una concentración de 20 mg/mL y 10 s⁻¹ de velocidad de corte, la PAM y PBM exhibieron una viscosidad análoga y un comportamiento de flujo idéntico con el cambio en la velocidad de corte hasta 100 s⁻¹. Por lo tanto, las diferencias de viscosidad se atribuyeron a la concentración de pectina; sin embargo, la masa molar y el contenido de GalA de la pectina también se asociaron a las propiedades de viscosidad (Wang, et al., 2016).

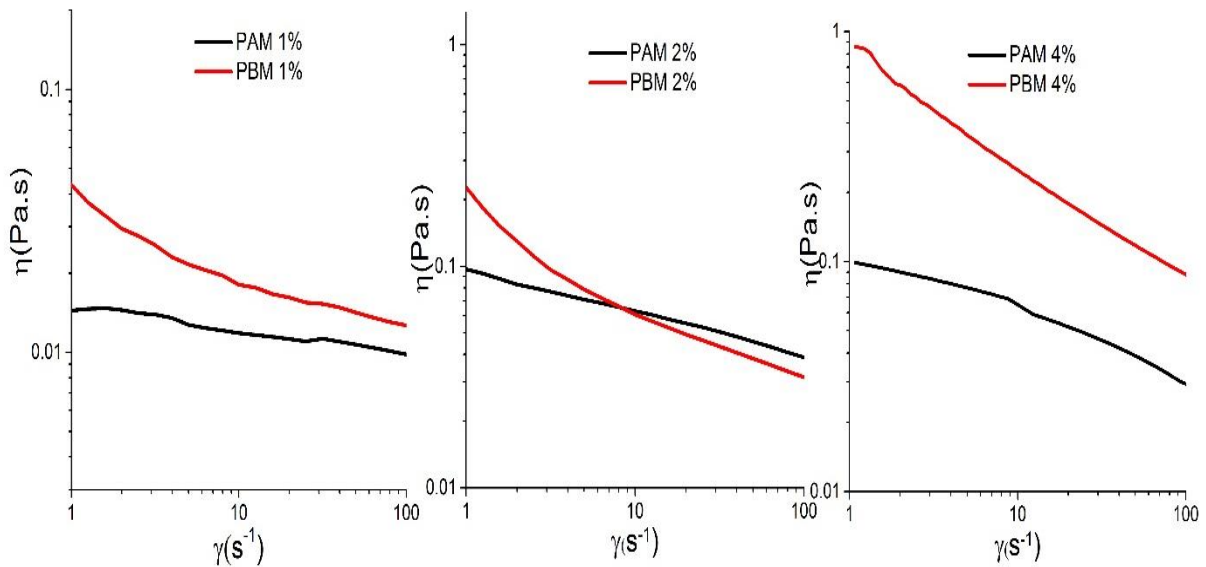


Figura 3.3. Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de corte de soluciones de pectina PAM y PBM (10, 20 y 40 mg/mL de izquierda a derecha) extraídas de la cáscara de la fruta de *O. robusta*.

La presencia de Ca^{2+} en la PBM (debido al método de extracción) también podría explicar la gran diferencia entre las viscosidades de las soluciones de pectina a 40 mg/mL, ya que Ca^{2+} afecta la conformación, el tamaño y la naturaleza de los contraiones de la macromolécula, originando la contracción de flujo de la PBM.

Se ha descrito información diversa sobre el comportamiento del flujo de pectina en varios informes. Sin embargo, la diferencia en el comportamiento se ha asociado con la concentración de pectina.

El comportamiento no newtoniano de la pectina de *O. robusta* fue diferente al de la pectina extraída del fruto de *O. albicarpa* considerando soluciones de 20 mg/mL (Lira-Ortiz et al., 2014).

Por otro lado, Wang, et al. (2016) observaron el comportamiento newtoniano para soluciones de 10 mg/mL para pectina de la cáscara de toronja. Sin embargo,

concentraciones superiores a 10 mg/mL mostraron un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento.

3.3.3 Variación de la viscosidad con la temperatura y pH

La Figura 3.4 muestra curvas del comportamiento de la viscosidad de una solución de pectina de 40 mg/mL en función de temperatura en el rango de 1-45 °C y a pH de 4, 7 y 9.

Las pectinas mostraron una marcada reducción en la viscosidad cuando la temperatura aumentó de 0 a 45 °C.

El modelo de Ostwald-de Waele se ajustó a las curvas que definieron el comportamiento de la viscosidad de las pectinas con respecto a la temperatura, obteniendo un coeficiente de correlación de 0.998-0.999, e indicando un comportamiento de fluido adelgazante al corte.

Con respecto al comportamiento de la viscosidad de las soluciones de pectina a pH 4, 7 y 9, se mostró que las pectinas PAM presentaron una reducción de la viscosidad con el incremento en la velocidad de corte, exhibiendo en todos los casos un comportamiento de fluidos adelgazantes al corte.

A su vez, las soluciones de pectina PBM mostraron que a pH 7 y 9 se comportan como fluidos Newtonianos, en tanto que, a pH 4 se comportó como fluido adelgazante al corte.

En ambos casos las curvas que describen el comportamiento de las pectinas PAM y PBM con el pH se ajustaron a los modelos de Ostwald-de Waele con coeficientes de correlación entre 0.996 y 0.999.

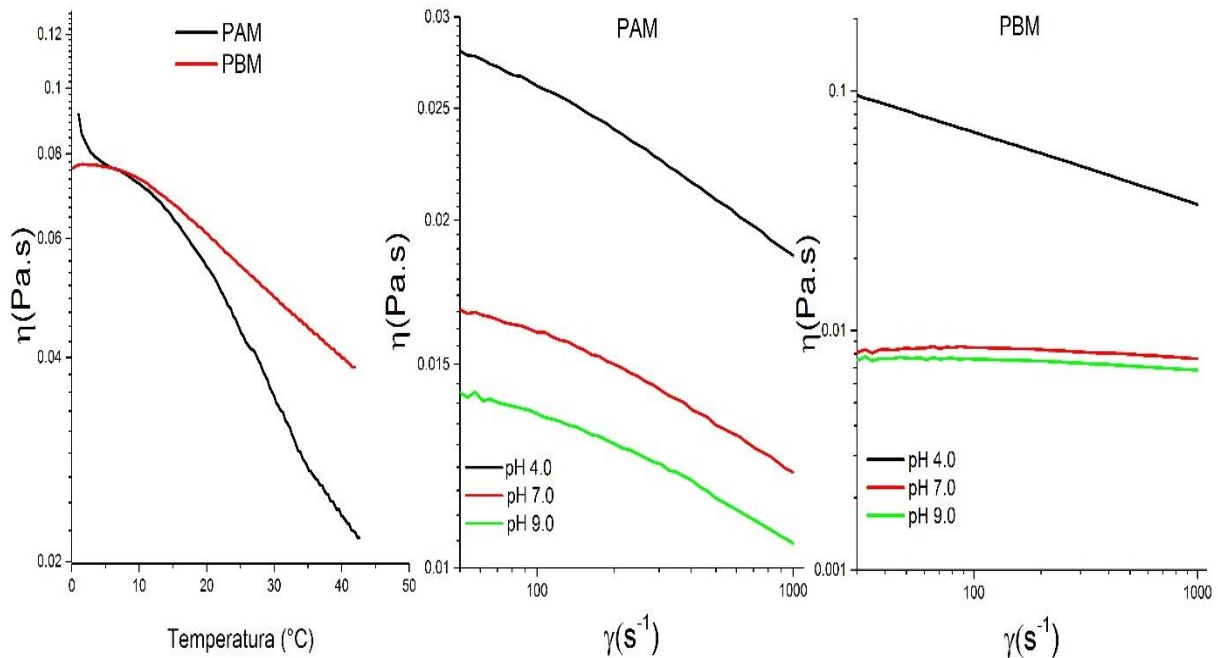


Figura 3.4. Influencia de la temperatura y el pH en la viscosidad de la pectina de la cáscara de *O. robusta*.

Otro dato destacable es que las soluciones de pectina PAM y PBM a pH 4 presentaron la viscosidad más alta que las soluciones a pH 7 y 9, lo cual fue un resultado esperado, debido al bajo grado de ionización de los carboxilos libres, lo que provoca el estiramiento de las cadenas y, en consecuencia, un incremento de la viscosidad (Lootens et al., 2003).

3.3.4 Descripción de las propiedades de gel

La Figura 3.5 muestra gráficos de los módulos de deformación del gel G' y G'' (elástico y viscoso, respectivamente) y la tangente del ángulo de pérdida o fase ($\tan \delta$) para geles de pectina PBM y PAM de 50 mg/mL (con sacarosa o cloruro de calcio, dependiendo del tipo de pectina PAM y PBM respectivamente), ambas en función del porcentaje de deformación ($\gamma\%$), frecuencia de oscilación (ω rad/s) a una temperatura de 25 $^{\circ}\text{C}$.

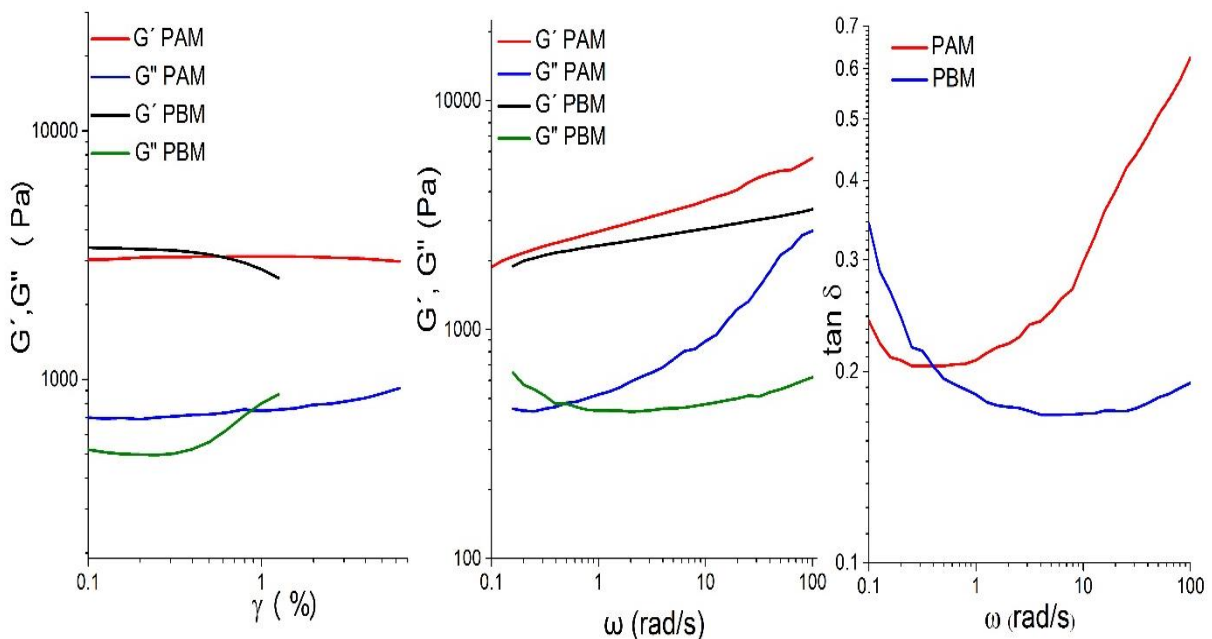


Figura 3.5. Módulo de almacenamiento G' y módulo de pérdida G'' para los geles de pectina PAM y PBM de *O. robusta* en función del porcentaje de deformación ($\gamma\%$) y la velocidad oscilatoria (ω rad/s).

Dados los valores $G' > G''$ en un rango de frecuencia de 0.1-100 rad/s de frecuencia, los geles PAM y PBM describieron un comportamiento similar, indicando características de gel fuerte o sólidos elásticos. De este comportamiento se enfatiza que los valores de los módulos de PAM fueron más altos que los de PBM. Sin embargo, en ese mismo rango de frecuencia se observó que las curvas de G' y G'' de PBM presentaron una mayor tendencia a la linealidad (observándose líneas paralelas entre G' y G''), lo que indicó que este tipo de pectina exhibió un comportamiento de gel fuerte en una amplia zona de frecuencia (donde no hay deformación o ruptura de gel).

A su vez, aunque, no se presentan el segmento de las curvas de los módulos a una frecuencia entre 0-1 rad/s (debido a que el barrido se realizó en el rango de medición mostrado en las curvas), se observa que en ese rango G' y G'' con respecto a $\gamma\%$, la pectina PBM, exhibe una tendencia donde $G'' > G'$, indicando que esta pectina mostró características de fluido viscoso o de fluidez al inicio de la prueba. Mientras que en ese

mismo rango de frecuencia PAM, exhibió probablemente linealidad entre G' y G'' conservando sus características de gel fuerte.

Por su parte, a frecuencias más altas (> 100 rad/s) es notorio que probablemente las PAM tendrán una pronta respuesta a la fluidez, exhibiendo un comportamiento de gel débil o viscoso, debido al predominio de G'' ; mientras que la respuesta a este comportamiento de las PBM sucederá a un posterior rango de frecuencia oscilatoria, indicando que esta pectina presenta características de gel fuerte en un rango más amplio de frecuencia.

Los valores de $\tan \delta$ de ambos geles PBM y PAM confirmaron los anteriores resultados, indicando que a una concentración de 50 mg/mL, ambas pectinas presentan características de un gel fuerte, con $\tan \delta < 1$ en un rango de frecuencia oscilatoria 0.1-100 rad/s; sin embargo, a una frecuencia mayor las pectinas PAM presentan tendencia de fluidez alcanzando $\tan \delta > 1$, mientras que las PBM presentan mayor resistencia al movimiento, manteniendo su característica de gel fuerte en un amplio rango de frecuencia de 1-100 rad/s.

Las diferencias entre el comportamiento reológico entre PAM y PBM se atribuyeron a las diferencias en el grado de esterificación, la masa molar y la adición de azúcares en PAM y $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ a la PBM. Particularmente, está documentado que la adición de Ca^{2+} en pectinas de bajo metoxilo (PBM) da como resultado geles fuertes o elásticos y firmes (Morales-Martínez et al., 2018).

El comportamiento del gel de las pectinas PAM y PBM fue similar al obtenido en previos trabajos utilizando en su mayoría, la misma concentración de pectina. Entre las pectinas reportadas se encuentran las provenientes de *O. albicarpa* (Lira-Ortiz et al., 2014); de orujo de manzana (Wang et al., 2014) y de cáscara de pomelo (Wang, Ma, et al., 2016) cáscara de melón (Raji et al., 2017) y cáscara de lima (Rodsamran & Sothornvit, 2019).

3.4 Características de mezclas sinérgicas de pectina de *O. robusta* con otros hidrocoloides

Las características de las mezclas sinérgicas de pectina PAM y PBM que se presentan en este apartado corresponden a mezclas binarias con alginato de sodio, proteínas de haba y un concentrado de proteínas de suero en proporciones 1:1, 1:3 y 3:1.

3.4.1 Grupos funcionales de las mezclas sinérgicas de pectina

En la Figura 3.6-3.8 se presentan los espectros de las mezclas binarias de PAM y PBM con alginato de sodio, proteína de haba y proteínas de suero de leche, proporción 1:1 respectivamente. También se incluyen los espectros individuales de los hidrocoloides de las mezclas, alginato de sodio, proteína de haba y proteína de suero de leche.

En todos los espectros destacan los grupos funcionales de las PAM y PBM correspondientes a OH en $3000-3300\text{ cm}^{-1}$; los grupos carboxilo COO⁻ y COOR en 1600 y 1700 cm^{-1} , representando este último la esterificación con metanol (grupos metoxilo de la pectina, donde R corresponde al grupo metil).

En las mezclas de pectina con alginato, predominan las bandas características del alginato ya que muestran bandas en 3300 cm^{-1} correspondientes a los grupos OH, 2900 cm^{-1} a los grupos de CH, CH₂, CH₃, 1500 y 1400 cm^{-1} correspondientes a los grupos COO y 1300 cm^{-1} correspondientes a los enlaces C-O (Khajouei et al., 2018).

En relación con los grupos funcionales del alginato, también se destacan los grupos carboxilo en 1583 y 1408 cm^{-1} ; mientras que en el de las proteínas, predominan los grupos amino. También se hace notar una diferencia en la banda de 1400 cm^{-1} , ya que

esta se intensifica, esto debido a la formación de enlaces de hidrógeno que involucran a los grupos polares de ambos polímeros (Nešić et al., 2017; Vaziri et al., 2018).

En las mezclas de pectina con proteína de haba predominan las bandas de absorción características de la proteína de haba 3287 cm^{-1} correspondiente a los enlaces NH, 1500 y 1600 cm^{-1} y los grupos amino, pero con menor intensidad.

