



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Química

ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ADSORCIÓN DEL
MUCÍLAGO LIOFILIZADO DE LA SEMILLA DE CHÍA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Químico

PRESENTA:

Manuel Iván Contreras Villegas

DIRECTOR DE TESIS :

Dr. César Pérez Alonso

Toluca, Estado de México, Octubre 2019



Índice

1. Resumen	7
2. Introducción	8
3. Antecedentes	9
3.1. La semilla de chía: <i>Savia Hispánica Lamiaceae</i>	9
3.2. Producción nacional	12
3.2.1. Mercado	14
3.3. Coloides	15
3.3.1. Propiedades de los coloides	15
3.3.2. Coloides hidrofílicos y coloides hidrofóbicos	17
3.4. Biopolímeros	17
3.5. Hidrocoloides	18
3.5.1. Clasificación de los hidrocoloides	19
3.5.2. Propiedades funcionales	21
3.5.3. Sectores de aplicación	22
3.6. Mucílagos	24
3.6.1. Propiedades funcionales	26
3.6.2. Aplicaciones del mucílago de la semilla de chía	27
3.6.3. Beneficio social	30
3.7. Isotermas de sorción	31
3.7.1. Adsorción	31
3.7.2. Actividad acuosa (a_w)	32
3.7.3. Las isotermas de adsorción	34
4. Justificación, hipótesis y objetivos	43
4.1. Justificación	43
4.2. Hipótesis	44
4.3. Objetivo general	44
4.4. Objetivos específicos	44
5. Metodología	45
5.1. Materiales	45
5.2. Extracción del mucílago	45
5.3. Liofilización del mucílago	45

5.4. Isotermas de adsorción	45
5.5. Área específica de adsorción	47
6. Resultados y discusión	49
6.1. Isotermas de adsorción	49
6.1.1. Modelo teórico de B.E.T.	49
6.1.2. Modelo teórico de G.A.B.	50
6.1.3. Modelo semiempírico de Lewicki (dos parámetros)	54
6.1.4. Modelo semiempírico de Halsey	54
6.1.5. Modelo empírico de Oswin	56
6.1.6. Modelo empírico de Henderson	56
6.2. Interpretación de las isotermas de adsorción: modelo teórico de G.A.B.	58
6.3. Área específica de adsorción	61
6.3.1. Radio del poro	61
7. Conclusiones	64
8. Glosario	65
9. Referencias	70
10. Anexos	74
10.1. Anexo I: datos experimentales de las isotermas de adsorción para el mucílago de la chía liofilizado a 25°C, 35°C y 40°C	74
10.2. Anexo II: datos ajustados de las isotermas de adsorción con los modelos matemáticos para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C, 35°C y 40°C	75
10.3. Anexo III: densidad, tensión superficial y volumen molar del agua a 25°C, 35°C y 40°C	84
10.4. Anexo III: clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal (w)	84

Índice de figuras

1.	Chía: <i>Savia Hispánica Lamiaceae</i>	14
2.	(a) Fracción del polisacárido péctico (mucílago teñido con rojo de rutenio) y (b) Fracción de hemicelulosa (mucílago teñido con azul de metileno).	25
3.	Fenómeno de adsorción	31
4.	Fenómenos de superficie	31
5.	Diferencia entre el adsorbente, el adsorbato y el adsorbtivo	34
6.	Los seis tipos de isoterma de adsorción según la clasificación de la IUPAC	41
7.	Isoterma general de sorción para productos alimenticios	42
8.	Isoterma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía. Modelo de B.E.T.	52
9.	Isoterma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía. Modelo de G.A.B.	52
10.	Isoterma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía. Modelo de Lewicki (2 parámetros)	55
11.	Isoterma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía. Modelo de Halsey	56
12.	Isoterma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía. Modelo de Oswin	57
13.	Isoterma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía. Modelo de Henderson	58
14.	Regiones de la isoterma de adsorción a 25°C: modelo de G.A.B.	59
15.	Regiones de la isoterma de adsorción a 35°C: modelo de G.A.B.	59
16.	Regiones de la isoterma de adsorción a 40°C: modelo de G.A.B.	60

Índice de tablas

1.	Composición química de la semilla de chía	11
2.	Producción de la chía en México - Año 2014	12
3.	Producción de la chía en México - Año 2015	13
4.	Producción de la chía en México - Año 2016	13
5.	Producción de la chía en México - Año 2017	13
6.	Tipos de coloides	15
7.	Clasificación de los hidrocoloides	19
8.	Industria panificadora y de cereales	27
9.	Industria láctea	28
10.	Emulsiones alimenticias	28
11.	Envasado de alimentos	29
12.	Alimentos en polvo	29
13.	Parámetros del modelo de B.E.T. para las isothermas de adsorción	49
14.	Parámetros del modelo de G.A.B. para las isothermas de adsorción	50
15.	Parámetros del modelo de Lewicki (dos parámetros) para las isothermas de adsorción	54
16.	Parámetros del modelo de Halsey para las isothermas de adsorción	55
17.	Parámetros del modelo de Oswin para las isothermas de adsorción	56
18.	Parámetros del modelo Henderson para las isothermas de adsorción	57
19.	Áreas específicas de adsorción a 25°C, 35°C y 40°C	61
20.	Actividad acuosa para diferentes valores específicos de contenido de humedad en el equilibrio a 25°C, 35°C y 40°C	62
21.	Radio del poro del mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C, 35°C y 40°C	63
22.	Datos experimentales de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C	74
23.	Datos experimentales de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 35°C	74
24.	Datos experimentales de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 40°C	75
25.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C. Modelo de B.E.T.	75

26.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 35°C. Modelo de B.E.T.	76
27.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 40°C. Modelo de B.E.T.	76
28.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 25°C. Modelo de G.A.B.	77
29.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 35°C. Modelo de G.A.B.	77
30.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 40°C. Modelo de G.A.B.	78
31.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 25°C. Modelo de Lewicki (2 parámetros)	78
32.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 35°C. Modelo de Lewicki (2 parámetros)	79
33.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 40°C. Modelo de Lewicki (2 parámetros)	79
34.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 25°C. Modelo de Halsey	80
35.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 35°C. Modelo de Halsey	80
36.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 40°C. Modelo de Halsey	81
37.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 25°C. Modelo de Oswin	81
38.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 35°C. Modelo de Oswin	82
39.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 40°C. Modelo de Oswin	82
40.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 25°C. Modelo de Henderson	83
41.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 35°C. Modelo de Henderson	83
42.	Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a 40°C. Modelo de Henderson	84
43.	Densidad, tensión superficial y volumen molar del agua a 25°C, 35°C y 40°C	84
44.	Clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal (w)	84

1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue estudiar el fenómeno de adsorción en el mucílago liofilizado de la semilla de chíá a partir de la construcción de las isotermas, estableciendo los diferentes parámetros matemáticos de ajuste, el contenido de humedad en el equilibrio, el contenido de humedad en la monocapa y la actividad acuosa con base a seis modelos de aplicación: dos modelos teóricos, B.E.T. y G.A.B., dos modelos semiempíricos, Lewicki (dos parámetros) y Halsey y por último dos modelos empíricos, Oswin y Henderson.

El primer paso fue la extracción del mucílago mediante un proceso fisicoquímico, en seguida la muestra se deshidrató utilizando un liofilizador. Las isotermas de adsorción a 25°C, 35°C y 40°C se determinaron mediante el método gravimétrico de celdas en equilibrio las cuales contenían soluciones salinas saturadas. La actividad acuosa se midió con un medidor *Aqualab* con compensación de temperatura y el contenido de humedad en el equilibrio se determinó por diferencia de peso después de secarlo al vacío.