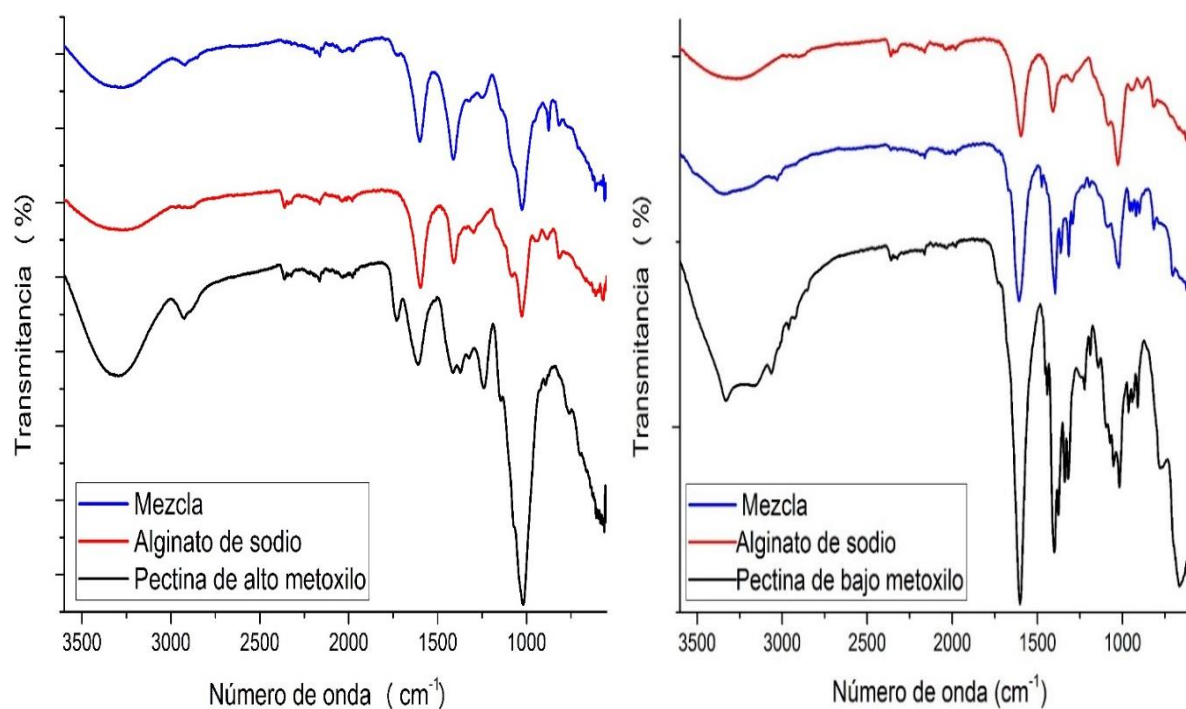


Figura 3.6. Espectros IR de mezclas pectina. PAM (izquierda) y PBM (derecha) con alginato de sodio en una relación 1:1.

Referente a los espectros de las mezclas de pectina con proteína de suero de leche se presentan bandas características de ambos hidrocoloides, en 3300 cm^{-1} correspondiente a los grupos OH y NH (Guo et al., 2019), de las pectinas. Mientras que los grupos CH (2900 cm^{-1}), COO y amino (1600 cm^{-1}) son referentes a la proteína.

También se observan bandas ubicadas entre 1600 a 1700 cm^{-1} las cuales corresponden al estiramiento del enlace C-O del grupo ester de la pectina (Jin et al., 2018).

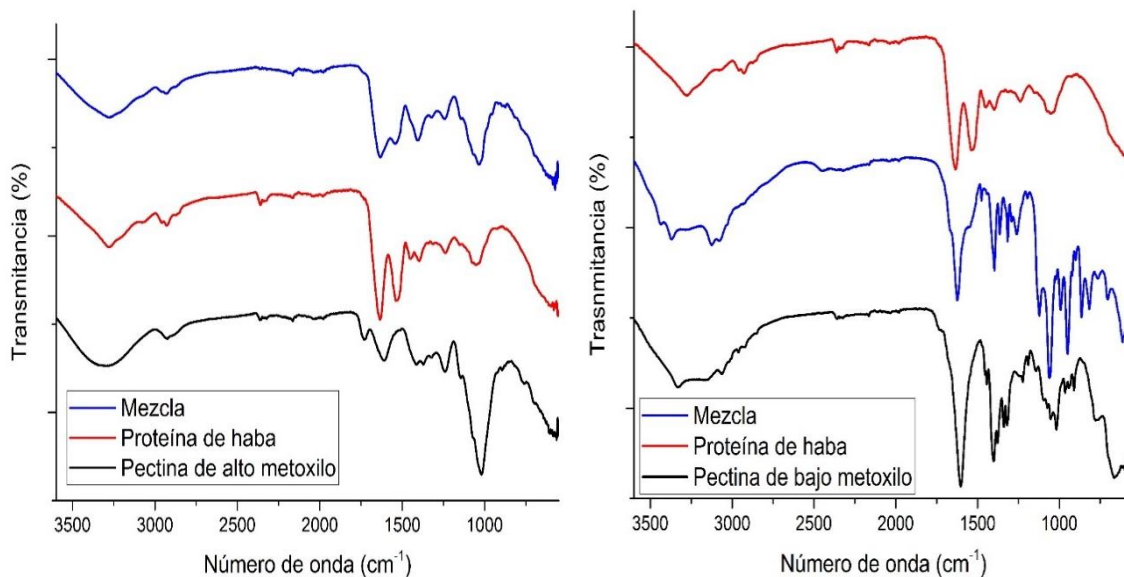


Figura 3.7. Espectros IR de mezclas de pectinas PAM (izquierda) y PBM (derecha) con proteína de haba en una relación 1:1.

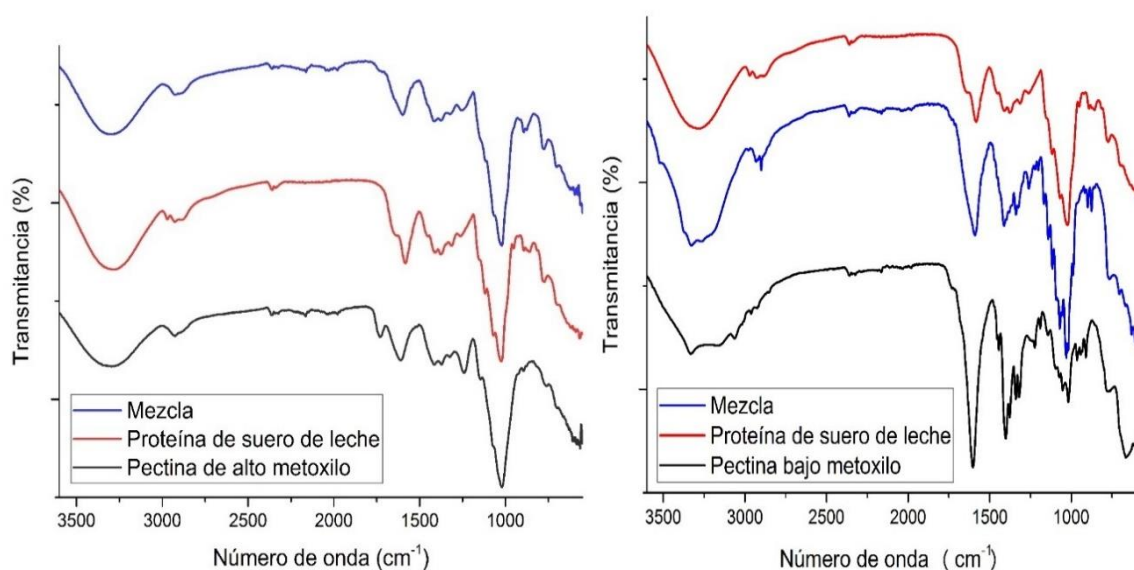


Figura 3.8. Espectros IR de mezclas de pectina. PAM (Izquierda) y PBM (derecha) con proteína de suero de leche en una relación 1:1.

Los espectros individuales de los hidrocoloides, alginato de sodio, proteínas de haba y de suero de leche fueron coincidentes con previos reportes (Jasim Ahmed et al., 2018; Andrade et al., 2019; Garrido et al., 2016; Sun et al., 2018).

3.4.2 Actividad antioxidante de las mezclas de pectina

En la Tabla 3.4 se muestra el contenido de polifenoles ($\mu\text{g/mL}$ Ácido gálico) y la actividad antioxidante (AA) de las mezclas de pectinas PAM y PBM de *O. robusta* con ALG, PHAB y PSUE en proporciones 1:1, 1:3 y 3:1. La AA fue expresada como porcentaje de inhibición de los radicales DPPH y ABTS. En la misma tabla se muestran los valores individuales de AA de los hidrocoloides participantes en la mezcla. En la Figura 3.9 se presentan los mismos datos con el fin de observar el comportamiento de los datos de AA.

Tabla 3.4 Contenido de polifenoles y actividad antioxidante (AA) de las mezclas de pectina PAM y PBM como porcentaje de inhibición de los radicales DPPH y ABTS.

Hidrocoloides y mezclas de PAM	AA (%) DPPH	AA (%) ABTS	Polifenoles ($\mu\text{g/mL}$ ácido gálico)	Hidrocoloides y mezclas de PBM	AA (%) DPPH	AA (%) ABTS	Polifenoles ($\mu\text{g/mL}$ ácido gálico)
PAM	64.43±0.17	41.28±0.37	9.72±0.58	PBM	76.92±0.41	54.82±0.51	9.59±0.41
ALG	46.56±0.06	40.25±0.55	6.54±0.32	ALG	46.56±0.06	40.25±0.55	6.54±0.32
PAM-ALG (1:1)	67.86±0.21	45.12±0.50	8.27±0.33	PBM-ALG (1:1)	51.62±0.56	35.13±0.34	7.78±0.62
PAM-ALG (1:3)	43.53±0.06	41.76±0.36	7.32±0.45	PBM-ALG (1:3)	53.27±0.24	42.38±0.56	7.14±0.55
PAM-ALG (3:1)	94.99±0.51	43.23±0.46	9.29±0.59	PBM-ALG (3:1)	84.82±0.21	35.53±0.31	8.70±0.74
PHAB	94.10±0.53	85.94±0.85	19.08±0.06	PHAB	98.42±0.53	85.94±0.85	19.08±0.06
PAM-PHAB (1:1)	75.98±0.26	74.89±0.14	10.34±0.22	PBM-PHAB (1:1)	78.52±0.05	42.63±0.20	10.13±0.58
PAM-PHAB (1:3)	84.85±0.34	74.63±0.23	10.52±0.11	PBM-PHAB (1:3)	68.59±0.68	45.59±0.23	9.94±0.31
PAM-PHAB (3:1)	79.41±0.12	48.93±0.25	12.27±0.43	PBM-PHAB (3:1)	73.34±0.13	40.19±0.11	10.53±0.33
PSUE	64.90±0.19	99.90±0.66	ND	PSUE	67.79±0.19	99.90±0.66	ND
PAM-PSUE (1:1)	92.86±0.53	99.93±0.22	7.53±0.62	PBM-PSUE (1:1)	91.03±0.21	98.78±0.31	5.57±0.13
PAM-PSUE (1:3)	86.76±0.09	99.43±0.29	3.69±0.45	PBM-PSUE (1:3)	70.08±0.59	100.00±0.13	1.30±0.48
PAM-PSUE (3:1)	92.44±0.24	96.33±0.45	9.24±0.79	PBM-PSUE (3:1)	65.34±0.29	95.42±0.48	9.82±0.13

Dentro de los hidrocoloides participantes se encontró que el mayor contenido de polifenoles se identificó en la proteína PHAB (19.08 µg/mL ácido gálico), seguido por las pectinas PAM y PBM y alginato de sodio (ALG). Mientras que la AA más alta de estos materiales, la proporcionaron las proteínas PHAB y PSUE.

En consecuencia, el mayor contenido de polifenoles en mezclas, lo proporcionaron las muestras de pectina PAM-PHAB en proporción 3:1 (12.27 µg/mL ácido gálico); sin embargo, dicho contenido no superó el del hidrocoloide individual PHAB.

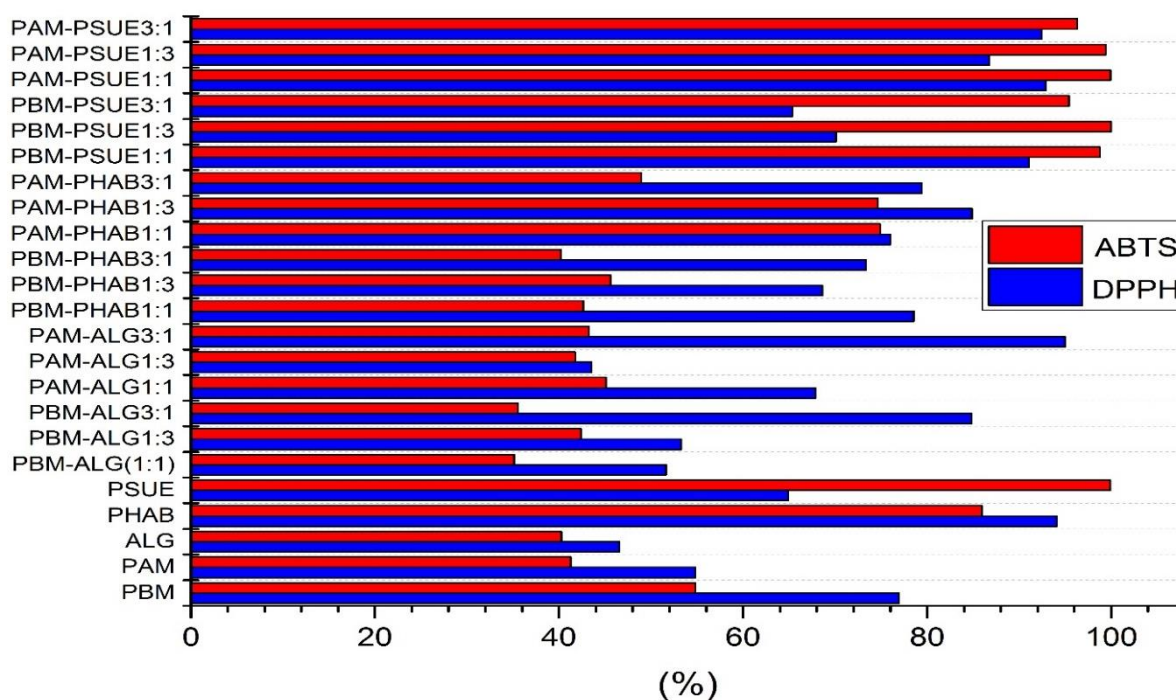


Figura 3.9. Contenido de actividad antioxidante (AA) de las mezclas de pectina PAM y PBM como porcentaje de inhibición de los radicales DPPH y ABTS.

En lo que se refiere a la propiedad AA de las mezclas de PAM y PBM, se identificó que el mayor porcentaje de inhibición del DPPH y ABTS se encuentra en las mezclas con proteínas de suero de leche, PAM-PSUE y PBM-PSUE en proporción 3:1 y 1:1, sin influencia del tipo de pectina, y con una diferencia alta en comparación con las otras mezclas estudiadas.

De acuerdo con estos resultados, se estableció que el incremento de AA en las mezclas PAM-PSUE y PBM-PSUE en proporción 1:1 y 1:3, se debe a una sinergia entre los hidrocoloides presentes en dichas mezclas, lo cual se atribuye al contenido de polifenoles en las pectinas, y de mayor aporte, al contenido de aminoácidos en las proteínas de suero de leche y péptidos (Bierzuńska et al., 2017; Conway et al., 2012). Por otro lado, se destaca que en proporción 3:1, el sinergismo de las mezclas redujo la propiedad AA, debido al mayor contenido de pectina.

En lo que se refiere a las otras mezclas de pectinas, se observó que en proporción 3:1, la mezclas PAM-ALG también mostraron una alta AA; lo cual fue atribuible a la cantidad de las pectinas en las muestras. Mientras que en mezclas 1:3 con PHAB, se observó que el alto contenido de PHAB influyó en el incremento en la propiedad AA de las mezclas, lo cual fue asociado al contenido de polifenoles en PAM y PHAB.

La actividad antioxidante que mostró la PHAB se debe al origen ya que un estudio realizado por Amarowicz and Shahidi (2017) informó la composición fenólica del extracto de haba y propiedades antioxidantes y captadoras de radicales determinadas mediante varios métodos como ABTS y DPPH.

3.4.3 Propiedades de emulsión de las mezclas de pectina

En la Tabla 3.5 se presentan los datos obtenidos de la capacidad (CE%) y estabilidad de emulsión (EE%) de las mezclas de pectina PAM y PBC con alginato de sodio y proteínas de haba y suero de leche en proporciones 1:1, 1:3 y 3:1

En relación con los hidrocoloides participantes en las mezclas de pectina, se encontró que el ALG mostró el porcentaje más alto de CE y EE (86.36% y 60.71%, respectivamente). A este hidrocoloide le siguieron las pectinas PAM, PBM y posteriormente las proteínas, PHAB y PSUE.

Tabla 3.5. Capacidad y estabilidad de emulsión de las mezclas de pectina PAM y PBM de *O. robusta* al 4%.

Hidrocoloides y mezclas PAM	CE (%)	EE (%)	Hidrocoloides y mezclas PBM	CE (%)	EE (%)
PAM	73.81±0.22	60.45±0.27	PBM	50.00±0.44	56.52±0.12
ALG	86.36±0.45	60.71±0.30	ALG	86.36±0.45	60.71±0.30
PAM-ALG (1:1)	84.07±0.09	71.79±0.25	PBM-ALG (1:1)	50.00±0.49	27.27±0.15
PAM-ALG (1:3)	90.39±0.71	64.60±0.55	PBM-ALG (1:3)	48.14±0.29	30.77±0.21
PAM-ALG (3:1)	96.00±0.19	66.58±0.36	PBM-ALG (3:1)	45.45±0.50	42.86±0.18
PHAB	41.66±0.53	33.33±0.14	PHAB	41.66±0.53	33.33±0.14
PAM-PHAB (1:1)	36.42±0.33	44.22±0.72	PBM-PHAB (1:1)	44.00±0.59	40.00±0.11
PAM-PHAB (1:3)	43.26±0.67	38.99±0.41	PBM-PHAB (1:3)	35.71±0.47	38.46±0.39
PAM-PHAB (3:1)	36.68±0.62	49.68±0.66	PBM-PHAB (3:1)	40.00±0.54	43.48±0.14
PSUE	33.33±0.0	33.33±0.0	PSUE	33.33±0.0	33.33±0.0
PAM-PSUE (1:1)	46.56±0.22	39.66±0.72	PBM-PSUE (1:1)	22.22±0.41	33.33±0.24
PAM-PSUE (1:3)	39.64±0.43	39.93±0.12	PBM-PSUE (1:3)	29.16±0.18	22.22±0.32
PAM-PSUE (3:1)	49.26±0.14	45.37±0.54	PBM-PSUE (3:1)	38.46±0.24	32.00±0.46

En consecuencia, las mezclas de pectina con alginato, PAM-ALG y PBM-ALG en todas las proporciones estudiadas mostraron los porcentajes más altos de CE y EE, destacando la proporción 3:1. Bajo este resultado, las mezclas PAM-ALG y PBM-ALG fueron identificadas como sinérgicas para potenciar la CE y EE de las PAM y PBM. Sin embargo, los valores de CE y EE de PAM y PBM fueron reducidos al mezclarse con PSUE y PHAB, atribuyendo este resultado a un incremento de regiones hidrofílicas en dichas mezclas, en comparación con las hidrofóbicas.

Los altos porcentajes de CE y EE de las mezclas de pectina con ALG se asociaron al incremento en la actividad superficial por la unión de ambos hidrocoloides; lo que promovió el carácter no polar de los grupos químicos catiónicos de ambos hidrocoloides, debido a su naturaleza polimérica de tipo polisacáridos.

La CE y EE del ALG presentan porcentajes similares a lo reportado por Huang et al. (2001) que determinó la propiedad emulsificante de 14 gomas en solución con diferentes concentraciones y Zhao et al. (2018) que utilizó la congelación en alginato para mejorar la estabilidad de la emulsión aceite en agua.

3.5 Propiedades reológicas de las mezclas de pectina

3.5.1 Viscosidad aparente y definición del comportamiento de fluidos

En la Figura 3.10 se presentan las curvas de viscosidad aparente contra velocidad de corte o cizalla de las mezclas de pectina PAM (parte superior) y PBM (parte inferior) con ALG, PHAB y PSUE en una relación 1:1, 3:1 y 3:1 a 25 °C. De la misma forma, en la Tabla 3.6 se presentan los datos de los parámetros del modelo reológico que definieron el comportamiento de las mezclas de la pectina y de los hidrocoloides individuales de la mezcla de acuerdo con su viscosidad aparente.

De acuerdo con los datos de la Tabla 3.6, la viscosidad de los hidrocoloides PSUE y PHAB mostraron un comportamiento de fluidos newtonianos, mientras que las pectinas PAM, PBM y ALG presentaron tipos de fluidos adelgazantes. En el caso de ALG, Khajouei et al. (2018) también reportó un comportamiento no newtoniano de este hidrocoloide, bajo concentraciones semejantes.

La Figura 3.10 indica que las mezclas PAM y PBM con ALG, presentaron un comportamiento análogo con respecto a las proporciones utilizadas en la mezcla. El ajuste de las curvas de viscosidad describió un comportamiento de fluido no newtoniano del tipo adelgazante, con principal reducción de viscosidad en la mezcla PAM-ALG en proporción 1:1.

El comportamiento del fluido de las mezclas PAM y PBM con ALG se asoció a la sinergia obtenida por la unión de los dos polisacáridos, donde cada uno mostró un comportamiento de fluido adelgazante. Por tanto, dada una alta viscosidad aparente, se obtuvo como resultado una potenciación de esta propiedad.

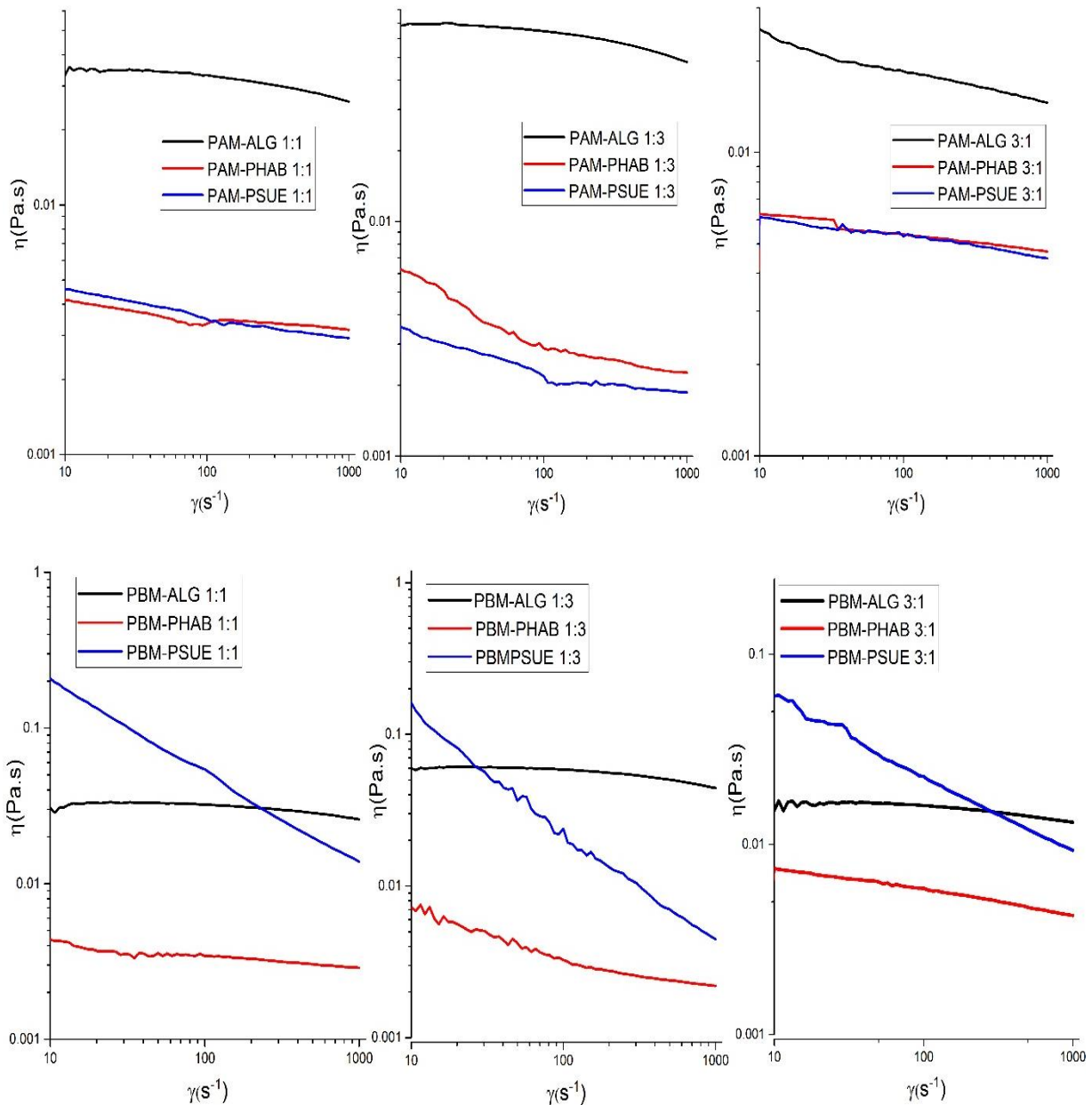


Figura 3.10. Viscosidad aparente contra velocidad de corte de las mezclas de pectina PAM (parte superior) y PBM (parte inferior) con ALG, PHAB y PSUE en relación 1:1, 3:1 y 3:1 (izquierda a derecha).

Por su parte, las mezclas PAM-PSUE y PAM-PHAB presentaron valores semejantes de viscosidad aparente y más bajos en comparación con las mezclas PAM-ALG, observando que dichas proteínas aportan baja viscosidad. Sin embargo, a pesar de

que PHAB y PSUE presentaron un comportamiento de fluidos newtonianos, las mezclas PAM-PHAB y PAM-PSUE, presentaron un comportamiento de fluido no newtoniano. Estas mezclas se ajustaron también al modelo de Ostwald de Waele (los parámetros reológicos y los índices de correlación se pueden ver en Tabla 3.7), lo cual sugiere que la presencia de PAM influye en dicho comportamiento, dando como resultado mezclas sinérgicas para ambas proteínas con incremento en la viscosidad aparente y modificación del tipo de fluido newtoniano a adelgazante.

Tabla 3.6 Parámetros de los modelos reológicos de las mezclas PAM y PBM con los hidrocoloides ALG, PHAB y PSUE en proporciones 1:1, 1:3 y 3:1.

Muestra	Modelo de ajuste	Parámetros reológicos		Índice de correlación	Tipo de Fluido
		K	n		
PAM	Oswald de Waele	0.16064	0.90231	0.99978	Adelgazante
PHAB	Newton	No aplica	No aplica	0.99967	Newtoniano
PAM-PHAB 1:1	Oswald de Waele	0.004308	0.9561	0.99997	Adelgazante
PAM-PHAB 1:3	Oswald de Waele	0.004940	0.8848	0.9996	Adelgazante
PAM-PHAB 3:1	Oswald de Waele	0.006775	0.9484	0.99996	Adelgazante
ALG	Oswald de Waele	0.046898	0.9208	0.99589	Adelgazante
PAM-ALG (1:1)	Oswald de Waele	0.046898	0.9208	0.99932	Adelgazante
PAM-ALG (1:3)	Oswald de Waele	0.091364	0.9182	0.99737	Adelgazante
PAM-ALG (3:1)	Oswald de Waele	0.028573	0.9047	0.99991	Adelgazante
PSUE	Newton	No aplica	No aplica	0.99944	Newtoniano
PAM-PSUE 1:1	Oswald de Waele	0.004666	0.9337	0.99998	Adelgazante
PAM-PSUE 1:3	Oswald de Waele	0.002907	0.9355	0.9999	Adelgazante
PAM-PSUE 3:1	Oswald de Waele	0.008115	0.9138	0.99999	Adelgazante

En lo que se refiere a las mezclas PBM con PSUE, se destaca la pronunciada reducción de viscosidad con el incremento de velocidad de corte, mostrando fluidos adelgazantes en todas las proporciones de esta mezcla. Por tanto, se consideró que en las proporciones estudiadas, ambos hidrocoloides no resisten la velocidad de cizalla o la agitación.

3.5.2 Descripción de las propiedades de gel

En la Figura 3.11 se presentan los barridos de los módulos de deformación de gel elástico y viscoso G' y G'' para los geles de las mezclas de pectina PBM al 4% con ALG, PSUE y PHAB (1:1, 3:1 y 1:3) y PAM al 4 % con ALG (1:1, 3:1 y 1:3) en función del porcentaje de deformación a 1Hz de frecuencia.

Cabe resaltar, que no se reporta los resultados para mezclas PAM-ALG 3:1, PAM-PHAB y PAM-PSUE (1:1, 3:1 y 1:3) debido a que bajo las concentraciones estudiadas no se originó gel para realizar las pruebas correspondientes.

Como resultado de esta prueba, en la Figura 3.11 se observa que todas las curvas de las mezclas de PAM y PBM presentan características de gel fuerte o sólido elástico y una zona de linealidad en el rango de $\gamma\%$ de 0.001-0.1, indicando estabilidad en el gel fuerte, y por tanto, no exhiben deformación en ese rango de frecuencia. De este resultado, se hace notar que la mezcla PBM-PHAB presentó características de gel fuerte en un mayor rango de estabilidad (0.001-0.1) seguido por la mezcla PBM-PSUE y la mezcla PBM-ALG.

El comportamiento de las mezclas PBM y PAM fueron consistentes con las características del tipo de pectina presente en cada mezcla y los estudios de emulsión de las mezclas estudiadas en la sección 3.4.3 de este trabajo, donde se encontró que las mezclas PAM-ALG presentaron mayor capacidad y estabilidad de emulsión; por tanto, estas mismas mezclas presentan características estables de gel fuerte en una pequeña zona y a valores reducidos de frecuencia oscilatoria en comparación con la mezcla de PBM-PHAB.

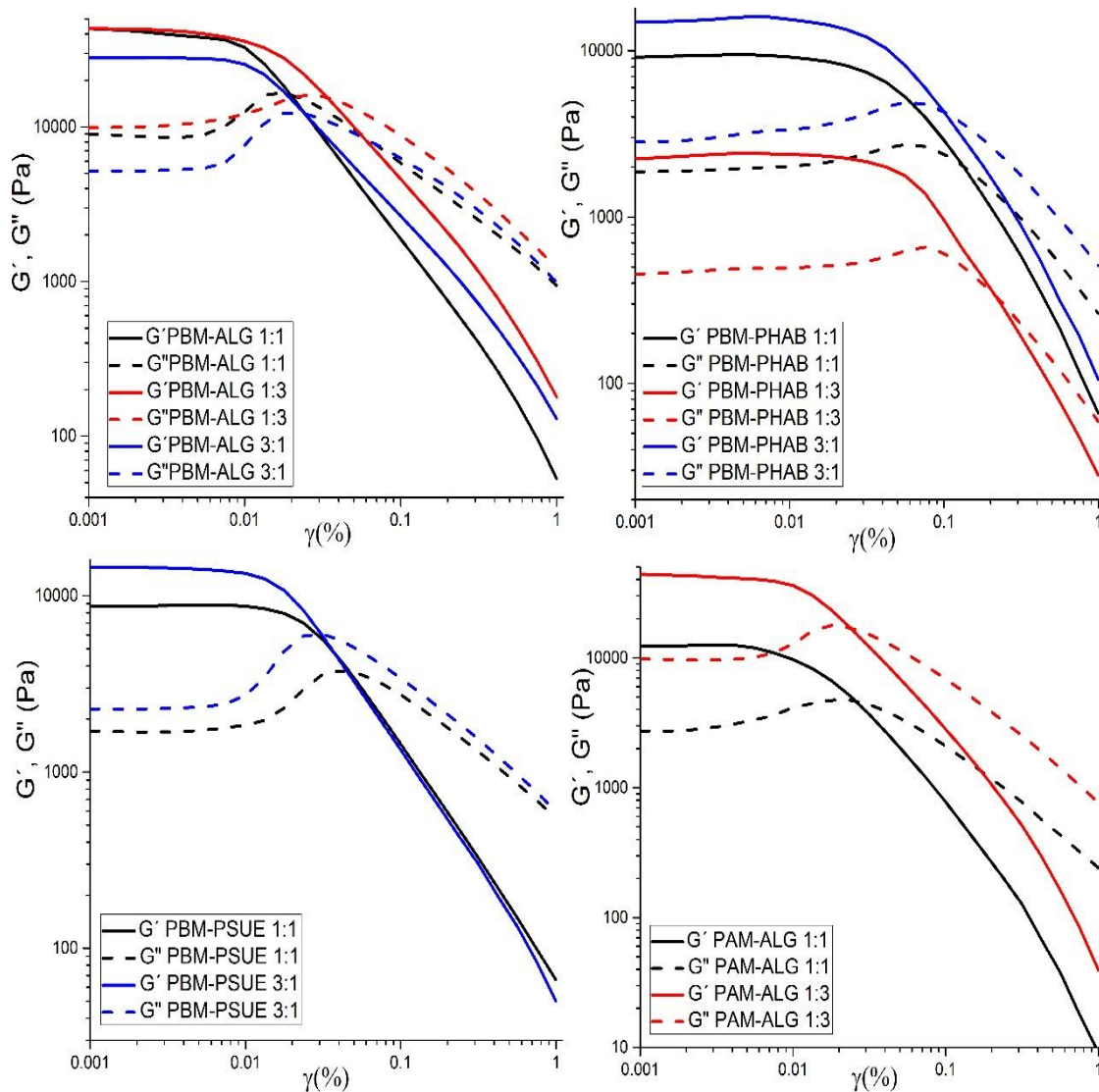


Figura 3.11. Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de mezclas de pectina PAM al 4% con ALG, PSUE y PHAB (1:1, 3:1 y 1:3); y PBM al 4% con ALG (1:1, 3:1 y 1:3) en función del porcentaje de deformación a 1Hz de frecuencia.