Posteriormente, los resultados experimentales se ajustaron utilizando los seis modelos descritos, en donde el de G.A.B. se desarrolla como el modelo óptimo en los datos obtenidos. La relevancia de este recae principalmente en las variables intrínsecas que proporciona, como el valor de la monocapa (M_0), ya que indica la cantidad de agua que se adsorbe fuertemente en sitios específicos y se considera como el valor óptimo en el que un alimento es más estable. La constante de Guggenheim (C_G) y el parámetro matemático de corrección para las propiedades de las moléculas en la multicapa con respecto al agua (K) representan adecuadamente los datos experimentales en un rango de actividad acuosa de 0 a 0.95 para la mayoría de los alimentos de interés práctico. Los valores encontrados a partir de este modelo teórico para el contenido de humedad en la monocapa (M_0) son 7.929, 5.326 y 4.048 $\left[\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.}\right]$, para la actividad acuosa (a_w) de 0.355, 0.298 y 0.278, para la constante de Guggenheim (C_G) 4.965, 6.164 y 6.526 y para el parámetro matemático (K) son 0.872, 0.963 y 1.010 a 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente. Las isotermas de adsorción corresponden a una clasificación sigmoidal de tipo II característica de sólidos no porosos.

Finalmente, se determinó el área específica de adsorción (S_0). Los valores obtenidos fueron 277.517, 186.437 y 141.692 $S_0 \left[\frac{m^2}{g}\right]$ a 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente. La disminución revela que las energías de unión asociadas con la adsorción en la monocapa y multicapa disminuyeron al aumentar la temperatura. El radio de los poros (r_p) en el mucílago liofilizado de la semilla de chíá se clasificaron en microporos y mesoporos de acuerdo a la IUPAC.

2. Introducción

En las diferentes investigaciones que se han realizado entorno al estudio de la composición de los alimentos, el agua juega el papel más importante. Incluso en los propios mecanismos metabólicos, es definido como el principal disolvente en el que tiene lugar estos procesos químicos. En efecto, es de suma relevancia indagar sobre las propiedades y la naturaleza del agua, principalmente sobre los efectos en los sistemas alimentarios con el fin de comprender los fenómenos asociados.

La Chía (*Savia Hispánica Lamiaceae*) produce pequeñas semillas de forma ovalada de las cuales se ha encontrado que contienen diversos compuestos nutricionales atractivos, tales como proteínas, antioxidantes, omega 3 y fibra dietética. Esto ha apuntado a la semilla de chía como una materia prima importante para obtener alimentos funcionales. Los científicos y tecnólogos de alimentos han estudiado varios aspectos de este alimento, ya que el conocimiento de las propiedades de adsorción permite determinar el contenido de humedad adecuado para el proceso de secado y el diseño de equipos relacionados con el almacenamiento y el transporte. En los últimos años, la demanda de hidrocoloides de fuentes vegetales ha aumentado porque son el ingrediente más notable en los alimentos líquidos y semisólidos.

Cuando las semillas de chía están en contacto con agua, exudan lo que se conoce como mucílago. Este biopolímero es usado en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética como espesante, agente de retención de agua, estabilizador de emulsiones, agente de suspensión, aglutinante y como agente de recubrimiento en las películas de empaque. Las diversas investigaciones recaen en la necesidad de encontrar modelos o ecuaciones que se ajusten a las condiciones experimentales y poder encontrar una relación lo más cercana a la realidad para dar explicación a los múltiples fenómenos fisicoquímicos asociados a los alimentos.

El término adsorción describe la condensación de gases sobre superficies libres, a diferencia de la absorción gaseosa en donde las moléculas del gas penetran dentro del sólido. La adsorción (física) ha sido definida por la IUPAC como el enriquecimiento, es decir, adsorción positiva o el vaciamiento, adsorción negativa, de uno o más componentes en una interfase. Los datos de las isothermas de adsorción proporcionan información sobre la estabilidad y la vida útil de un producto. Se utilizan para investigar las características estructurales de un producto alimenticio, como el área específica de adsorción y el radio del poro. La termodinámica de la adsorción de vapor de agua en función de la temperatura proporciona un criterio confiable para predecir la estabilidad de almacenamiento de los productos alimenticios deshidratados.

3. Antecedentes

3.1. La semilla de chía: *Salvia Hispánica Lamiaceae*

Los pseudocereales hacen referencia a semillas o granos de plantas que pertenecen a las familias: *Amaranthaceae* (amarantos) y *Lamiaceae* en la cual está incluida la chía (*Salvia hispánica L.*). El género *Salvia* es de los más diversos con cerca de 1,000 especies distribuidas en todo el mundo. México es considerado el lugar con mayor diversidad con cerca de 500 especies en su territorio (FAO/WHO, 2016).

Durante el tiempo de la conquista española, los pueblos mesoamericanos ya habían domesticado más de 20 especies botánicas con diferentes usos, entre ellos destacaban los cuatro granos más importantes: el maíz, el frijol, el amaranto y la chía. Para los Aztecas y los Mayas esta última especie, representó un grano importante usado en la preparación de pinturas, elaboración de medicinas, alimentación en ceremonias mediante ofrendas, aspectos culinarios, medicinales, artísticos y religiosos, convirtiéndolo en la materia prima más usada de la época prehispánica (Xingú *et al.*, 2017).

La chía es una planta herbácea de 1m a 1.5m de altura, con tallos huecos ramificados de sección cuadrangular con hojas opuestas de bordes aserrados de 80mm a 100mm de longitud y de 40mm a 60mm de ancho, con diferentes grados de aspereza en su superficie. Las flores son hermafroditas, azules o blancas en grupos de cuatro de 1.5mm a 2mm de longitud y de 1mm a 1.2mm de diámetro; son suaves y brillantes, de color pardo grisáceo con manchas irregulares castaño oscuro, en su mayoría y en menor proporción blanquecinas. Se define como una planta autónoma, con uno de los más altos niveles de polinización cruzada en chía cultivada, que en chía silvestre, sin embargo, los insectos son los responsables de la polinización cruzada, obteniendo mayores rendimientos cuando existe la presencia de abejas en la zona de cultivo (Xingú *et al.*, 2017).

La propagación más usada en la chía es por medio de la semilla; comercialmente este es el fruto que se extrae de la planta. Dicho elemento se ha reintroducido en las dietas con la finalidad de mejorar la salud humana, recomendándose por sus altos niveles de proteínas, fibra dietética, vitaminas y minerales (calcio, potasio, magnesio, fósforo, selenio, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, sodio y zinc), pero sobre todo a su alto contenido de aceite omega 3 en comparación con otras fuentes naturales conocidas hasta la fecha (Guiotto *et al.*, 2013).

Se ha demostrado que los ácidos grasos omega 3 son esenciales en la alimentación, y que el cuerpo humano no puede sintetizarlos por si mismo. Es por ello, que la introducción de estos ácidos grasos proporcionan múltiples beneficios a la salud que incluyen la reducción del riesgo cardiovascular, prevención de enfermedades del sistema nervioso y disminución de enfermedades inflamatorias como la artritis reumatoide. Se ha comprobado, también, que favorece el desarrollo del feto, mejora el crecimiento y desarrollo neurológico de los niños (Alejo *et al.*, 2010).

La cantidad y calidad de los componentes nutricionales pueden variar por el sitio de cultivo, las condiciones ambientales, la disponibilidad de nutrientes, clima y tipo de suelo. La chía es un alimento completo y funcional gracias a su contenido de antioxidantes (ácido clorogénico, ácido caféico, miricetina, quercetina y kaempferol flavonoles) y niveles seguros de metales pesados; libre de micotoxinas y por no contener gluten, es una excelente fuente vegetal con el mayor contenido de ácidos grasos esenciales. Su aceite contiene propiedades físico-químicas de interés para la industria alimentaria, considerado como un ingrediente potencial debido a sus beneficios a la salud humana por contener 85.4 % de ácidos grasos poliinsaturados (Xingú *et al.*, 2017).

La chía que se consume y distribuye presenta un color negro con pequeñas muescas elipsoidales que pueden variar entre los 2.11mm de longitud, 1.32mm de ancho y 0.81mm de grosor con un rango de contenido de humedad de 46 - 177 $\frac{g}{Kg (base\ seca)}$ (Capitani *et al.*, 2013).

Por otra parte, se ha encontrado que la composición química de las semillas de chía contienen altos niveles de proteína (21.5 %), lípidos totales (21.69 %), ácidos grasos alfa-linolénicos ($544.8 \frac{mg}{g\ lípidos\ totales}$) (Sargi *et al.*, 2013). De igual forma, un contenido de fibra que corresponde a un polisacárido con un alto peso molecular $0.8 - 2.0 \times 10^6 \frac{g}{mol}$ (Lin *et al.*, 1994).