En la zona de frecuencia $>0.05-0.1$ rad/s, se presentaron diferentes comportamientos. Algunas mezclas mostraron características de gel débil, tales como PBM-ALG, PBM-PSUE y PAM-ALG mientras que otras como PBM-PHAB conservaron las características de gel fuerte, pero con afectación debido a la frecuencia oscilatoria.

Complementando estos resultados, la Figura 3.12 muestra la evolución G' y G'' de las mezclas de pectina PAM y PBM en función de la frecuencia de oscilación (rad/s), en la cual se observa que las mezclas presentan un comportamiento de gel fuerte o sólido elástico en un amplio rango de frecuencia (0.1-100 rad/s), predominando sobre el líquido viscoso, debido a que $G' > G''$.

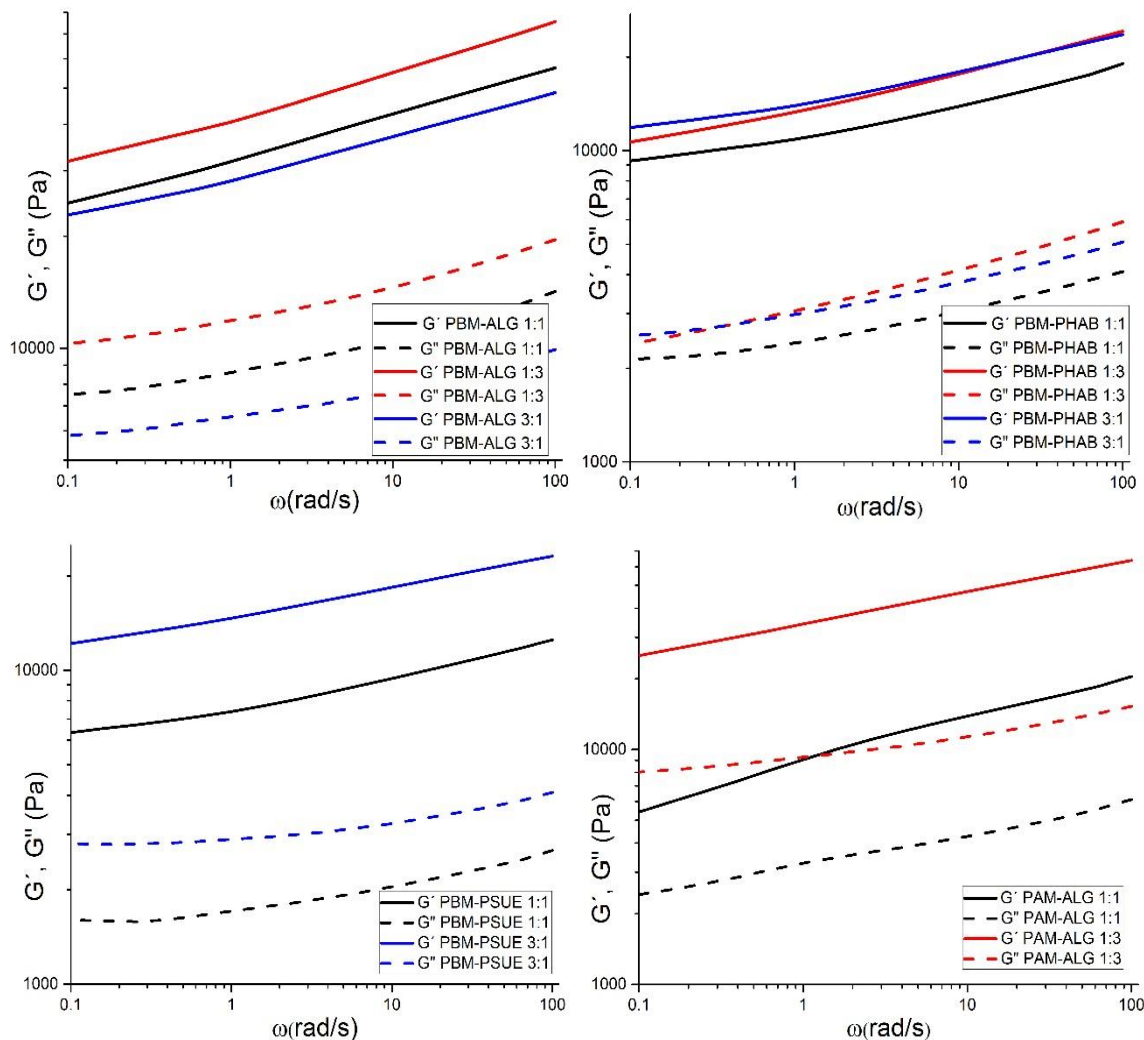


Figura 3.12. Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de mezclas de pectina PAM y PBM al 4% en función de la frecuencia oscilatoria.

También es de destacar que los valores del módulo de almacenamiento G' se incrementó en las mezclas por efecto de la integración de los hidrocoloides ALG, PHAB

y PSUE con las pectinas PAM y PBM. Por consiguiente, se estableció que en todos los casos las mezclas de pectina presentaron sinergismo al potenciar su comportamiento de gel fuerte, de acuerdo con el siguiente orden: PBM-PHAB>PBM-PSUE>PBM-ALG>PAM-PALG.

En el caso de la mezcla de pectinas con alginato, el comportamiento reológico tipo gel se atribuyó a la unión de dos polisacáridos con formación de redes poliméricas (Chang, 2016) y la selectividad del ALG para unirse al Ca^{2+} con la formación de geles.

En la mezcla de pectinas con proteínas, se asume que la formación de geles se debe a la acción dual de la pectina y las proteínas; por un lado, se encuentra la naturaleza polimérica de la pectina, cuyas cargas catiónicas en la superficie influyen en la formación de grandes redes. A su vez, la repulsión entre cargas positivas o negativas lejos del pH del punto isoeléctrico de las proteínas y su unión covalente con la pectina permiten la formación de geles firmes.

Con respecto a la propiedad referida al tipo de gel, elástico o viscoso, en la Figura 3.13 se presenta la relación G''/G' conocida como tangente del ángulo de desfase ($\tan \delta$) en función de la frecuencia. En este caso se destaca que conforme el valor de $\tan \delta$ se acerca a cero, el carácter elástico de las mezclas predomina sobre el viscoso; lo cual significa que el comportamiento reológico de las mezclas se describe como viscoelástico.

Complementando la Figura 3.13, en la Tabla 3.7 se presentan los datos de $\tan \delta$, mostrando que los rangos de este valor están entre 0 y 90° lo que corresponde a respuesta viscoelástica para todas las mezclas de pectina.

En la Tabla 3.8 se resume la sinergia que presentaron las mezclas de PAM y PBM de pectina de *O. robusta* con los hidrocoloides ALG, PSUE y PHAB.

En general, los resultados del comportamiento en mezclas de pectina PBM y PAM, mostraron diferentes sinergias, subrayando las siguientes.

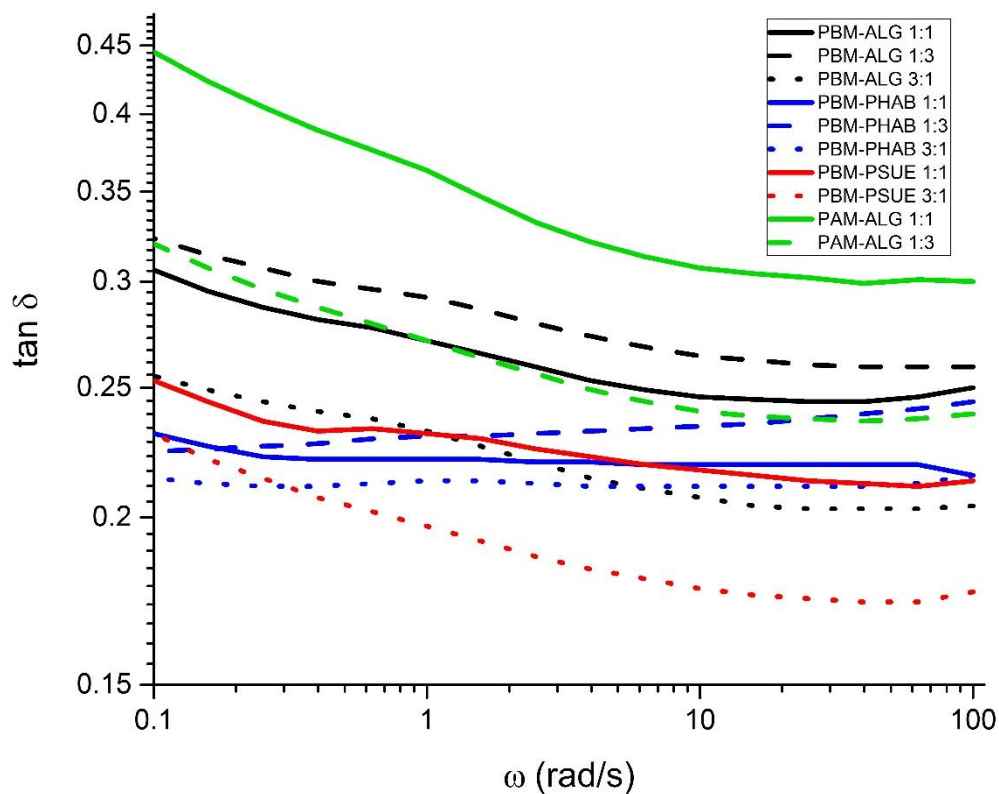


Figura 3.13. Tangente del ángulo de desfase de mezclas de pectina al 5% con ALG, PSUE y PHAB (1:1, 3:1 y 1:3).

Tabla 3.7. Tangente del ángulo de desfase de muestras de pectina al 5%.

Mezcla	Tan (δ)	δ ($^{\circ}$)
PBM-ALG (1:3)	0.259	14.52
PBM-ALG (1:1)	0.25	14.03
PBM-ALG (3:1)	0.204	11.53
PBM-PHAB(1:3)	0.244	13.71
PBM-PHAB (1:1)	0.215	12.13
PBM-PHAB (3:1)	0.215	12.13
PBM-PSUE(1:1)	0.213	12.02
PBM-PSUE(3:1)	0.176	9.98
PAM-ALG (1:3)	0.3	16.69
PAM-ALG (1:1)	0.23	13.44

Tabla 3.8. Resumen de resultados de las mezclas de pectina de *O. robusta*.

Hidrocoloide/ concentración	Mezcla/ proporción	Actividad antioxidante			Propiedades de emulsión		Propiedades reológicas	
		DPPH%	ABTS%	Fenoles	%CE	%EE	Tipo de fluido	Tipo de gel
PAM 4%		64.43	41.28	9.72	73.81	60.45	Adelgazante	Débil, respuesta viscosa
ALG 4%		46.56	40.25	6.54	86.36	60.71	Adelgazante	Fuerte, respuesta elástica
PSUE 4%		64.90	99.90	ND	33.33	33.33	Newtoniano	No hubo formación de gel
PHAB 4%		94.10	85.94	19.08	41.66	33.33	Newtoniano	No hubo formación de gel
	PAM-ALG (3:1)	94.99	43.23	9.29	96.00	71.79	Adelgazante	Fuerte, respuesta elástica
	PAM-PSUE (1:1)	92.86	99.93	7.53	46.56	39.66	Adelgazante	No hubo formación de gel
	PAM-PHAB (1:3)	84.85	74.63	10.52	39.64	39.93	Adelgazante	No hubo formación de gel
PBM 4%		76.92	40.25	7.78	50.00	56.52	Adelgazante	Fuerte, respuesta elástica
	PBM-ALG (3:1)	84.82	35.53	8.70	45.45	42.86	Adelgazante	Fuerte, respuesta elástica
	PBM-PSUE (1:1)	91.03	98.78	5.57	22.22	33.33	Adelgazante	Fuerte, respuesta elástica
	PBM-PSUE (1:3)	70.08	100.00	1.30	29.16	22.22	Adelgazante	Fuerte, respuesta elástica
	PBM-PHAB (1:1)	78.52	42.63	10.13	44.00	40.00	Adelgazante	Fuerte, respuesta elástica

Las mezclas PBM mostraron el mayor efecto en la formación de gel con la adición de los hidrocoloides. Mientras que en la capacidad de emulsión las mezclas de pectina PAM presentaron los valores más altos. A su vez, en la actividad antioxidante, ambas mezclas PAM y PBM incrementaron dicha actividad.

Particularmente, los hidrocoloides PHAB y PSUE, en concentración del 4-5%, no formaron geles, causando a su vez, que las mezclas de pectina PAM no presentaran formación de gel; sin embargo, las pectinas incrementaron la viscosidad de estos hidrocoloides y sus propiedades de emulsión %CE y %EE en mezcla.

Por tanto, se establece que un incremento en la concentración de PHAB y PSUE podría causar la formación de los geles.

Por su parte, en ese mismo rango de concentración (5%) el ALG proporcionó a la pectina los porcentajes más altos de CE y EE, y fue suficiente para formar un gel fuerte, mejorando esta propiedad en ambos hidrocoloides.

Las mezclas de pectina PAM-ALG, PBM-ALG, PAM-PSUE, PBM-PSUE mostraron sinergia al incrementar la actividad antioxidante. El resultado se atribuye al ácido galacturónico y fenoles de la pectina y, ácido algínico y aminoácidos contenidos en ALG, y PSUE y PHAB, respectivamente.

El resultado se atribuye al ácido gálico, y aminoácidos contenidos en cada hidrocoloide respectivamente, así como al contenido de compuestos fenólicos en las pectinas.

3.6. Aplicaciones de las mezclas sinérgicas de pectina de *O. robusta*

3.6.1 Aprovechamiento de la propiedad de emulsión de mezclas de pectina de *O. robusta* en la obtención de un aderezo tipo mayonesa

Los resultados de las propiedades de emulsión, datos como capacidad de emulsión (CE%) y estabilidad térmica de emulsión (ET%) de los aderezos tipo mayonesa de mezclas de hidrocoloides se presentan en la Tabla 3.9. De acuerdo con resultados obtenidos en las sinergias, los datos corresponden a las mezclas binarias y ternarias de PBM con ALG y PHAB.

Tabla 3.9. Propiedades de emulsión de los aderezos tipo mayonesa de las mezclas de hidrocoloides.

Mezcla	CE (%)	ET (%)
PBM-ALG 1:1	100.00	93.33
PBM-ALG-PHAB 1:2:1	100.00	86.66
PBM-ALG-PHAB 2:1:1	98.66	83.33
PBM-ALG-PHAB 1:1:1	100.00	96.66

En los resultados de la Tabla 3.9 se puede observar que la mayoría de los aderezos tipo mayonesa presentan alrededor del 100% de CE, demostrando su comportamiento sinérgico en esta aplicación.

En el ET %, se observa que la mezcla presentó el valor más alto fue la PBM-ALG-PHAB 1:1:1. Mientras que la muestra que presentó menor ET % fue la muestra PBM-ALG-PHAB 2:1:1.

La propiedad ET es importante ya que, al utilizar la pasteurización para extender la vida útil del aderezo, éste soporta dicha temperatura (Liu et al., 2017).

De acuerdo con Wang et al. (2015) los hidrocoloides que presentan una elevada ET son geles fuertes y por ende un gel débil presentó lo contrario.

Los resultados de CE fueron semejantes a los encontrados por (Mun et al., 2009) donde preparó una mayonesa reducida en grasa utilizando almidón de arroz modificado con 4 α G-Tasa y goma de xantano. Park et al. (2020) también elaboraron una mayonesa reducida en grasa con almidones modificados, obteniendo un producto con 92.55-96.57% de estabilidad.