A continuación, la tabla 1 muestra el detalle de la composición química de las semillas de chía para una porción comestible de 100g:

Tabla 1: Composición química de la semilla de chía

Nutriente	Unidad	Valor
Proteína	(%)	15 a 25
Lípido total (grasa)	(%)	30 a 33
Hidratos de carbono	(%)	26 a 41
Fibra dietética	(%)	18 a 30
Ceniza	mg	4 a 5
Calcio	mg	631
Potasio	mg	407
Magnesio	mg	335
Fósforo	μg	860
Selenio	μg	55.2
Cobre	μg	0.924
Hierro	μg	7.72
Manganeso	μg	2.72
Molibdeno	μg	0.2
Sodio	μg	16
Zinc	μg	4.58
Niacina	mg	6.13
Tiamina	mg	0.18
Rivoflavina	mg	0.04
Vitamina A	IU	44
Ácido α -linolénico	(%)	64.9 a 65.9
Ácido linolénico	(%)	19.8 a 20.3
Ácido palmítico	(%)	6.2 a 6.7
Ácido oleico	(%)	5 a 5.5
Ácido esteárico	(%)	2.7 a 3
Ácido margárico	(%)	0.1
Ácido nonadecanoico	(%)	0.1
Ácido nonadecenoico	(%)	0.2
Ácido araquidico	(%)	0.3
Ácido gadoleico	(%)	0.2
Ácido grasos saturados	(%)	9.3
Ácido grasos poliinsaturados	(%)	85.4
PUFA/SFA	(%)	8.7

*Fuente: Xingú *et al.*, 2017.

3.2. Producción nacional

Hoy en día la producción, consumo y demanda de chía en México y a nivel mundial se ha mantenido en los últimos años, por ser una fuente de aceite con altos niveles de ácidos grasos poliinsaturados y compuestos fenólicos. Nuestro país mantuvo una tendencia a la alza, observándose un incremento gradual en la superficie sembrada. En el año 2006 se cultivaron 15 hectareas, mientras que en el año 2014, se cultivaron 16,721 hectareas, incrementándose así en un 111,473 %, lo anterior, debido al auge y al éxito que ha tenido, ya que es más redituable que otros granos y a la demanda por las propiedades nutraceuticas que le caracterizan. La producción en México se concentra principalmente en Jalisco y Puebla y se empieza a incursionar en nuevas zonas con potencial productivo como lo son el estado de Zacatecas (SIAP, 2019).

En Jalisco la producción se centra en los municipios de: Acatic, Cuquío, Ixtlahuacán del Río y Jamay, mientras en Puebla los municipios productores son: Atzitzihuatlán, Huaquechula, San Felipe Tepemaxalco y Tochimilco. A pesar de ello, el volumen producido ha tenido una baja considerable a lo largo de los últimos 5 años debido a factores externos como lo son las sequías, contaminación ambiental, clima, obsolescencia tecnológica e inseguridad laboral y social; económicamente se ve reflejado en la variabilidad del precio medio rural (SIAP, 2019).

En la tablas 2, 3, 4 y 5 se muestra el comportamiento y evolución de la producción, precio y valor por hectárea que ha tenido la chía en los años 2014 - 2017 a nivel nacional por entidad federativa:

Tabla 2: Producción de la chía en México - Año 2014

Entidad	Superficie sembrada (ha)	Producción (t)	Precio medio rural ($\frac{MXN}{t}$)	Valor producción (miles MXN)
Jalisco	15,790.00	9,058.84	44,408.06	402,285.50
Puebla	460.00	391.30	34,659.61	13,562.31
Nayarit	281.00	97.00	49,793.81	4,830.00
Guanajuato	150.00	0.00	0.00	0.00
Aguascalientes	20.00	0.00	0.00	0.00
San Luis Potosí	20.00	1.00	24,000.00	24.00
Total:	16,721.00	9,548.14	152,771.48	420,701.81

*Fuente: Servicio de Información Agrolimentaria y Pesquera (SIAP), 2019.

Tabla 3: Producción de la chía en México - Año 2015

Entidad	Superficie sembrada (ha)	Producción (t)	Precio medio rural ($\frac{MXN}{t}$)	Valor producción (miles MXN)
Jalisco	11,904.30	6,164.07	49,183.48	303,170.43
Puebla	387.00	307.18	22,868.40	7,024.72
Sinaloa	403.50	234.43	18,089.11	4,240.63
Zacatecas	125.00	105.50	30,000.00	3,165.00
Hidalgo	71.00	58.90	75,618.68	4,453.94
Michoacán	91.00	42.40	24,917.45	1,056.50
Nayarit	146.00	23.46	34,471.10	808.69
Tlaxcala	10.00	13.00	27,000.00	351.00
Aguascalientes	27.00	12.00	25,500.00	306.00
Total	13,164.80	6,960.94	307,648.22	324,576.91

*Fuente: Servicio de Información Agrolimentaria y Pesquera (SIAP), 2019.

Tabla 4: Producción de la chía en México - Año 2016

Entidad	Superficie sembrada (ha)	Producción (t)	Precio medio rural ($\frac{MXN}{t}$)	Valor producción (miles MXN)
Jalisco	4,733.75	2,940.82	39,896.70	117,329.03
Puebla	373.00	287.20	24,843.08	7,134.93
Zacatecas	332.00	279.20	40,000.00	11,168.00
Michoacán	100.00	51.95	27,285.85	1,417.50
Hidalgo	17.00	8.50	76,911.76	653.75
Total	5,555.75	3,567.67	208,937.39	137,703.21

*Fuente: Servicio de Información Agrolimentaria y Pesquera (SIAP), 2019.

Tabla 5: Producción de la chía en México - Año 2017

Entidad	Superficie sembrada (ha)	Producción (t)	Precio medio rural ($\frac{MXN}{t}$)	Valor producción (miles MXN)
Jalisco	3,552.00	2,002.57	43,374.35	86,860.11
Zacatecas	552.00	521.80	35,000.00	18,263.00
Puebla	390.00	326.30	22,930.43	7,482.20
Querétaro	613.15	166.21	40,000.00	6,648.40
Sinaloa	80.00	64.00	16,500.00	1,056.00
Aguascalientes	110.00	55.00	20,000.00	1,100.00
Guanajuato	58.00	47.00	35,127.66	1,651.00
Total	5,471.50	3,207.67	246,865.86	123,900.28

*Fuente: Servicio de Información Agrolimentaria y Pesquera (SIAP), 2019.

Nuestro país cuenta con las condiciones ecológicas óptimas para la producción de chía, encontrando estas características principalmente, en tierras bajas y de altitud intermedia, las cuales cumplen con los requerimientos agroclimáticos de la especie. De igual forma, existe una excelente productividad en las regiones altas de los estados de Nayarit, Michoacán, Morelos, Puebla, México, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. El tipo de suelo, la precipitación y la altitud son los factores que determinan las condiciones óptimas para el cultivo (Xingú *et al.*, 2017).



*Fuente: Arce, 2017

Figura 1: Chía: *Savia Hispánica Lamiaceae*

3.2.1. Mercado

La demanda de la semilla de chía es creciente y es liderada por E.U.A., principalmente por ser un cultivo que tiene un impacto potencial en el mercado a nivel nacional e internacional. Para este máximo consumidor, la elaboración de productos va en aumento. En el año 2011 se introdujeron 21 nuevos productos a base de chía (jugos de fruta) y en 2012 dicha cantidad aumentó a 100 productos (Busilacchi *et al.*, 2015).

Los países de la Unión Europea se están incorporando recientemente a esta tendencia alimentaria, utilizándolo como un producto de inclusión para la fabricación de sus propios alimentos elaborados y a futuro, se espera que países asiáticos se incorporen a esta demanda, lo cual duplicaría el consumo actual a 40,000 toneladas por año.

Busilacchi *et al.* (2015) asegura que los canales de distribución en E.U.A. se derivan en tres grupos de actores dentro de las cadenas de comercialización con la finalidad de llegar a los consumidores:

- Los importadores mayoristas
- Empresas que elaboran productos alimenticios
- Distribuidores minoristas

3.3. Coloides

Un coloide es una dispersión de partículas de una sustancia (fase dispersa) entre un medio dispersor formado por otra sustancia. Las partículas coloidales son mucho más grandes que las moléculas de los solutos comunes; miden entre $1 \times 10^3 \mu\text{m}$ a $1 \times 10^6 \mu\text{m}$. De igual forma, una solución coloidal también carece de la homogeneidad de una disolución común, en donde la fase dispersa y el medio dispersor pueden ser gases, líquidos, sólidos o una combinación de diferentes fases (Chang *et al.*, 2002).

En la tabla 6 se muestran los tipos de coloides de acuerdo a su estado elemental:

Tabla 6: Tipos de coloides

Medio dispersor	Fase dispersa	Nombre	Ejemplo
Gas	Líquido	Aerosol	Bruma, niebla
Gas	Sólido	Aerosol	Humo
Líquido	Gas	Espuma	Crema batida
Líquido	Líquido	Emulsión	Mayonesa
Líquido	Sólido	Sol	Leche de magnesia
Sólido	Gas	Espuma	Espumas plásticas
Sólido	Líquido	Gel	Gelatina, mantequilla
Sólido	Sólido	Sólido	Aleaciones, piedras preciosas

*Fuente: Chang *et al.*, 2002.

3.3.1. Propiedades de los coloides

Adsorción

Por su tamaño, las partículas coloidales tienen una relación área/masa extremadamente grande, por ello son excelentes materiales adsorbentes. En la superficie de las partículas existen fuerzas llamadas de Van der Waals que pueden atraer y retener átomos, iones o moléculas de otras sustancias. A esta adherencia de sustancias ajenas en la superficie de una partícula se le llama adsorción. Las sustancias adsorbidas se mantienen firmemente unidas en capas que suelen tener no más de una o dos moléculas (o iones) de espesor (Chang *et al.*, 2002).

Efecto Tyndall

Una forma de distinguir una disolución de un coloide es mediante el efecto Tyndall. Cuando un rayo de luz pasa a través de un coloide, es dispersado por el medio, este fenómeno se debe a que las partículas coloidales dispersan la luz en todas las direcciones haciéndola visible.

Los rayos de luz pueden ser vistos al pasar a través de un bosque, por ejemplo, como resultado de la dispersión de la luz por las partículas coloidales suspendidas en el aire. Dicha dispersión no se observa con las disoluciones comunes por que las moléculas del soluto son demasiadas pequeñas para interactuar con la luz visible (Chang *et al.*, 2002).

Movimiento Browniano

Ejemplos de este fenómeno son los movimientos observados en partículas de polvo que se desplazan libres al azar en un rayo de sol que ingresa a través de una ventana o las partículas de polvo y humo moviéndose en un rayo de luz proveniente del cuarto de proyección de una sala de cine. El movimiento desordenado de dichas partículas coloidales es debido al bombardeo o choque con las moléculas del medio dispersante, en el ejemplo anterior, sería por las moléculas presentes en el aire (Nitrógeno, Oxígeno, Argón). El movimiento browniano impide que las partículas coloidales se asienten o formen sedimentos (Chang *et al.*, 2002).

Electroforesis

Consiste en la migración de partículas coloidales cargadas dentro de un campo eléctrico. Las partículas coloidales absorben iones en su superficie cargándose positiva o negativamente, aunque todo el sistema coloidal es eléctricamente neutro, estas partículas viajan hacia los electrodos (cátodo y ánodo) mediante fuerzas eléctricas de atracción (Chang *et al.*, 2002).

Diálisis

Se define como el movimiento de iones y moléculas pequeñas a través de una membrana porosa, llamada membrana dialítica o dializante. En los coloides, la diálisis permite purificar el sistema coloidal, puesto que se eliminan iones y otras moléculas pequeñas consideradas impurezas (Chang *et al.*, 2002).

3.3.2. Coloides hidrofílicos y coloides hidrofóbicos

Entre los coloides más importantes se encuentran aquellos en los que el medio dispersor es el agua. Dichos coloides se dividen en dos categorías:

- **Hidrofílicos, con atracción por el agua**
- **Hidrofóbicos, con repulsión por el agua**

Los primeros, son disoluciones que contienen moléculas muy grandes, como las proteínas. Un ejemplo de ello es la hemoglobina, la cual se pliega de tal forma que las partes hidrofílicas de la moléculas son capaces de formar interacciones favorables con las moléculas de agua a través de fuerzas ión-dipolo o mediante la formación de puentes de hidrógeno.

Por otra parte, los coloides hidrofóbicos no son estables en agua y sus partículas forman conglomerados como gotas de aceite en agua. Sin embargo, pueden estabilizarse por adsorción de iones en su superficie, son estos los que interactúan con el agua estabilizando así el coloide. Al mismo tiempo, la repulsión electrostática entre las partículas evita que se junten. Otra forma de estabilización de los coloides hidrofóbicos es por la presencia de otros grupos hidrofílicos en su superficie, tal como lo es el efecto de limpieza del jabón (Chang *et al.*, 2002).

3.4. Biopolímeros

Las gran diversidad de recursos a las que la industria productiva se enfrenta con frecuencia, se refieren ante la necesidad de desarrollar productos con características texturales y organolépticas adecuadas para el consumidor, donde las materias primas estructurales pueden estar constituidos por macromoléculas producidas por semillas. De forma general un biopolímero es una macromolécula que es sintetizada mediante un proceso biológico vegetal. En este sentido las proteínas, el ADN y los polisacáridos son los biopolímeros más importantes (Capitani *et al.*, 2013).

Los biopolímeros están constituidos por polímeros de gran peso molecular los cuales a su vez se conforman por unidades repetitivas llamadas monómeros, estos varían de acuerdo con su polaridad (iónica, bipolar, no-polar), dimensiones e interacciones, por lo cual los polímeros presentan arreglos espontáneos en su estructura. Si un polímero contiene solo un tipo de monómero, se clasifica como homopolímero (almidón o celulosa), pero si contiene diferentes tipos de monómero entonces se clasifica como heteropolímero (proteínas producidas naturalmente) (Capitani *et al.*, 2013).

Dentro de su naturaleza, tienden a adoptar diferentes configuraciones, si se encuentran de forma aislada. En condiciones acuosas, se forman tres grandes grupos:

- **Globulares:** estructuras compactas y rígidas
- **Forma de barra:** estructuras extendidas
- **Forma de espiral:** estructuras dinámicas y flexibles

La conformación molecular y la asociación de biopolímeros están gobernadas por un balance de energías de interacción y efectos entrópicos. Los biopolímeros adoptan este tipo de configuraciones para minimizar su energía libre en condiciones ambientales, basándose en el número de interacciones intermoleculares e intramoleculares, despreciando así las interacciones desfavorables y maximizando su entropía (Capitani *et al.*, 2013).

Por otra parte, la solubilidad está determinada por una combinación de interacciones de Van der Waals, electrostáticas, enlaces de hidrógeno, hidrofóbicas y estéricas. Estas son importantes cuando las moléculas tienen altas proporciones de grupos no-polares en su superficie. Las interacciones electrostáticas juegan un papel importante en la determinación del incremento o disminución de la solubilidad pudiendo ser atractivas o repulsivas dependiendo de los signos de las cargas involucradas. Las propiedades espesantes y el comportamiento viscoelástico puede verse afectado significativamente por variables como la velocidad de corte, la concentración del compuesto, la temperatura, la presión, la fuerza iónica y el pH.

Existe una clase particular de biopolímeros, los polisacáridos provenientes de semillas, a los que en términos de su uso en la industria alimentaria se les incluye dentro de la categoría de los hidrocoloides (Capitani *et al.*, 2013).

3.5. Hidrocoloides

Durante las últimas décadas han ido surgiendo en el mercado una gran cantidad de nuevos productos alimenticios de características muy diversas que son en general fruto de la aparición de nuevas tecnologías en la industria alimentaria. Los consumidores cada día se preocupan más por estas innovaciones tecnológicas y piden que los alimentos sean lo más naturales, seguros y lo menos procesados posible.