En la Figura 3.14 se presentan las muestras de los aderezos tipo mayonesa con las mezclas de hidrocoloides 1 (PBM-ALG 1:1), 2 (PBM-ALG-PHAB 1:2:1), 3 (PBM-ALG-PHAB 2:1:1) Y 4 (PBM-ALG-PHAB 1:1:1), A) en refrigeración (4 °C) y B) temperatura ambiente (25 °C) después de un mes.

En la imagen se aprecia que no hay separación de fases en la emulsión, por lo que los aderezos tipo mayonesa son estables en este periodo.

A la fecha después de seis meses no observan cambios en las muestras de los aderezos a base de pectina.

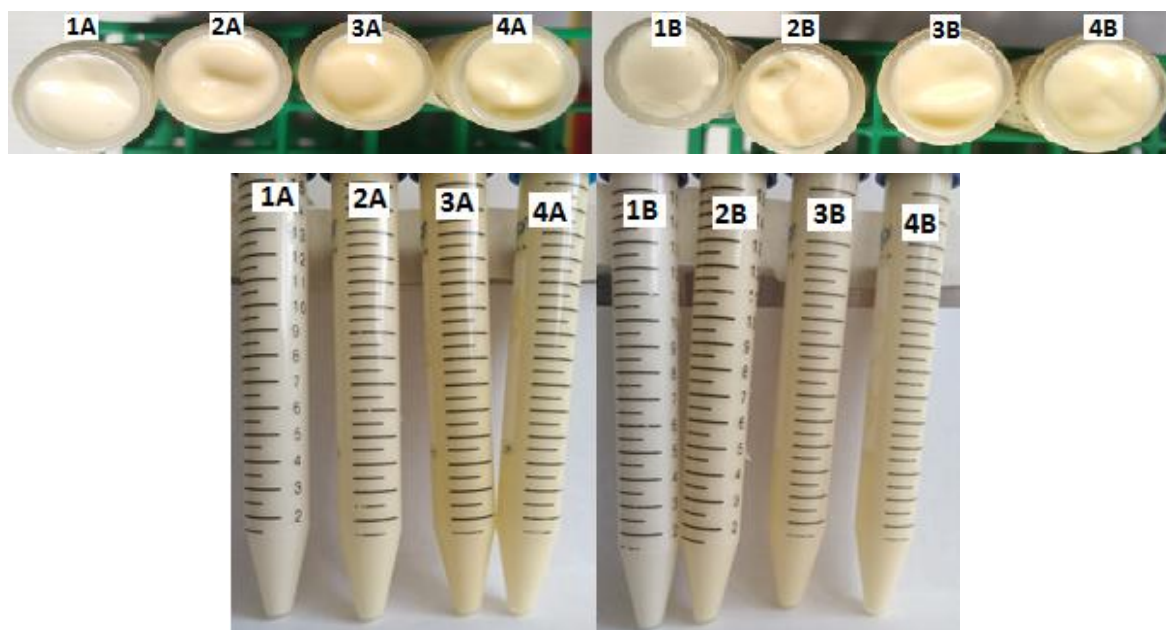


Figura 3.14. Muestras de aderezos tipo mayonesa con mezclas de hidrocoloides (1A, 2A, 3A y 4A son muestras en refrigeración 4°C; 1B, 2B, 3B y 4B son muestras a temperatura ambiente 25 °C).

3.6.2. Análisis sensorial

Los resultados del análisis sensorial se presentan en la Tabla 3.10 y la Figura 3.15. De los datos se observa que las muestras de aderezo tipo mayonesa con mezcla de hidrocoloides tienen una calificación más alta que la comercial tanto en la apariencia como en el color.

Tabla 3.10. Promedio del análisis sensorial de los aderezos tipo mayonesa de mezclas de hidrocoloides (de acuerdo con la escala hedónica de la Tabla 2.4).

	Apariencia	Color	Olor	Cremosidad	Sabor	Aceptabilidad
Control	6.22	6.09	6.51	6.40	6.64	6.25
PBM-ALG 1:1	6.93	6.67	5.96	6.26	5.54	6.25
PBM-ALG-PHAB 1:2:1	6.86	6.67	5.80	5.83	5.19	5.96
PBM-ALG-PHAB 2:1:1	6.43	6.35	5.87	5.25	5.00	5.32
PBM-ALG-PHAB 1:1:1	6.40	6.22	5.38	5.00	4.41	4.93

El aderezo que contiene la mezcla PBM-ALG 1:1 tuvo el valor más alto en apariencia y color, a diferencia de la comercial que presenta un color amarillo. En lo que respecta al olor el aderezo comercial tuvo la mayor puntuación, algunos comentarios de los panelistas hicieron la observación que no percibían olor en las muestras de las mayonesas con mezcla de hidrocoloides.

Con respecto a la cremosidad, el producto de aderezo con PBM-ALG 1:1 presentó una calificación semejante a la comercial; y ésta última fue la mejor calificada en sabor.

La mejor aceptabilidad del aderezo fue encontrada en el producto con PBM-ALG 1:1, obteniendo la misma calificación que la mayonesa comercial. Por lo que se podría concluir que el aderezo tipo mayonesa con la mezcla de PBM-ALG 1:1 podría comercializarse y tendría buena aceptabilidad por parte del consumidor.

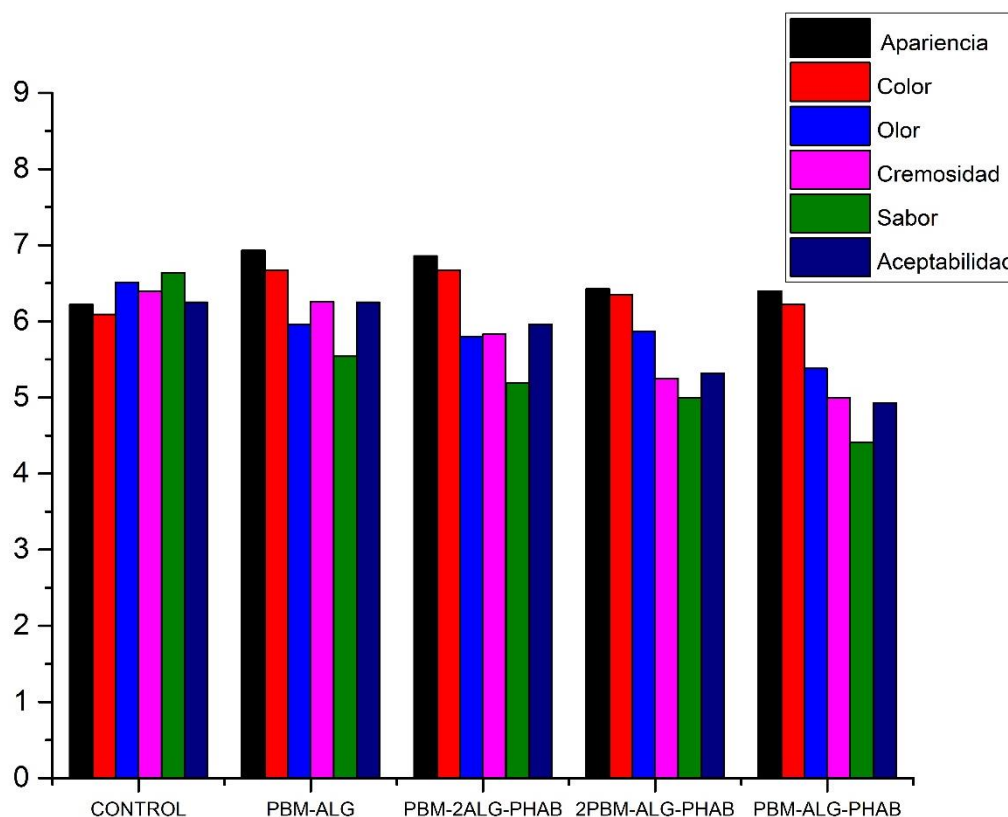


Figura 3.15. Resultados de prueba sensorial.

En la Figura 3.16 se presentan los aderezos tipo mayonesa con las mezclas de hidrocoloides identificadas con 1 (PCBM-ALG 1:1), 2 (PCBM-ALG-PHAB 1:2:1), 3 (PBM-ALG-PHAB 2:1:1) y 4 (PBM-ALG-PHAB 1:1:1) junto con la muestra control (mayonesa comercial McCormick), donde se observa que la muestra control presenta un tono más amarillo con respecto a los demás aderezos tipo mayonesa. También se observa que al colocarlos sobre una placa e inclinándola a unos 90 ° la muestra PBM-ALG-PHAB 2:1:1 y PBM-ALG-PHAB 1:1:1 no permanece la emulsión, observándose deslizamiento del fluido.

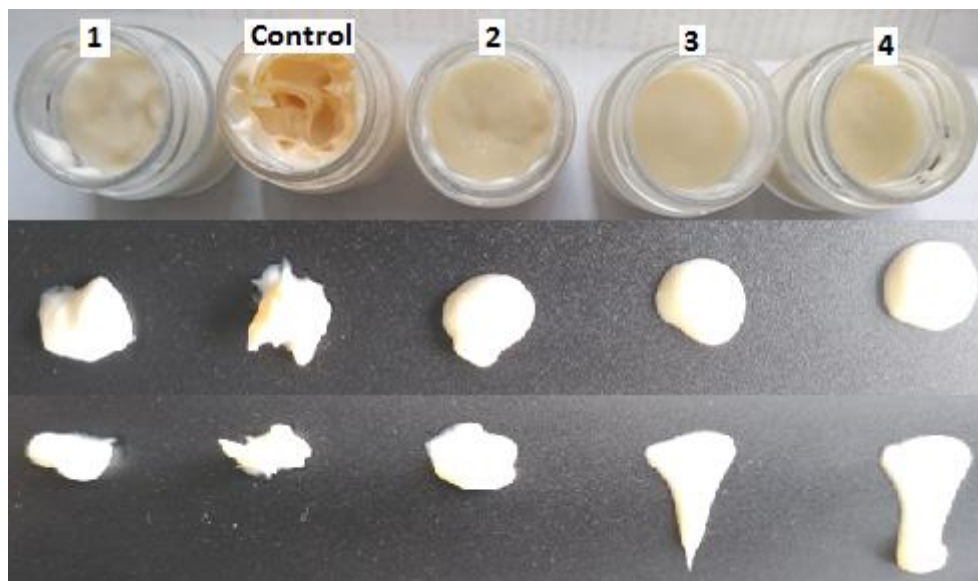


Figura 3.16. Comparación de muestras de aderezos tipo mayonesa con mezcla de hidrocoloides y mayonesa comercial.

3.6.3 Propiedades reológicas de las gelatinas veganas de mezclas de pectina de *O. robusta*

En la Figura 3.17 se presentan los barridos de los módulos de deformación del gel elástico y viscoso G' y G'' para las gelatinas veganas de PBM-AGA 4:1, PBM-AGA-ALG 2:1:2 y PBM-AGA-ALG-PHA 1:1:1:1 al 4% comparados con el de la gelatina comercial (3% p/v) en función con el porcentaje de deformación a 1 Hz de frecuencia

(25 °C). Se observó que las tres gelatinas veganas presentan valores más altos en cuanto a los módulos de almacenamiento y pérdida que la gretina comercial en un rango de 0.0001-0.4, lo que indica un gel más fuerte que el de la gretina. También se puede observar que la gretina presentó mayor rango de estabilidad (0.0001->1) que las tres muestras de gelatina de pectina con agar.

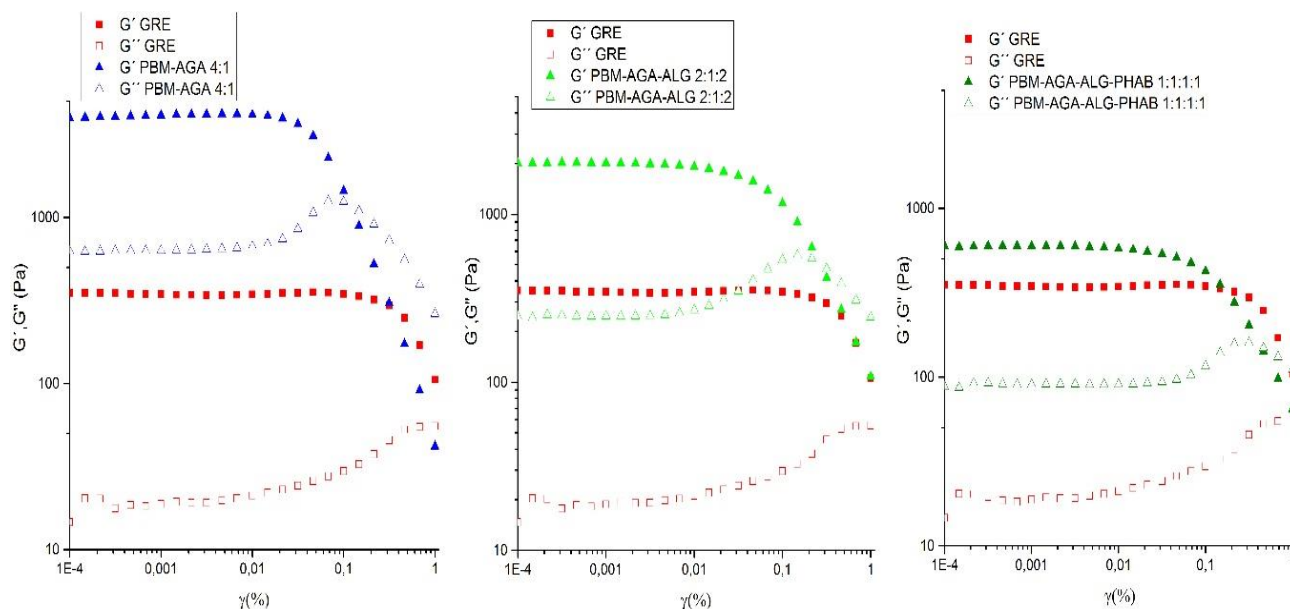


Figura 3.17. Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de las gelatinas veganas de mezclas de pectina PBM con AGA, ALG y PHAB en función del porcentaje de deformación a 1Hz de frecuencia.

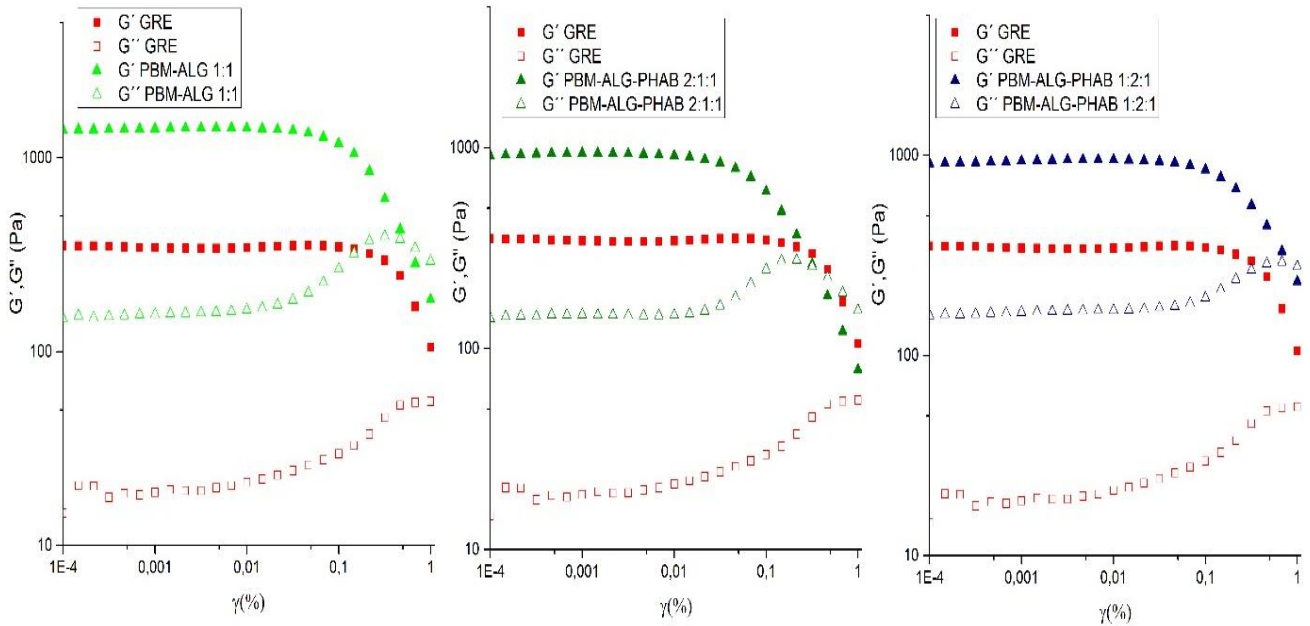


Figura 3.18. Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de las gelatinas veganas de mezclas de pectina PBM con ALG y PHAB en función del porcentaje de deformación a 1Hz de frecuencia.

La Figura 3.18 presenta los barridos de los módulos de deformación de gel elástico y viscoso G' y G'' para las muestras de las gelatinas veganas de PEC-ALG 1:1, PEC-ALG-PHAB 2:1:1 y PEC-ALG-PHAB 1:2:1 al 4% comparadas con la de la gretina (3% p/v) en función del porcentaje de deformación a 1 Hz de frecuencia (25 °C). Las tres gelatinas veganas presentan valores más altos en cuanto a los módulos de almacenamiento y pérdida que la gretina en un rango de 0.0001-1 lo que indica que son geles más fuertes que la gretina. Sin embargo, la zona de estabilidad del gel de la gretina fue mayor que la de las muestras de gelatina (>1).

La fuerza de las muestras de gelatina vegana la proporcionó la pectina y agar, y la estabilidad el ALG y la PHAB, por lo que muestra de PBM-ALG-PHA 1:2:1 presentó la mayor zona de estabilidad de gel fuerte (0.0001-1) que las otras muestras de gelatina.

El barrido de amplitud de la gretina corresponde a lo obtenido por van Otterloo y Cruden (2016) quien describió la reología de la gretina de piel de cerdo de 250

bloom/20 mesh en concentraciones $\leq 10\%$ en peso y temperatura de 5-25 °C y definió el dominio elástico para emplearlo en experimentos geológicos análogos para estudiar procesos relacionados con el comportamiento elástico de rocas como fracturación por tracción, sismicidad e instrucción de magma.

En la Figura 3.19 y 3.20 se presentan la variación de los módulos de pérdida y almacenamiento con respecto a la variación de la frecuencia oscilatoria en un rango de 0.1-100 rad/s de las muestras de gelatina vegana PBM con PEC, AGA, ALG y PHAB en diferentes proporciones, y se incluye el barrido de frecuencia de la grenetina (25°C).

De estos datos, se puede observar que en general todas las muestras de gelatina vegana presentaron un comportamiento de gel fuerte en un rango de frecuencia de 0.1-100 rad/s, también se observa que presentaron módulos con valores más altos que la grenetina comercial, destacando la muestra de PBM-AGA. La muestra de PBM-AGA 4:1 conserva sus propiedades de gel fuerte en velocidades de frecuencia mayores de 100rad/s, a diferencia de las demás muestras que tienden a cambiar a fluidos viscosos.

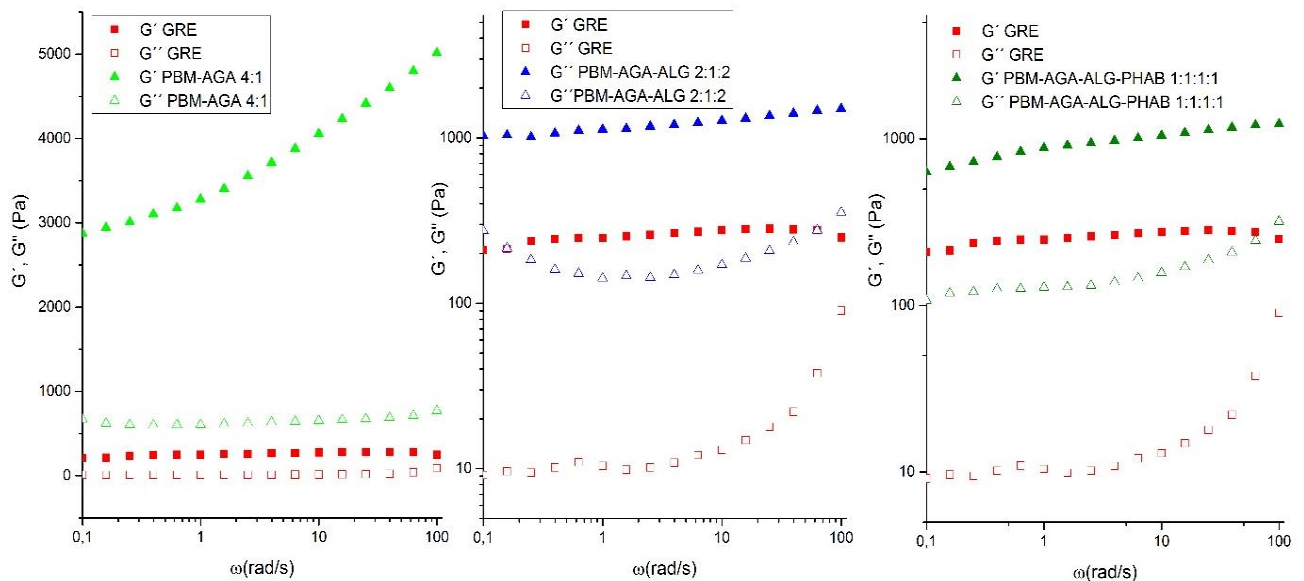


Figura 3.19. Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de las gelatinas veganas de mezclas de PBM, AGA, ALG y PHAB en función de la frecuencia oscilatoria.

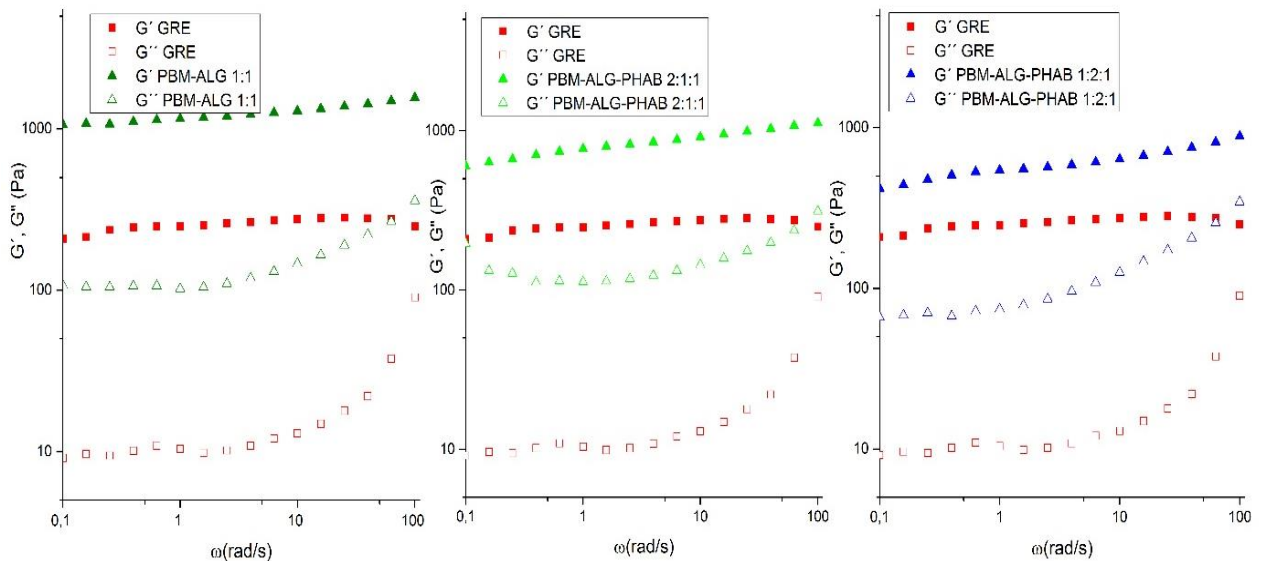


Figura 3.20. Evolución de los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' de las gelatinas veganas de mezclas de PBM, ALG y PHAB en función de la frecuencia oscilatoria.

El barrido de frecuencia obtenido de la gretina es de diferente comportamiento comparado con el obtenido por Abedinia et al. (2017) esto pudiera ser por la diferencia a la temperatura a la cual se llevó acabo la prueba (10 °C).

La Figura 3.21 confirma los datos anteriores, donde se observa que el ángulo de fase tiende a cero a bajas frecuencias lo que corresponde a un gel fuerte, pero al aumentar la frecuencia aumenta su valor, indicando fluidez en las muestras. Sin embargo, se hace notar que el gel PBM-AGA mantiene su comportamiento.

Karim y Bhat (2008) hacen una descripción de las propiedades de la gretina y mencionan que es posible sustituirla con la mezcla almidón modificado, carragenina, pectina y goma gellan, sin embargo, aún no se ha publicado resultados sobre mezclas de hidrocoloides que sustituyan a la gretina.

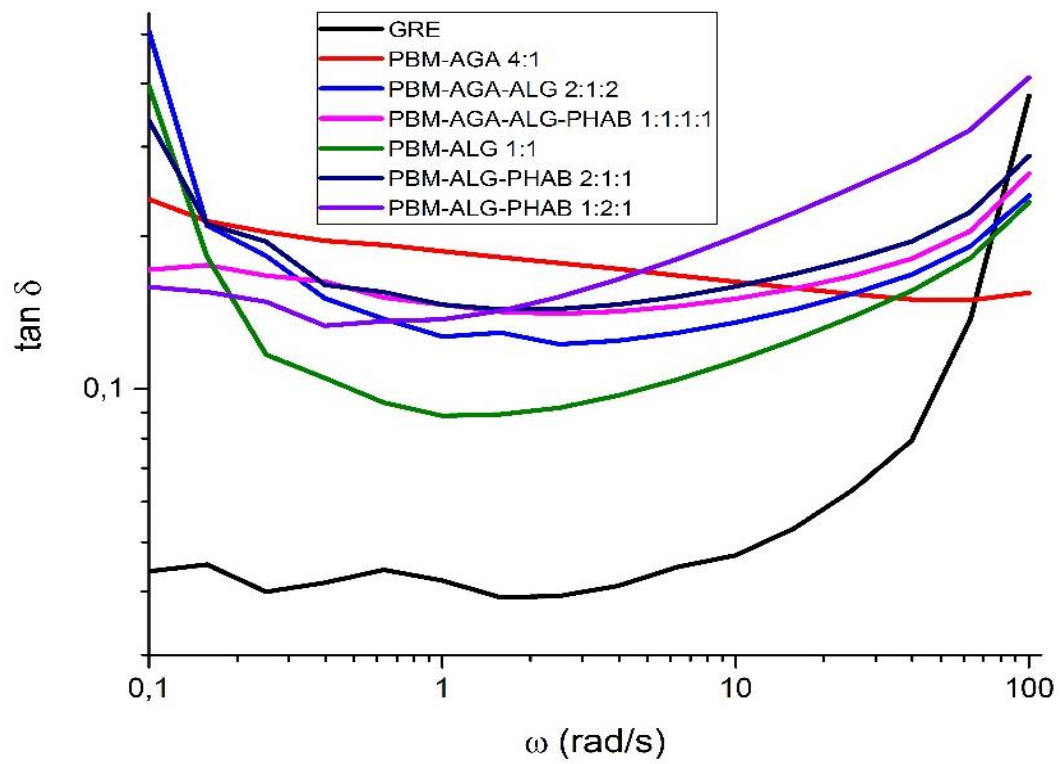


Figura 3.21. Tangente del ángulo de desfase de las gelatinas veganas de mezclas de PBM, ALG, AGA y PHAB.

CONCLUSIONES

A partir de la corteza del fruto de *Opuntia robusta* se extrajo pectina de alto y bajo metoxilo utilizando un medio ácido asistido por microondas y un método secuencial con EDTA respectivamente.

Con ambas pectinas se obtuvieron mezclas binarias y ternarias con alginato de sodio, proteína de haba y proteína de suero en proporciones 1:1, 1:3 y 3:1, con el objeto de obtener mezclas sinérgicas para potenciar la capacidad de emulsión, el comportamiento de gel fuerte y la actividad antioxidante.

Algunas de las mezclas estudiadas se aplicaron en la preparación de un aderezo de mayonesa y una gelatina vegana.

De los estudios mencionados, se concluyó lo siguiente:

Con respecto a la obtención de pectina de *O. robusta*, se encontró que el rendimiento de la pectina de alto y bajo metoxilo fue similar (14.64 y 15.71%); sin embargo, sus masas moleculares fueron diferentes, obteniendo 32,689 y 20,339 KDa respectivamente.

El método de extracción de las pectinas afectó el contenido de ácido galacturónico y viscosidad. La pectina de bajo metoxilo presentó el más alto contenido en ácido galacturónico (47.05%) y viscosidad más alta (188 cm³/g) en comparación con la pectina de alto metoxilo (31.74%, 133 cm³/g).

El método de extracción no afectó el contenido de compuestos fenólicos, resultando similar en ambas pectinas (9.72 y 9.52 µg/mL ácido gálico). Sin embargo, la pectina de bajo metoxilo presentó la mayor capacidad antioxidante por inhibición al DPPH y ABTS (76.92% y 54.82% respectivamente), lo cual fue asociado al contenido de ácido galacturónico.

En las propiedades de emulsión, la pectina de alto metoxilo presentó los porcentajes más altos en este rubro, atribuyendo este resultado al grado de esterificación de la pectina y al mayor contenido de moléculas hidrófobas, debido a la presencia de los grupos éster metílicos.

Con respecto a las características reológicas, la pectina de bajo metoxilo presentó la más alta viscosidad aparente en una concentración de 4% y en un rango de velocidad de 1-100 s⁻¹.

Ambas pectinas presentaron una disminución de viscosidad al aumentar la temperatura de 0-50 °C y al aumentar el pH de 4.0, 7.0 y 9.0.

A su vez, ambas pectinas presentaron un tipo de fluido adelgazante al corte en un rango de velocidad de corte de 0-100 s⁻¹; sin embargo, el comportamiento en gel, fue diferente; la pectina de alto metoxilo presentó características de un gel débil en un rango de frecuencia de 0-100rad/s mientras que la pectina de bajo metoxilo presentó características de un gel fuerte en el mismo rango.

En relación con las mezclas de pectina con alginato de sodio, proteína de haba y proteína de suero de leche, se encontró sinergia entre ellas, con incremento en la actividad antioxidante, capacidad de emulsión, y propiedades reológicas. Particularmente, la mezcla de pectina alto metoxilo-alginato de sodio 3:1 presentó la mayor actividad de inhibición al DPPH (94.99%), mientras que la mezcla de pectina de bajo metoxilo-proteína de suero de leche 1:3 presentó la mayor actividad de inhibición al ABTS (100.00%).

Por otro lado, la mezcla pectina de alto metoxilo-alginato de sodio 3:1 presentó la más alta capacidad de emulsión (96.00%), mientras que la misma pectina con alginato de sodio 1:1, mostró la máxima estabilidad de emulsión (71.79%), indicando la sinergia en la mezcla de la pectina con alginato para potenciar el poder emulsificante de ambos hidrocoloides.

En el estudio reológico todas las mezclas de pectina presentaron un tipo de fluido adelgazante, pero ampliando el rango de velocidad de 100-1000 s⁻¹.

En el caso de las mezclas de pectina de proteínas de suero y haba, la presencia de pectina en la mezcla modificó el comportamiento de esos hidrocoloides (newtoniano) a fluido adelgazante utilizando una concentración del 4% de cada componente.

Los geles de las mezclas de pectina presentaron módulos de almacenamiento mayores que los módulos de pérdida, indicando características de gel fuerte o sólido elástico en un rango de frecuencia de 1-100 rad/s.

Por encima de un porcentaje de frecuencia de 0.01 las mezclas presentaron un comportamiento de fluido viscoso ya que los módulos de pérdida fueron mayores que los módulos de almacenamiento.

Las mezclas de pectina de bajo metoxilo con alginato de sodio presentaron los valores más altos de módulos de almacenamiento y pérdida en un rango de frecuencia de 0-100 rad/s, indicando un gel de mayor elasticidad en comparación con las otras mezclas.

Particularmente, las proteínas de suero y haba en concentración del 5% no formaron geles, causando a su vez, que las mezclas de pectina PAM no presentaran formación de gel; sin embargo, las pectinas incrementaron la viscosidad de estos hidrocoloides y sus propiedades de emulsión %CE y %EE en mezcla.

Las mezclas de pectina mostraron sinergia al incrementar la actividad antioxidante. El resultado se atribuye al ácido galacturónico y fenoles de la pectina y, ácido algínico y aminoácidos contenidos en los hidrocoloides de la mezcla.

En la preparación de un aderezo de mayonesa y una gelatina vegana a partir de mezclas de pectina, se encontró que todas las proporciones utilizadas en las mezclas

de pectina-alginato-proteína de haba presentaron mayor capacidad de emulsión (100%), obteniéndose una sinergia en esta propiedad. A su vez, la mezcla 1:1:1 presentó mayor estabilidad térmica. Se destaca que a un año de almacenamiento los aderezos tipo mayonesa a temperatura ambiente y refrigeración no presentan separación de fases.