Los hidrocoloides son biopolímeros con un alto peso molecular (polisacáridos y proteínas) y de cadenas largas que se caracterizan por su propiedad de formar dispersiones viscosas y/o geles cuando se mezclan con agua. Estos materiales tienen diferente origen, se pueden obtener a partir de exudados de árboles o arbustos, extractos de plantas o algas, harinas de semillas, a través de procesos fermentativos y de muchos otros productos naturales. La presencia de un gran número de grupos hidroxilo en su estructura aumenta notablemente su afinidad por las moléculas de agua, haciéndolos compuestos hidrofílicos (Angioloni, 2013).

A su vez producen dispersiones con características intermedias entre una solución y una suspensión, de esta forma, exhiben las propiedades de un coloide. Tienen una amplia gama de propiedades funcionales, incluyendo la de espesante, gelificante, emulsionante, estabilizante; la razón principal de la amplia utilización de los hidrocoloides en la industria alimentaria es su capacidad de modificar la reología de los sistemas alimentarios.

Esto incluye dos propiedades básicas de los alimentos, es decir, el comportamiento de flujo (viscosidad) y sus características sólidas (textura). La modificación de estos sistemas ayuda a modificar sus propiedades sensoriales, por lo tanto, los hidrocoloides se utilizan como aditivos alimentarios para la mejora en general de los alimentos (Angioloni, 2013).

3.5.1. Clasificación de los hidrocoloides

En la tabla 7 se muestran los hidrocoloides más comunes de acuerdo a su origen:

Tabla 7: Clasificación de los hidrocoloides

Clasificación	Origen	Ejemplo
Botánico	Árboles	Celulosa
	Gomas exudadas de plantas	Goma arábiga, goma karaya, goma tragacanto
	Plantas	Almidón, pectinas, celulosa
	Semillas	Mucílagos, goma locuste
	Tubérculos	Goma konjac
Algas	Algas rojas	Agar, carragenina
	Algas marrones	Alginato
Microbiano	Microorganismos	Dextrano, goma xántica
Animal	Huesos y exoesqueletos	Gelatina, colágeno, proteína de suero

*Fuente: Capitani *et al.*, 2013.

Hidrocoloides botánicos:

Corresponden al grupo de gomas más antiguos; casi todas las familias de plantas presentan alguna especie que exuda gomas, pero sólo algunas lo hacen de modo abundante como para permitir su recolección. Entre el 10 % y 15 % de las gomas comercialmente disponibles corresponden a este grupo. En general, son arbustos o pequeños árboles, siendo las mismas recogidas manualmente y clasificadas en diferentes grados de pureza. Debido a los escasos tratamientos que requieren previo a su comercialización, es uno de los grupos de menor costo en la actualidad y esto les confiere una ventaja competitiva en el mercado.

Por otra parte, la celulosa es un polisacárido estructural en las plantas, ya que forma parte de los tejidos vegetales. La pared de una célula vegetal joven contiene aproximadamente un 40 % de celulosa; la madera un 50 %, mientras que el ejemplo más puro de celulosa es el algodón, con un porcentaje mayor al 90 %. Tanto el almidón como la celulosa suelen ser buenas materias primas para el desarrollo de distintas gomas. Mediante tratamientos térmicos, de oxidación o derivatizaciones es posible el desarrollo de hidrocoloides adecuados para cada tipo de aplicación. A pesar de ello, el costo de las materias primas resulta relativamente bajo pero los procesos de modificación pueden llegar a ser demasiados complejos (Capitani *et al.*, 2013).

Hidrocoloides provenientes de algas:

Este tipo de hidrocoloides comprenden tres grupos principales: alginatos (derivados del ácido algínico), agar y carragenanos. Los primeros se extraen sólo a partir de algas marrones, mientras que los otros dos se encuentran únicamente en algas rojas. El proceso de extracción es relativamente simple permitiendo la remoción de una gran cantidad del peso seco de las algas y la obtención de un producto relativamente puro (Capitani *et al.*, 2013).

Hidrocoloides de origen microbiano:

Existe una amplia variedad de microorganismos capaces de producir polisacáridos estructurales a partir de su crecimiento en fuentes de energía tales como granos o melaza, entre ellas destacan algunas especies de xantomonas y pseudomonas, que presentan propiedades poco comunes en lo que respecta a textura. Las técnicas de desarrollo de gomas industriales proveen una gran variedad de hidrocoloides con propiedades muy diversas y se encuentra en constante crecimiento a fin de satisfacer los requerimientos necesarios actuales (Pasquel, 2001).

Hidrocoloides de origen animal:

Este tipo de hidrocoloides corresponde al grupo más abundante y diverso en la naturaleza. En mamíferos o peces es posible obtener macropolímeros los que mediante algunos procesos fisicoquímicos conducen a proteínas o carbohidratos de gran utilidad en la industria alimentaria. Los más importantes dentro de esta clasificación son el colágeno, útil para obtener la gelatina y la quitina, extraída de los huesos de los animales (Capitani *et al.*, 2013).

3.5.2. Propiedades funcionales

Viscosidad:

Los hidrocoloides imparten viscosidad a los alimentos gracias al entrelazamiento no específico entre las cadenas de los polímeros. La viscosidad final obtenida depende del tipo de hidrocoloide utilizado, de su concentración, y del sistema alimentario en el que se utiliza; además el pH y la temperatura son parámetros importantes que hay que conocer y controlar. La viscosidad de una solución depende significativamente de la masa molecular del polímero en cuestión. Además de los efectos de las masas moleculares y el tamaño hidrodinámico de las moléculas de un polímero en solución está influenciado significativamente por la estructura de la molécula misma. Moléculas lineales rígidas tienen un mayor tamaño hidrodinámico que polímeros flexibles altamente ramificados de la misma masa molecular y, por lo tanto, dan lugar a una viscosidad mucho más alta (Angioloni, 2013).

Propiedades gelificantes:

Las partículas hinchadas de los hidrocoloides gelificados son particularmente útiles ya que combinan la formación de una estructura macroscópica con la capacidad de flujo y a menudo, tienen una suave y atractiva textura sólida, que es especialmente apreciada en aplicaciones alimentarias con altos contenidos de agua (>95 %). Las características de las partículas de gel, y las aplicaciones para las que se utiliza, dependerán del tipo de hidrocoloide, del mecanismo de formación de la red y del método de procesamiento utilizado para la formación de dichas partículas. Los hidrocoloides forman geles a través de entrelazamiento y reticulación de las cadenas de los polímeros. El mecanismo por el cual se produce esta reticulación entre cadenas puede variar.

La gelificación puede implicar una estructura de tipo jerárquico, la más común de las cuales es la agregación de enlaces entre cadenas principales en “zonas de unión”, que forman la base para la formación de la característica red tridimensional de un gel. Varios parámetros tales como la temperatura, la presencia de iones, y la estructura innata de los hidrocoloides puede afectar a la disposición física de las zonas de unión dentro de la red (Angioloni, 2013).

Propiedades emulsionantes y de superficie

La funcionalidad de los hidrocoloides como emulsionantes y/o estabilizantes se correlaciona con fenómenos tales como el retraso de la precipitación de las partículas sólidas dispersas, prevención de la agregación de las partículas dispersas, prevención de sinéresis en los sistemas gelificados que contienen aceites y retraso de la coalescencia de las gotitas de aceite (Angioloni, 2013).

Los hidrocoloides como películas y recubrimientos comestibles

Una película comestible se define como una capa delgada, que puede ser consumida, que recubre un alimento y que se coloca como barrera entre el alimento y el entorno circundante. Tales películas sirven para prevenir la pérdida de humedad, de gas, aroma y la migración de lípidos. Alginatos, carragenatos, celulosa y sus derivados, pectinas, almidones y sus derivados, entre otros, han sido utilizados para este tipo de recubrimiento (Angioloni, 2013).

Hidrocoloides como sustitutos de la grasa

Los cambios en el estilo de vida moderno, la creciente conciencia de la relación entre la dieta, la salud y las nuevas tecnologías de procesamiento han conducido a un rápido aumento del consumo de comidas preparadas de alimentos novedosos y bajos en grasa.

Las grasas y aceites pueden ser sustituidos con agua estructurada para dar alimentos más saludables, bajos en calorías y con una excelente calidad. En particular, numerosos hidrocoloides han sido empleados específicamente para su uso como sustitutos de la grasa en los alimentos. Un ejemplo de ello, la mayonesa “ligera”, la cual contiene goma guar y goma xantana como sustitutos de grasa para mejorar su viscosidad (Angioloni, 2013).

3.5.3. Sectores de aplicación

Industria cárnica

Los principales hidrocoloides utilizados en este sector son los carragenatos, fundamentalmente *kappa e iota*, tanto refinados como semirefinados. Se emplean en productos frescos y cocidos, tanto para carnes inyectadas como emulsionadas. Además de los carragenatos, la industria cárnica emplea goma xantana, goma guar, goma de garrofín y alginatos. El uso de pequeñas cantidades de estas gomas permite, principalmente, evitar problemas durante el proceso de fabricación tales como la formación de sedimento en las salmueras, o para impartir viscosidad con el fin de facilitar el procesado (Angioloni, 2013).

Industria láctea, postres y helados

En el caso de los postres lácteos los carragenatos son muy utilizados ya que interaccionan muy favorablemente con las proteínas de la leche, incrementando la cremosidad, mejorando la textura y la sensación en boca. Con un pH ácido su funcionalidad es limitada. La industria de los helados utiliza goma de garrofín, goma tara, carragenatos y xantana. La adición de estas gomas confieren elasticidad, retardan el crecimiento de cristales y mejora la sensación en la boca tras varios ciclos de congelación - descongelación.

Los carragenatos, aumentan el “*overrun*”. Para la preparación de yogures, flanes y natillas industriales se utilizan principalmente carragenatos, agar, goma de garrofín, goma xantana y almidones modificados (Angioloni, 2013).

Condimentos y salsas

En salsas y aderezos los hidrocoloides (carragenato iota, goma guar, goma xantana y almidones modificados) actúan como agentes de suspensión de sólidos insolubles, proporcionan cuerpo, textura, y evitan la separación de fases (Angioloni, 2013).

Aceitunas rellenas

Los principales agentes texturizantes empleados en el relleno de aceitunas son los alginatos (de baja y alta fuerza de gel) y la goma guar. Existen dos tipos de rellenos: a) los rellenos de cinta (típico relleno de pimienta), para los que se requiere alginato de alta fuerza de gel y goma guar; b) los rellenos de masa inyectada (relleno de anchoas), para los cuales se requiere alginato de baja fuerza de gel para aportar viscosidad a la masa (Angioloni, 2013).

Bebidas y zumos

En las bebidas, los hidrocoloides se utilizan con la finalidad de mantener los sólidos del producto en suspensión pero manteniendo una viscosidad baja; por lo que se aplican generalmente en jugos, néctares, bebidas con pulpa y batidos de cacao. En el caso específico de los batidos de chocolate, se utilizan principalmente goma xantana, carragenatos y alginatos para mantener en suspensión las partículas del cacao. En bebidas instantáneas se utiliza como agente espesante goma guar porque es soluble en agua fría (Angioloni, 2013).

Panadería y bollería

En la panificación los hidrocoloides favorecen la maquinabilidad de la masa, retienen humedad y mejoran la apariencia. En productos sin gluten, son ingredientes fundamentales para obtener una estructura similar a la que proporciona este material; se utilizan frecuentemente goma xantana, goma guar y almidones modificados.

Para la preparación de cremas pasteleras son ampliamente utilizados los alginatos, agar, carragenatos y la goma xantana.

A pesar de los temores de los consumidores en torno al uso de los aditivos alimentarios y a pesar de los intentos por parte del productor para reducirlos en el procesado de los alimentos, el uso de los agentes de textura (espesantes, gelificantes, emulsionantes) presenta claras ventajas en la producción de los alimentos. Los aditivos mejoran la seguridad, la calidad de los alimentos desde el punto de vista sensorial y algunos, posiblemente, desde el punto de vista nutricional. Dentro de la categoría de la seguridad alimentaria, este grupo de aditivos ha sido de los menos cuestionados y son pocos a los que se les ha asociados algún riesgo para la salud (Angioloni, 2013).

3.6. Mucílagos

Los mucílagos son biopolímeros vegetales los cuales presentan una apariencia translúcida amorfa. Son polímeros de un monosacárido o mezcla de monosacáridos, muchos de ellos combinados con ácidos urónicos. Su estructura química general corresponde a la de polisacáridos heterogéneos con un alto contenido de galactosa, manosa, glucosa y derivados de osas (principalmente ácidos). La estructura está determinada por los enlaces glucosídicos, así como por los monosacáridos que las constituyen (Capitani *et al.*, 2013).

Dichos polisacáridos constituyen uno de los hidrocoloides más importantes utilizados en la industria alimentaria debido a sus propiedades (estructuración, texturización, emulsionante y espesante), además de ser moduladores de saciedad, índice glucémico, microbiota intestinal y biodisponibilidad de macronutrientes y micronutrientes, supresores de la densidad calorífica de los alimentos (Soukoulis *et al.*, 2018).

Son constituyentes normales del vegetal, producto de su metabolismo y que se acumulan en células especiales dentro de los tejidos y en distintos órganos (raíces, bulbos, tubérculos, flores o semillas). Se localizan como una fuente de alimento, reserva de agua en plantas y como elementos estructurales en vegetales inferiores (algas), proporcionándoles elasticidad y suavidad. Para su extracción hay que recurrir en muchas ocasiones a la molturación y al uso de disolventes; estudios indican que un kilogramo de semillas puede contener entre 50g a 60g de mucílago (Capitani *et al.*, 2013).

Guiotto *et al.* (2013) menciona la siguiente composición para el mucílago:

- Humedad: 9.37 %
- Proteína: 29.00 %
- Fibra bruta: 11.42 %
- Aceite: 3.83 %
- Cenizas: 10.27 %
- Extracto libre de nitrógeno: 56.24 %

Datos bibliográficos provenientes de las semillas de lino, mostaza amarilla, albahaca y la chía han revelado la existencia de dos fracciones de polisacáridos:

- **Fracción del polisacárido péctico:** constituido por un Ramnogalacturonano I (RGI; sistema de clasificación biológica)
- **Fracción de hemicelulosa:** constituido por arabinoxilanos

A continuación, en la figura 2 se muestra la estructura química de dichas fracciones de polisacáridos del mucílago, tomando como referencia la semilla de chía:

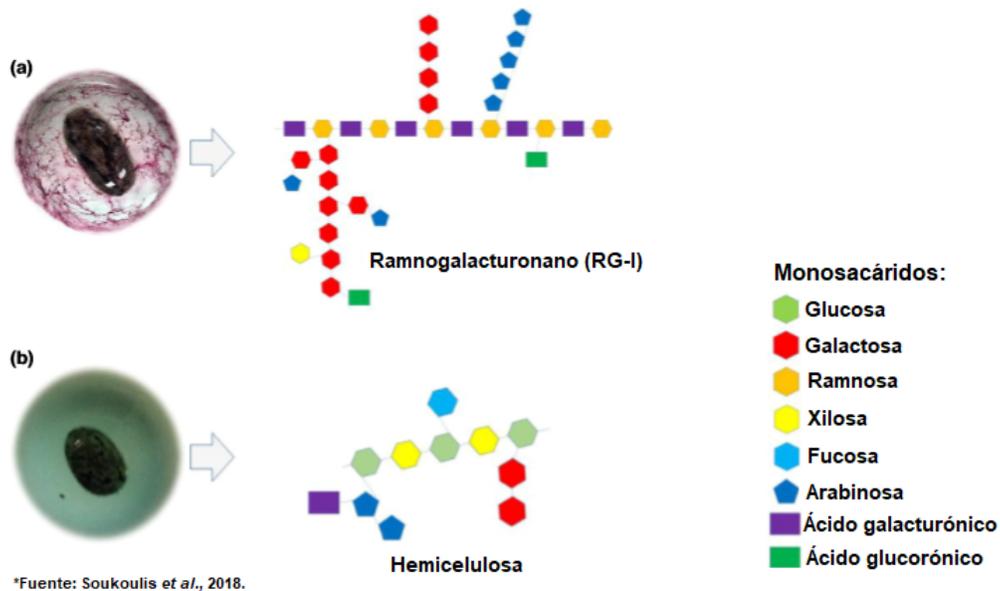


Figura 2: (a) Fracción del polisacárido péctico (mucílago teñido con rojo de rutenio) y (b) Fracción de hemicelulosa (mucílago teñido con azul de metileno).