La hipótesis se cumplió ya que se obtuvo las especificaciones establecidas de un sustituto de mayonesa con alto poder emulsionante con las mezclas sinérgicas de pectina de *O. robusta* y un sustituto de grenetina con semejante poder de gelificación.

En la prueba sensorial, el aderezo a base de pectina-alginato de sodio 1:1 tuvo mejor aceptación y fue semejante a los resultados de una mayonesa comercial.

Por su parte, las mezclas de pectina con agar 4:1 utilizadas en la preparación de gelatinas veganas presentaron valores más altos en los módulos de almacenamiento y pérdida en comparación con la grenetina en un rango de frecuencia de 0-100 rad/s y mayor resistencia a fluir, dando una respuesta de mayor elasticidad, obteniéndose una sinergia en esta propiedad. Las mezclas de pectina con alginato y proteína de haba por encima de frecuencias de 100 rad/s tienden a cambiar a fluidos viscosos.

REFERENCIAS

- Abedinia A., Ariffin F., Huda N., Nafchi A. M. (2017) Extraction and characterization of gelatin from the feet of Pekin duck (*Anas platyrhynchos domestica*) as affected by acid, alkaline, and enzyme pretreatment. *International Journal of Biological Macromolecules* 98:586-594. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.139>
- Abid M., Cheikhrouhou S., Renard C. M. G. C., Bureau S., Cuvelier G., Attia H., Ayadi M. A. (2017) Characterization of pectins extracted from pomegranate peel and their gelling properties. *Food Chemistry* 215:318-325. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.181>
- Abid M., Renard C. M. G. C., Watrelot A. A., Fendri I., Attia H., Ayadi M. A. (2016) Yield and composition of pectin extracted from Tunisian pomegranate peel. *International Journal of Biological Macromolecules* 93:186-194. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.08.033>
- Acevedo Correa D. (2010) Gelificación fría de las proteínas del lactosuero.
- Ahmed J., Al-Ruwaih N., Mulla M., Rahman M. H. (2018) Effect of high pressure treatment on functional, rheological and structural properties of kidney bean protein isolate. *LWT* 91:191-197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.054>
- Ali M. F., Bakalis S. (2011) Mucoadhesive polymers for food formulations. *Procedia Food Science* 1:68-75. doi:<https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.012>
- Amarowicz R., Shahidi F. (2017) Antioxidant activity of broad bean seed extract and its phenolic composition. *Journal of Functional Foods* 38. doi:10.1016/j.jff.2017.04.002
- Amidi M., Mastrobattista E., Jiskoot W., Hennink W. (2009) Chitosan-based delivery systems for protein therapeutics and antigens. *Advanced drug delivery reviews* 62:59-82. doi:10.1016/j.addr.2009.11.009
- Andrade J., Pereira C. G., Almeida Junior J. C. d., Viana C. C. R., Neves L. N. d. O., Silva P. H. F. d., Bell M. J. V., Anjos V. d. C. d. (2019) FTIR-ATR determination of protein content to evaluate whey protein concentrate adulteration. *LWT* 99:166-172. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.079>

- Ardila S. F. (2007) Pectinas: aislamiento, caracterización y producción a partir de frutas tropicales y de los residuos de su procesamiento industrial. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Farmacia,
- Aziznia S., Khosrowshahi A., Madadlou A., Rahimi J. (2008) Whey Protein Concentrate and Gum Tragacanth as Fat Replacers in Nonfat Yogurt: Chemical, Physical, and Microstructural Properties. *Journal of Dairy Science* 91 (7):2545-2552. doi:<https://doi.org/10.3168/jds.2007-0875>
- Bagherian H., Zokaee Ashtiani F., Fouladitajar A., Mohtashamy M. (2011) Comparisons between conventional, microwave- and ultrasound-assisted methods for extraction of pectin from grapefruit. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 50 (11):1237-1243. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.08.002>
- Bayar N., Bouallegue T., Achour M., Kriaa M., Bougatef A., Kammoun R. (2017) Ultrasonic extraction of pectin from *Opuntia ficus indica* cladodes after mucilage removal: Optimization of experimental conditions and evaluation of chemical and functional properties. *Food Chemistry* 235:275-282. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.029>
- Bayar N., Friji M., Kammoun R. (2018) Optimization of enzymatic extraction of pectin from *Opuntia ficus indica* cladodes after mucilage removal. *Food Chemistry* 241:127-134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.051>
- Bayar N., Kriaa M., Kammoun R. (2016) Extraction and characterization of three polysaccharides extracted from *Opuntia ficus indica* cladodes. *International Journal of Biological Macromolecules* 92:441-450. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.07.042>
- Bayarri S., Chuliá I., Costell E. (2010) Comparing λ -carrageenan and an inulin blend as fat replacers in carboxymethyl cellulose dairy desserts. Rheological and sensory aspects. *Food Hydrocolloids* 24 (6):578-587. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.02.004>
- BeMiller J. N. (2011) Pasting, paste, and gel properties of starch–hydrocolloid combinations. *Carbohydrate Polymers* 86 (2):386-423. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.05.064>

- Beriain M. J., Gómez I., Petri E., Insausti K., Sarriés M. V. (2011) The effects of olive oil emulsified alginate on the physico-chemical, sensory, microbial, and fatty acid profiles of low-salt, inulin-enriched sausages. *Meat Science* 88 (1):189-197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.12.024>
- Bernkop-Schnürch A., Dünnhaupt S. (2012) Chitosan-based drug delivery systems. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 81 (3):463-469. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2012.04.007>
- Bierzuńska P., Cais-Sokolińska D., Rudzińska M., Gramza Michalowska A. (2017) Evaluation of antioxidant activity of whey protein to improve cholesterol oxidation stability in fresh white cheese from buttermilk. *Journal of Food and Nutrition Research* 56:101-108
- Brennan C. S., Tudorica C. M. (2008) Carbohydrate-based fat replacers in the modification of the rheological, textural and sensory quality of yoghurt: comparative study of the utilisation of barley beta-glucan, guar gum and inulin. *International Journal of Food Science & Technology* 43 (5):824-833. doi:[10.1111/j.1365-2621.2007.01522.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01522.x)
- Bryant C. M., McClements D. J. (2000) Influence of NaCl and CaCl₂ on Cold-Set Gelation of Heat-denatured Whey Protein. *Journal of Food Science* 65 (5):801-804. doi:[10.1111/j.1365-2621.2000.tb13590.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb13590.x)
- Conway V., Gauthier S., Pouliot Y. (2012) Antioxidant Activities of Buttermilk Proteins, Whey Proteins, and Their Enzymatic Hydrolysates. *Journal of agricultural and food chemistry* 61. doi:[10.1021/jf304309g](https://doi.org/10.1021/jf304309g)
- Cui S. W., Eskin M. A. N., Wu Y., Ding S. (2006) Synergisms between yellow mustard mucilage and galactomannans and applications in food products — A mini review. *Advances in Colloid and Interface Science* 128-130:249-256. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.11.012>
- Chaharbaghi E., Khodaiyan F., Hosseini S. S. (2017) Optimization of pectin extraction from pistachio green hull as a new source. *Carbohydrate Polymers* 173:107-113. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.047>
- Chaisawang M., Supphantharika M. (2006) Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. *Food Hydrocolloids* 20 (5):641-649. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.06.003>
- Chang Q. (2016) Colloid and Interface Chemistry for Water Quality Control.

- Chaudhury A., Das S. (2011) Recent Advancement of Chitosan-Based Nanoparticles for Oral Controlled Delivery of Insulin and Other Therapeutic Agents. *AAPS PharmSciTech* 12 (1):10-20. doi:10.1208/s12249-010-9561-2
- Chen Q., Hu Z., Yao F. Y.-D., Liang H. (2016) Study of two-stage microwave extraction of essential oil and pectin from pomelo peels. *LWT - Food Science and Technology* 66:538-545. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.019
- Chi H., Xu K., Wu X., Chen Q., Xue D., Song C., Zhang W., Wang P. (2008) Effect of acetylation on properties of corn starch. *Food Chemistry* 106:923-928. doi:10.1016/j.foodchem.2007.07.002
- Dafe A., Etemadi H., Dilmaghani A., Mahdavinia G. (2017) Investigation of pectin/starch hydrogel as a carrier for oral delivery of probiotic bacteria. *International Journal of Biological Macromolecules* 97. doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.01.060
- de Kruif C. G., Weinbreck F., de Vries R. (2004) Complex coacervation of proteins and anionic polysaccharides. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 9 (5):340-349. doi:https://doi.org/10.1016/j.cocis.2004.09.006
- Dekkers B., Boom R., Goot A. J. (2018) Viscoelastic properties of soy protein isolate - pectin blends: Richer than those of a simple composite material. *Food Research International* 107. doi:10.1016/j.foodres.2018.02.037
- Dickinson E. (2009) Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids* 23 (6):1473-1482. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005
- Faravash R. S., Ashtiani F. Z. (2008) The influence of acid volume, ethanol-to-extract ratio and acid-washing time on the yield of pectic substances extraction from peach pomace. *Food Hydrocolloids* 22 (1):196-202. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.04.003
- Farris S., Schaich K. M., Liu L., Piergiovanni L., Yam K. L. (2009) Development of polyion-complex hydrogels as an alternative approach for the production of bio-based polymers for food packaging applications: a review. *Trends in Food Science & Technology* 20 (8):316-332. doi:https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.04.003

- Ferreira-Dias S., Correia A., Fonseca M. (2003) Response surface modeling of glycerolysis catalyzed by *Candida rugosa* lipase immobilized in different polyurethane foams for the production of partial glycerides. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 21:71-80. doi:10.1016/S1381-1177(02)00142-X
- García-García E., Totosaus A. (2008) Low-fat sodium-reduced sausages: Effect of the interaction between locust bean gum, potato starch and κ-carrageenan by a mixture design approach. *Meat Science* 78 (4):406-413. doi:https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.003
- Garrido T., Etxabide A., Guerrero P., de la Caba K. (2016) Characterization of agar/soy protein biocomposite films: Effect of agar on the extruded pellets and compression moulded films. *Carbohydrate Polymers* 151:408-416. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.089
- Glicksman M. (1987) Utilization of seaweed hydrocolloids in the food industry. *Hydrobiologia* 151 (1):31-47. doi:10.1007/BF00046103
- Goycoolea F., Cardenas A. (2003) Pectins from *Opuntia* spp.: A short review. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 5
- Granados Sánchez D., Castañeda Pérez A. D., Universidad Autónoma C. (1991) El nopal : historia, fisiología, genética e importancia frutícola. Trillas : Universidad Autónoma de Chapingo, México
- Grassino A. N., Brnčić M., Vikić-Topić D., Roca S., Dent M., Brnčić S. R. (2016) Ultrasound assisted extraction and characterization of pectin from tomato waste. *Food Chemistry* 198:93-100. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.095
- Guo X., Guo X., Meng H., Chen X., Zeng Q., Yu S. (2019) Influences of different pectins on the emulsifying performance of conjugates formed between pectin and whey protein isolate. *International Journal of Biological Macromolecules* 123:246-254. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.040
- Hobbs C., Swartz C., Maronpot R., Davis J., Recio L., Hayashi S.-M. (2011) Evaluation of the genotoxicity of the food additive, gum ghatti. *Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association* 50:854-860. doi:10.1016/j.fct.2011.11.021

- Hollingworth C. S. (2010) Food hydrocolloids: Characteristics, properties and structures.
- Hosseini S. S., Khodaiyan F., Yarmand M. S. (2016) Optimization of microwave assisted extraction of pectin from sour orange peel and its physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers* 140:59-65. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.051>
- Huang X., Kakuda Y., Cui W. (2001) Hydrocolloids in emulsions: particle size distribution and interfacial activity. *Food Hydrocolloids* 15 (4):533-542. doi:[https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00091-1)
- Hui R., Qi-he C., Ming-liang F., Qiong X., Guo-qing H. (2009) Preparation and properties of octenyl succinic anhydride modified potato starch. *Food Chemistry* 114:81-86. doi:10.1016/j.foodchem.2008.09.019
- Imran M., Revol-Junelles A.-M., Martyn A., Tehrani E. A., Jacquot M., Linder M., Desobry S. (2010) Active Food Packaging Evolution: Transformation from Micro- to Nanotechnology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 50 (9):799-821. doi:10.1080/10408398.2010.503694
- Jackson C. L., Dreaden T. M., Theobald L. K., Tran N. M., Beal T. L., Eid M., Gao M. Y., Shirley R. B., Stoffel M. T., Kumar M. V., Mohnen D. (2007) Pectin induces apoptosis in human prostate cancer cells: correlation of apoptotic function with pectin structure. *Glycobiology* 17 (8):805-819. doi:10.1093/glycob/cwm054
- Jafari F., Khodaiyan F., Kiani H., Hosseini S. S. (2017) Pectin from carrot pomace: Optimization of extraction and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers* 157:1315-1322. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.013>
- Jin B., Zhou X., Liu Y., Li X., Mai Y., Liao Y., Liao J. (2018) Physicochemical stability and antioxidant activity of soy protein/pectin/tea polyphenol ternary nanoparticles obtained by photocatalysis. *International Journal of Biological Macromolecules* 116:1-7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.164>
- Kalegowda P., Singh Chauhan A., Mysore Nanjaraj Urs S. (2017) Opuntia dillenii (Ker-gawl) haw fruit peel pectin: Physicochemical, rheological, and functional behavior. *Journal of Food Processing and Preservation* 41 (5):e13165. doi:10.1111/jfpp.13165

- Kang J., Cui S., Chen J., Wang Q., Phillips G., Nikiforuk J. (2012) Structural investigation of a glycoprotein from gum ghatti. *Carbohydrate Polymers* 89:749–758. doi:10.1016/j.carbpol.2012.04.004
- Karim A. A., Bhat R. (2008) Gelatin alternatives for the food industry: recent developments, challenges and prospects. *Trends in Food Science & Technology* 19 (12):644-656. doi:https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.08.001
- Karimi N., Mohamadi Sani A., Pourahmad R. (2016) Influence of carboxy methyl cellulose (CMC) and pectin on rheological, physical stability and sensory properties of milk and concentrated jujuba mixture. *Journal of Food Measurement and Characterization* 10. doi:10.1007/s11694-016-9318-z
- Khajouei R. A., Keramat J., Hamdami N., Ursu A.-V., Delattre C., Laroche C., Gardarin C., Lecerf D., Desbrières J., Djelveh G., Michaud P. (2018) Extraction and characterization of an alginate from the Iranian brown seaweed *Nizimuddinia zanardini*. *International Journal of Biological Macromolecules* 118:1073-1081. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.154
- Koupantsis T., Pavlidou E., Paraskevopoulou A. (2014) Flavour encapsulation in milk proteins – CMC coacervate-type complexes. *Food Hydrocolloids* 37:134–142. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.10.031
- Kristo E., Biliaderis C. G., Zampraka A. (2007) Water vapour barrier and tensile properties of composite caseinate-pullulan films: Biopolymer composition effects and impact of beeswax lamination. *Food Chemistry* 101 (2):753-764. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.02.030
- Krzeminski A., Prell K. A., Busch-Stockfisch M., Weiss J., Hinrichs J. (2014) Whey protein–pectin complexes as new texturising elements in fat-reduced yoghurt systems. *International Dairy Journal* 36 (2):118-127. doi:https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2014.01.018
- Kumar A., Chauhan G. S. (2010) Extraction and characterization of pectin from apple pomace and its evaluation as lipase (steapsin) inhibitor. *Carbohydrate Polymers* 82 (2):454-459. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.05.001
- Lefsih K., Delattre C., Pierre G., Michaud P., Aminabhavi T. M., Dahmoune F., Madani K. (2016) Extraction, characterization and gelling behavior enhancement of pectins from the cladodes of *Opuntia ficus indica*.

- International Journal of Biological Macromolecules* 82:645-652.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.10.046>
- Lefsih K., Giacomazza D., Dahmoune F., Mangione M. R., Bulone D., San Biagio P. L., Passantino R., Costa M. A., Guarrasi V., Madani K. (2017) Pectin from *Opuntia ficus indica*: Optimization of microwave-assisted extraction and preliminary characterization. *Food Chemistry* 221:91-99.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.073>
- Li J.-M., Nie S.-P. (2016) The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food Hydrocolloids* 53:46-61.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.035>
- Liew S. Q., Ngoh G. C., Yusoff R., Teoh W. H. (2016) Sequential ultrasound-microwave assisted acid extraction (UMAE) of pectin from pomelo peels. *International Journal of Biological Macromolecules* 93:426-435.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.08.065>
- Lira-Ortiz A. L., Reséndiz-Vega F., Ríos-Leal E., Contreras-Esquivel J. C., Chavarría-Hernández N., Vargas-Torres A., Rodríguez-Hernández A. I. (2014) Pectins from waste of prickly pear fruits (*Opuntia albicarpa* Scheinvar 'Reyna'): Chemical and rheological properties. *Food Hydrocolloids* 37:93-99. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.10.018>
- Liu H., Eskin N. A. M., Cui S. W. (2003) Interaction of wheat and rice starches with yellow mustard mucilage. *Food Hydrocolloids* 17 (6):863-869.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(03\)00107-3](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(03)00107-3)
- Liu L., Cao J., Huang J., Cai Y., Yao J. (2010) Extraction of pectins with different degrees of esterification from mulberry branch bark. *Bioresource Technology* 101 (9):3268-3273.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.062>
- Liu X., Guo J., Wan Z., Liu Y.-Y., Ruan Q.-J., Yang X.-Q. (2017) Wheat gluten-stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers. *Food Hydrocolloids* 77. doi:10.1016/j.foodhyd.2017.09.032
- Lootens D., Capel F., Durand D., Nicolai T., Boulenguer P., Langendorff V. (2003) Influence of pH, Ca concentration, temperature and amidation on the gelation of low methoxyl pectin. *Food Hydrocolloids* 17 (3):237-244.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(02\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00056-5)

- Ma Y.-S., Pan Y., Xie Q.-T., Li X.-M., Zhang B., Chen H.-Q. (2019) Evaluation studies on effects of pectin with different concentrations on the pasting, rheological and digestibility properties of corn starch. *Food Chemistry* 274:319-323. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.005>
- Mancini F., McHugh T. H. (2000) Fruit-alginate interactions in novel restructured products. *Food / Nahrung* 44 (3):152-157. doi:10.1002/1521-3803(20000501)44:3<152::AID-FOOD152>3.0.CO;2-8
- Martinez M., Suárez-Diéguez T., Cansino N., Alanis E., Sampedro J. (2010) INNOVACION DE PRODUCTOS DE ALTO VALOR AGREGADO A PARTIR DE LA TUNA MEXICANA. *Revista Mexicana de Agronegocios* 27
- Mateva N., Srbínovska S., Nikola P., Eftimova E. (2013) Factors affecting the syneresis and coagulation in ultra-filtered cheese. *Journal of Hygienic Engineering and Design* 3:48-53
- Morales-Martínez Y., López-Cuellar M. d. R., Chavarría-Hernández N., Rodríguez-Hernández A. I. (2018) Rheological behaviour of acetylated pectins from cactus pear fruits (*Opuntia albicarpa* and *O. matudae*). *Food Hydrocolloids* 85:110-119. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.07.009>
- Mun S., Kim Y.-L., Kang C.-G., Park K.-H., Shim J.-Y., Kim Y.-R. (2009) Development of reduced-fat mayonnaise using 4 α GTase-modified rice starch and xanthan gum. *International Journal of Biological Macromolecules* 44 (5):400-407. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.02.008>
- Munarin F., Tanzi M. C., Petrini P. (2012) Advances in biomedical applications of pectin gels. *International Journal of Biological Macromolecules* 51 (4):681-689. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.07.002>
- Nakauma M., Funami T., Noda S., Ishihara S., Al-Assaf S., Nishinari K., Phillips G. O. (2008) Comparison of sugar beet pectin, soybean soluble polysaccharide, and gum arabic as food emulsifiers. 1. Effect of concentration, pH, and salts on the emulsifying properties. *Food Hydrocolloids* 22 (7):1254-1267. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.09.004>

- Nedovic V., Kalusevic A., Manojlovic V., Levic S., Bugarski B. (2011) An overview of encapsulation technologies for food applications. *Procedia Food Science* 1:1806-1815. doi:<https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.265>
- Nešić A., Onjia A., Davidović S., Dimitrijević S., Errico M. E., Santagata G., Malinconico M. (2017) Design of pectin-sodium alginate based films for potential healthcare application: Study of chemico-physical interactions between the components of films and assessment of their antimicrobial activity. *Carbohydrate Polymers* 157:981-990. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.054>
- Nishinari K., Fang Y., Yang N., Yao X., Zhao M., Zhang K., Gao Z. (2018) Gels, emulsions and application of hydrocolloids at Phillips Hydrocolloids Research Centre. *Food Hydrocolloids* 78:36-46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.07.035>
- Nordby M. H., Kjørnksen A. L., Nyström B., Roots J. (2003) Thermoreversible gelation of aqueous mixtures of pectin and chitosan. *Rheology. Biomacromolecules* 4 (2):337-343. doi:10.1021/bm020107+
- Nussinovitch A. (1997) Hydrocolloid applications gum technology in the food and other industries. Blackie Academic & Professional, London; New York
- Nussinovitch A. (2009) Plant Gum Exudates of the World: Sources, Distribution, Properties, and Applications. CRC Press,
- Nussinovitch A., Hirashima M. (2014) Cooking innovations : using hydrocolloids for thickening, gelling, and emulsification. Available via <http://worldcat.org>. <http://www.crcnetbase.com/isbn/9781439875896>.
- Oliveira C., Giordani D., Lutckemier R., Gurak P., Cladera-Olivera F., Marczak L. (2016) Extraction of pectin from passion fruit peel assisted by ultrasound. *LWT - Food Science and Technology* 71. doi:10.1016/j.lwt.2016.03.027
- Park J. J., Olawuyi I. F., Lee W. Y. (2020) Characteristics of low-fat mayonnaise using different modified arrowroot starches as fat replacer. *International Journal of Biological Macromolecules* 153:215-223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.331>
- Pasquel A. (2001) Gomas: Una aproximación a la industria de alimentos. *Rev Amazon Invest Aliment* 1
- Phillips G., Williams P. (2000) Handbook of Hydrocolloids. *Woodhead Publ*:1-924. doi:10.1533/9781845695873

- Polowsky P. J., Janaswamy S. (2015) Hydrocolloid-based nutraceutical delivery systems: Effect of counter-ions on the encapsulation and release. *Food Hydrocolloids* 43:658-663.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.033>
- Prajapati V. D., Jani G. K., Moradiya N. G., Randeria N. P. (2013) Pharmaceutical applications of various natural gums, mucilages and their modified forms. *Carbohydrate Polymers* 92 (2):1685-1699.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.021>
- Prakash Maran J., Sivakumar V., Thirugnanasambandham K., Sridhar R. (2013) Optimization of microwave assisted extraction of pectin from orange peel. *Carbohydrate Polymers* 97 (2):703-709.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.05.052>
- Prochaska K., Kędziora P., Le Thanh J., Lewandowicz G. (2007) Surface activity of commercial food grade modified starches. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 60 (2):187-194.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.06.005>
- Protte K., Weiss J., Hinrichs J., Knaapila A. (2019) Thermally stabilised whey protein-pectin complexes modulate the thermodynamic incompatibility in hydrocolloid matrixes: A feasibility-study on sensory and rheological characteristics in dairy desserts. *LWT* 105:336-343.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.047>
- Raji Z., Khodaiyan F., Rezaei K., Kiani H., Hosseini S. S. (2017) Extraction optimization and physicochemical properties of pectin from melon peel. *International Journal of Biological Macromolecules* 98:709-716.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.146>
- Rockville. Us. United States Pharmacopeial Convention I. (2003) USP 26. The United States pharmacopeia. NF 21. The national formulary. United States Pharmacopeial Convention, Inc.. Rockville,
- Rodríguez-Hernández A. I., Tecante A. (1999) Dynamic viscoelastic behavior of gellan- κ -carrageenan and gellan-xanthan gels. *Food Hydrocolloids* 13 (1):59-64. doi:[https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(98\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(98)00070-8)
- Rodriguez Furlán L. T., Padilla A. P., Campderrós M. E. (2014) Development of reduced fat minced meats using inulin and bovine plasma proteins as fat

- replacers. *Meat Science* 96 (2, Part A):762-768. doi:<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.09.015>
- Rodsamran P., Sothornvit R. (2019) Microwave heating extraction of pectin from lime peel: Characterization and properties compared with the conventional heating method. *Food Chemistry* 278:364-372. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.067>
- Roy N., Saha N., Kitano T., Saha P. (2012) Biodegradation of PVP-CMC hydrogel film: A useful food packaging material. *Carbohydrate polymers* 89:346-353. doi:10.1016/j.carbpol.2012.03.008
- Ruiz-Capillas C., Triki M., Herrero A. M., Rodriguez-Salas L., Jiménez-Colmenero F. (2012) Konjac gel as pork backfat replacer in dry fermented sausages: Processing and quality characteristics. *Meat Science* 92 (2):144-150. doi:<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.028>
- 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. doi:10.1007/s13197-010-0162-6
- Sandhu K., Kaur M., Singh N., Lim S.-T. (2008) A comparison of native and oxidized normal and waxy corn starches: Physicochemical, thermal, morphological and pasting properties. *LWT - Food Science and Technology* 41:1000-1010. doi:10.1016/j.lwt.2007.07.012
- Seixas F. L., Fukuda D. L., Turbiani F. R. B., Garcia P. S., Petkowicz C. L. d. O., Jagadevan S., Gimenes M. L. (2014) Extraction of pectin from passion fruit peel (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) by microwave-induced heating. *Food Hydrocolloids* 38:186-192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.12.001>
- Seymour G. B., Knox J. P. (2002) *Pectins and Their Manipulation*. Blackwell,
- Shi L.-E., Li Z.-H., Zhang Z.-L., Zhang T.-T., Yu W.-M., Zhou M.-L., Tang Z.-X. (2013) Encapsulation of *Lactobacillus bulgaricus* in carrageenan-locust bean gum coated milk microspheres with double layer structure. *LWT - Food Science and Technology* 54:147-151. doi:10.1016/j.lwt.2013.05.027
- Singh J., Kaur L., McCarthy O. J. (2007) Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—A review. *Food*

-
- Hydrocolloids* 21 (1):1-22.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.02.006>
- Soultani G., Evageliou V., Koutelidakis A. E., Kapsokefalou M., Komaitis M. (2014) The effect of pectin and other constituents on the antioxidant activity of tea. *Food Hydrocolloids* 35:727-732.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.005>
- Srivastava P., Malviya R. (2011) Sources of pectin, extraction and its applications in pharmaceutical industry - An overview. *Indian Journal of Natural Products and Resources* 2:10-18
- Steffe J. F. (1996) *Rheological Methods in Food Process Engineering*. Freeman Press,
- Sumaya-Martínez M. T., Cruz-Jaime S., Madrigal-Santillán E., García-Paredes J. D., Cariño-Cortés R., Cruz-Cansino N., Valadez-Vega C., Martínez-Cardenas L., Alanís-García E. (2011) Betalain, Acid ascorbic, phenolic contents and antioxidant properties of purple, red, yellow and white cactus pears. *International journal of molecular sciences* 12 (10):6452-6468.
doi:10.3390/ijms12106452
- Sun C., Liang B., Sheng H., Wang R., Zhao J., Zhang Z., Zhang M. (2018) Influence of initial protein structures and xanthan gum on the oxidative stability of O/W emulsions stabilized by whey protein. *International Journal of Biological Macromolecules* 120:34-44.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.070>
- Swamy G. J., Muthukumarappan K. (2017) Optimization of continuous and intermittent microwave extraction of pectin from banana peels. *Food Chemistry* 220:108-114.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.197>
- Sworn G., Sanderson G. R., Gibson W. (1995) Gellan gum fluid gels. *Food Hydrocolloids* 9 (4):265-271. doi:[https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(09\)80257-9](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(09)80257-9)
- Thakur B. R., Singh R. K., Handa A. K., Rao M. A. (1997) Chemistry and uses of pectin — A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 37 (1):47-73. doi:10.1080/10408399709527767
- van Otterloo J., Cruden A. R. (2016) Rheology of pig skin gelatine: Defining the elastic domain and its thermal and mechanical properties for geological

- analogue experiment applications. *Tectonophysics* 683:86-97.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.019>
- Varela P., Fiszman S. (2011) Hydrocolloids in fried foods. A review. *Food Hydrocolloids - FOOD HYDROCOLLOID* 25:1801-1812.
doi:10.1016/j.foodhyd.2011.01.016
- Vaziri A. S., Alemzadeh I., Vossoughi M., Khorasani A. C. (2018) Co-microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* and DHA fatty acid in alginate-pectin-gelatin biocomposites. *Carbohydrate Polymers* 199:266-275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.002>
- Verdalet I., Martínez-Ortiz L., Martínez-Bustos F. (2013) Characterization of new sources of derivative starches as wall materials of essential oil by spray drying. *Food Science and Technology (Campinas)* 33:757-764.
doi:10.1590/S0101-20612013000400023
- Volić M., Pajić-Lijaković I., Djordjević V., Knežević-Jugović Z., Pećinar I., Stevanović-Dajić Z., Veljović Đ., Hadnadjev M., Bugarski B. (2018) Alginate/soy protein system for essential oil encapsulation with intestinal delivery. *Carbohydrate Polymers* 200:15-24.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.033>
- Voragen A. G. J., Coenen G.-J., Verhoef R. P., Schols H. A. (2009) Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. *Structural Chemistry* 20 (2):263. doi:10.1007/s11224-009-9442-z
- Wang M., Huang B., Fan C., Zhao K., Hu H., Xu X., Pan S., Liu F. (2016a) Characterization and functional properties of mango peel pectin extracted by ultrasound assisted citric acid. *International Journal of Biological Macromolecules* 91:794-803.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.06.011>
- Wang W., Ma X., Jiang P., Hu L., Zhi Z., Chen J., Ding T., Ye X., Liu D. (2016b) Characterization of pectin from grapefruit peel: A comparison of ultrasound-assisted and conventional heating extractions. *Food Hydrocolloids* 61:730-739.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.019>
- Wang X., Chen Q., Lü X. (2014) Pectin extracted from apple pomace and citrus peel by subcritical water. *Food Hydrocolloids* 38:129-137.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.12.003>

- Wang Y., Zheng H., Li Y., Li B., Chen Y. (2015) One step procedure for desalting salty egg white and preparing fat analogue and its application in mayonnaise. *Food Hydrocolloids* 45:317-326. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.007>
- Wicker L., Kim Y., Kim M.-J., Thirkield B., Lin Z., Jung J. (2014) Pectin as a bioactive polysaccharide – Extracting tailored function from less. *Food Hydrocolloids* 42:251-259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.01.002>
- Wijayanti H. B., Bansal N., Deeth H. C. (2014) Stability of Whey Proteins during Thermal Processing: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 13 (6):1235-1251. doi:10.1111/1541-4337.12105
- Wikiera A., Mika M., Starzyńska-Janiszewska A., Stodolak B. (2016) Endoxylanase and endo-cellulase-assisted extraction of pectin from apple pomace. *Carbohydrate Polymers* 142:199-205. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.01.063>
- Willats W. G. T., Knox J. P., Mikkelsen J. D. (2006) Pectin: new insights into an old polymer are starting to gel. *Trends in Food Science & Technology* 17 (3):97-104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.10.008>
- Wu Y., Cui W., Eskin N. A. M., Goff H. D. (2011) Stress relaxation in synergistically associated polysaccharides: Galactomanans and a non-pectic polysaccharide fraction from yellow mustard mucilage. *Carbohydrate Polymers* 84 (3):984-989. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.053>
- Yahia E., Mondragon Jacobo C. (2011) Nutritional components and anti-oxidant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *Food Research International - FOOD RES INT* 44:2311-2318. doi:10.1016/j.foodres.2011.02.042
- Yousefi M., Jafari S. M. (2019) Recent advances in application of different hydrocolloids in dairy products to improve their techno-functional properties. *Trends in Food Science & Technology* 88:468-483. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.015>
- Zhang B., Bai B., Pan Y., Li X.-M., Cheng J.-S., Chen H.-Q. (2018) Effects of pectin with different molecular weight on gelatinization behavior, textural

- properties, retrogradation and in vitro digestibility of corn starch. *Food Chemistry* 264:58-63. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.011>
- Zhang L., Ye X., Ding T., Sun X., Xu Y., Liu D. (2013) Ultrasound effects on the degradation kinetics, structure and rheological properties of apple pectin. *Ultrasonics Sonochemistry* 20 (1):222-231. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.021>
- Zhao Y., Chen Z., Wu T. (2018) Cryogelation of alginate improved the freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions. *Carbohydrate Polymers* 198:26-33. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.013>
- Zouambia Y., Youcef Ettoumi K., Krea M., Moulai-Mostefa N. (2017) A new approach for pectin extraction: Electromagnetic induction heating. *Arabian Journal of Chemistry* 10 (4):480-487. doi:<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.11.011>