3.6.1. Propiedades funcionales

Superficiales e interfaciales

La actividad superficial e interfacial es generalmente asociada a la presencia de proteínas y grupos hidrófobos (metilo o etilo). Parámetros como el peso molecular y la carga superficial de las moléculas influyen en esta característica. En general la concentración y el bajo contenido de ácido urónico promueven la adsorción en las interfaces lípido-agua o aire-agua. De igual forma, la presencia de impurezas proteicas favorece su adsorción en las interfaces lípido-agua. En una serie de estudios, se ha demostrado que la eliminación de estos resulta en un aumento significativo de la tensión superficial y por lo tanto, menor capacidad de emulsificación (Soukoulis *et al.*, 2018).

Capacidad de retención de agua y aceite

Los mucílagos son conocidos por ejercer una excelente retención de agua y aceite, esta propiedad es comparable con las gomas comerciales, es decir, la gelatina, goma guar y almidón. Dichas características se deben a la presencia de grupos laterales funcionales hidrófilos o hidrófobos, así como la concentración, contenido de ácido urónico, pH y la presencia de polisacáridos estructurantes como proteínas microgeleadas (Soukoulis *et al.*, 2018).

Sorción de humedad y estado físico

Al igual que en otros polisacáridos, la absorción de vapor de agua está directamente asociado con el número de sitios activos que mantienen una unión fisicoquímica con el agua. Estudios sobre la semilla de chía demostró un comportamiento de sorción de agua tipo II con un porcentaje en la monocapa que va desde el 6% al 11% (w/w), generalmente más alto que el de varias gomas comerciales (pectinas, carrageninas) así como una estructura microporosa que predomina a bajos niveles de humedad. Parámetros como el peso molecular, la estructura y rigidez de la cadena polimérica rigen la transición de fase en presencia de agentes plastificantes (Soukoulis *et al.*, 2018).

3.6.2. Aplicaciones del mucílago de la semilla de chía

Durante la alimentación de las semillas de chía, al contacto con la saliva se forma el mucílago y cuando es ingerido tiene efectos favorables en nutrición y la salud debido a que genera un efecto calmante en el tracto digestivo. Crea una barrera para las enzimas desacelerando la descomposición de los carbohidratos complejos en azúcares, existiendo una prolongación en la sensación de saciedad por el aumento del volumen de los hidratos de carbono y la viscosidad en el intestino, lo que conlleva a una digestión más eficiente (Xingú *et al.*, 2017).

En los estados de Jalisco y Puebla se prepara una bebida refrescante llamada “chía fresca”, también se prepara un mucílago dejando reposar la semilla en agua para utilizarlo de forma casera en mermeladas, jaleas, yogur, mostaza y salsa tártara.

El aceite extraído, es usado por artesanos de los estados de Chiapas, Estado de México, Guerrero y Michoacán para preparar lacas conocidas como *maque* con la finalidad de pintar jícaras y guajes. Este arte floreció en la época prehispánica desde antes de la llegada de los españoles, el procedimiento de extracción comienza tostando lentamente y a fuego bajo las semillas para posteriormente molerse con agua caliente, finalmente se amasa hasta que el aceite empieza a escurrir y se hierva para conservarlo (Xingú *et al.*, 2017).

En la actualidad, para las producciones industriales el mucílago de la chía juega un papel fundamental en los productos de innovación, a continuación en las tablas 8, 9, 10, 11 y 12 se describen los más relevantes:

- **Industria panificadora y de cereales**

Tabla 8: Industria panificadora y de cereales

Producto	Características del mucílago	Función	Impacto en la calidad del producto
Pan	Liofilizado	Sustituto de grasas	Reducción de peso de pan horneado Reducción de la viscoelasticidad
Pasteles	Liofilizado	Sustituto de grasas	Incremento del volumen específico Incremento de la firmeza en la miga
Bizcochos	Liofilizado	Sustituto de grasas	Disminución de la luminosidad de la miga
Pan pita	Condiciones normales	Fortificador de fibra	Disminución de la cristalinidad Mayor porcentaje de almidón gelatinizado
Pasta libre de gluten	Liofilizado	Agente estructurante	Aumento del índice glucémico

*Fuente: Soukoulis *et al.*, 2018.

En la industria panificadora y de cereales aumenta el valor nutritivo de los productos debido a la proporción de ácidos grasos y fibra dietética, su adición crea un efecto que no altera la calidad del pan y cambia sólo el color de la miga. De igual forma, existe un cambio en la cinética de la amilopectina durante el almacenamiento, lo que se relaciona directamente con el aumento de vida en el anaquel. Con la adición, el contenido de ácido α -linolénico aumenta, contribuyendo a una reducción en el volumen específico y ligereza del pan (Xingú *et al.*, 2017).

■ Industria láctea

Tabla 9: Industria láctea

Producto	Características del mucílago	Función	Impacto en la calidad del producto
Helado	Liofilizado	Estabilizador Agente espumante	Resistencia a la fusión Impacto en el sabor y textura

*Fuente: Soukoulis *et al.*, 2018.

El uso principal del mucílago de la chía consiste en la estabilización de las interfaces lípido-agua y aire-agua en las emulsiones lácteas, mejorando la firmeza y resistencia del gel proteico frente a la contracción y estrés mecánico por la expulsión del suero. La texturización y la actividad interfacial un impacto positivo sobre las tasas de recristalización del hielo y en la retención de la forma en los productos finales apoyando significativamente los estímulos sensoriales asociados con la grasa (Soukoulis *et al.*, 2018).

■ Emulsiones alimenticias

Tabla 10: Emulsiones alimenticias

Producto	Características del mucílago	Función	Impacto en la calidad del producto
Emulsiones alimenticias (Agua-Aceite)	Por extracción	Estabilizador Agente espumante	Estabilidad en la floculación de lípidos Mejora en la coalescencia Mejora en la separación gravitacional

*Fuente: Soukoulis *et al.*, 2018.

Se ha demostrado que el mucílago de la semilla de chía puede conferir a una emulsión una acción estabilizadora en función de su cantidad dispersa en la fase de agua. Dicha capacidad, está asociada con la formación de estructuras viscoelásticas heterogéneas en las proximidades de la interfaz aceite-agua, atribuyéndose a la composición de proteínas y polisacáridos, con ello, existe una mejora electrostática de repulsión entre las gotitas de lípidos y por lo tanto, obstaculizan el agotamiento del fenómeno de floculación (Soukoulis *et al.*, 2018).

- **Envasado de alimentos**

Tabla 11: Envasado de alimentos

Producto	Características del mucílago	Función	Impacto en la calidad del producto
Película comestible a base de proteína de suero	Liofilizado o en mezcla (proteína)	Agente estructurador Formador de film	Mejora las propiedades en la película Mejora la solubilidad en agua
Película comestible a base de mucílago de chía	Liofilizado	Formador de film	Mejora la termoresistencia y transparencia Mejora la tensión y flexibilidad mecánica

*Fuente: Soukoulis *et al.*, 2018.

Más allá de una funcionalidad, el uso como fabricación en esta variante provee una solución ecológica, biodegradable y sostenible. El mucílago de la chía utilizado como película comestible ha demostrado una excelente resistencia mecánica y térmica hacia el vapor de agua y la luz ultravioleta. De igual forma, presenta una capacidad antioxidante y combinado con aceites inhibe la aparición de microorganismos en carnes frías; las condiciones alcalinas demuestran un gran potencial para reforzar estas propiedades (Soukoulis *et al.*, 2018).

- **Alimentos en polvo**

Tabla 12: Alimentos en polvo

Producto	Características del mucílago	Función	Impacto en la calidad del producto
Maltodextrinas / Proteína de chía-linaza	Dializado y liofilizado	Agente encapsulador Termoprotector	Control de temperatura Concentración homogénea
Mucílago - Aceite (nanopartículas de chía)	Condiciones normales	Agente encapsulador	Reducción en la oxidación de lípidos Estabiliza el encapsulado

*Fuente: Soukoulis *et al.*, 2018.

Las partículas secas constituyen un proceso muy importante. La tecnología se asocia principalmente con su capacidad para controlar los estados termodinámicos o de transición y para modular el patrón de desintegración en las partículas. La incorporación del mucílago de la semilla de chía en la maltodextrina y las proteínas en polvo ayuda en la conservación de la actividad biológica de las células a lo largo del proceso de deshidratación. Por otra parte, proporciona una gran capacidad de microencapsulación, presentándose como una barrera física tangible contra la inestabilidad ante los lípidos y la degradación oxidativa de los ácidos grasos. Su estabilidad electrostática y térmica es ideal para la protección de compuestos nutraceuticos sensibles al calor y la luz (Soukoulis *et al.*, 2018).

3.6.3. Beneficio social

Las semillas de chía son consideradas como un alimento funcional. Su contribución a la nutrición humana es de suma relevancia; aumenta el índice de saciedad, ayuda a contrarrestar problemas de estreñimiento, previene enfermedades cardiovasculares, trastornos inflamatorios y nerviosos, así como la diabetes y cáncer de colon. En general, es parte de un crecimiento evolutivo con una alza en una tendencia social que cada vez busca más opciones saludables y naturales (Xingú *et al.*, 2017).

La implementación de una dieta durante 12 semanas con 35g de harina de chía por día en la alimentación de un ser humano contribuye significativamente en la reducción de peso y en la circunferencia de la cintura, gracias a su contenido de fibra dietética, disminuyendo la entrada calórica por la alta viscosidad del gel formado en el tracto gastrointestinal, así mismo por el alto contenido de omega 3 que suprime el apetito, mejorando la oxidación de lípidos y el gasto de energía (Xingú *et al.*, 2017)

En otra investigación donde se estudio el mucílago de la chía, se propuso utilizar dicho ingrediente como sustituto de grasas en la elaboración de pestes, lo anterior, dado al aumento del índice que obesidad en los últimos años. Para ello se recomendó disminuir las grasas que se utilizan en la elaboración de cualquier tipo de pan. Específicamente, se decidió tomar como referencia la receta del pastel de mantequilla (comúnmente se utiliza $\frac{17g \text{ de grasa}}{100g \text{ de producto}}$). Las diversas investigaciones arrojaron el efecto del remplazo de 25g, 50g, 75g y 100g de mucílago de chía por cada 100g de aceite vegetal.

Finalmente, los resultados mostraron que el remplazo de aceite vegetal por el mucílago de chía no afectó de manera significativa el volumen específico, simetría, uniformidad, humedad y actividad del agua en el pastel de mantequilla, únicamente el color aparente así como la firmeza del pastel fueron influenciados por un aumento en el cambiado realizado. Concluyeron, que un remplazo de 25g de mucílago de chía por cada 100g de aceite vegetal era la mejor proporción para no alterar las características de calidad que buscaban en la producción inicial (Ferrari *et al.*, 2017).

3.7. Isotermas de sorción

3.7.1. Adsorción

La adsorción puede definirse como la tendencia de un componente del sistema a concentrarse en la interfase (figura 3), donde la composición interfacial es diferente a las composiciones correspondientes al seno de las fases (Viades, 2013).

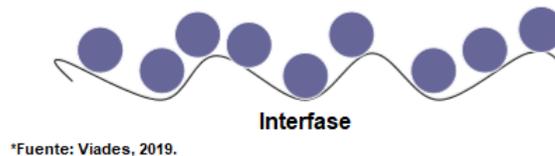


Figura 3: Fenómeno de adsorción

Existe una diferencia entre el fenómeno de adsorción y el de absorción, en el segundo caso existe una penetración física de una fase en la otra (figura 4); sin embargo es factible que ambos sucedan simultáneamente, y en este caso puede ser muy difícil separar los efectos de ambos fenómenos, inclusive uno puede afectar al otro (Viades, 2013).

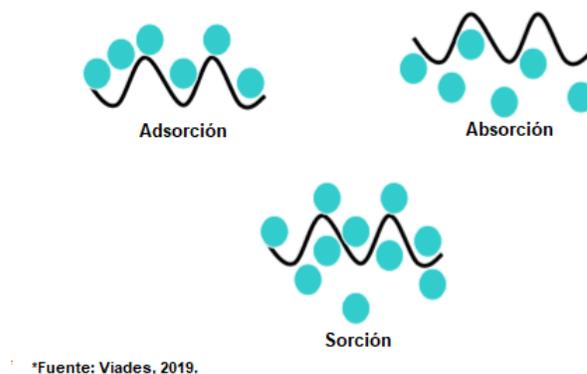


Figura 4: Fenómenos de superficie

El proceso de adsorción de los átomos y las moléculas es una de las principales formas en que las interfases de alta energía pueden modificarse para disminuir la energía total del sistema, esto es de particular relevancia en la ciencia de los coloides y superficies. Lo anterior puede ocurrir en cualquier tipo de interfase (L-G, S-G, L-S), sin embargo, para las diferentes características de las interfases sólidas y líquidas es necesario un análisis particular de cada caso (Viades, 2013).

En los procesos de adsorción hay dos aspectos que deben ser considerados:

- 1) El efecto sobre la energía interfacial del sistema en el equilibrio (termodinámica)
- 2) La rapidez del proceso de adsorción (cinética)

3.7.2. Actividad acuosa (a_w)

El conocimiento de las propiedades termodinámicas sobre el comportamiento de la adsorción, absorción y sorción es crucial para el análisis de los fenómenos de transporte de masa y calor, proporcionando cierto entendimiento en la microestructura asociada a los alimentos. El concepto más utilizado para relacionar el contenido de agua y las propiedades de un alimento es la actividad acuosa (a_w). Se ha demostrado que es un factor clave para el crecimiento microbiano, producción de toxinas y resistencia al calor, también juega un papel importante en la estabilidad química y en la calidad de los alimentos (Ramírez *et al.*, 2014).

Desde un punto de vista termodinámico, ha servido como un parámetro que indica el control del agua dentro de los alimentos, ya que se ha demostrado que existe un intervalo aleatorio óptimo de humedad correspondiente a un amplio intervalo de actividad acuosa, donde los productos muestran una estabilidad máxima a los procesos deteriorativos como lo son la oxidación y las reacciones enzimáticas (Alpizar *et al.*, 2013).

Este término indica la “calidad” del agua contenida en los alimentos. Describe el grado de límite de agua y por lo tanto, esta disponible para participar en las reacciones físicas, químicas y microbiológicas.

De esta forma el agua “contenida” dentro de un alimento causa una reducción en la difusión de solutos solubles en el sorbente y muestra una disminución en el coeficiente de difusión con un contenido de humedad decreciente. Algunas de las características que presenta es presión de vapor baja, energía de enlace alta medida durante la deshidratación y una movilidad reducida (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).

Al-Muhtaseb *et al.* (2002) afirma que las propiedades del agua en relación a un sistema biológico pueden ser clasificadas en tres categorías:

- Aspectos estructurales: la posición y orientación de las moléculas de agua en relación a otras macromoléculas
- Aspectos dinámicos: movimientos moleculares del agua y su contribución a las propiedades hidrodinámicas del sistema
- Aspectos termodinámicos: en equilibrio con su entorno, a cierta humedad relativa y temperatura

El concepto matemático de actividad del agua (ecuación 1), que es utilizado más comúnmente por investigadores en la industria alimentaria, se define como:

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{\text{Humedad relativa}}{100} \quad (1)$$

Donde p es la presión parcial del agua en el alimento (*atm*) y p_0 la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura (*atm*) (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).

Cuando los alimentos se mantienen a diferentes contenidos de humedad adsorben o desorben humedad dependiendo de la actividad acuosa. Si la a_w es menor a la humedad del ambiente, el producto adsorberá y en el caso opuesto la desorberá. El máximo valor de a_w es 1.0. Cuando a un alimento se le retira parte del agua este valor disminuye, si esta disminución es en un porcentaje elevado, el alimento adquiere un valor relativamente bajo (<0.5) y se le podrá denominar alimento de humedad intermedia (Alpizar *et al.*, 2013).

Otro concepto es el empleado por Ramírez *et al.* (2014) el cual, define a la actividad acuosa (a_w) como la fracción de contenido de agua de un producto que está libre y disponible para el crecimiento de microorganismos para llevar a cabo diversas reacciones químicas que afectan su estabilidad.

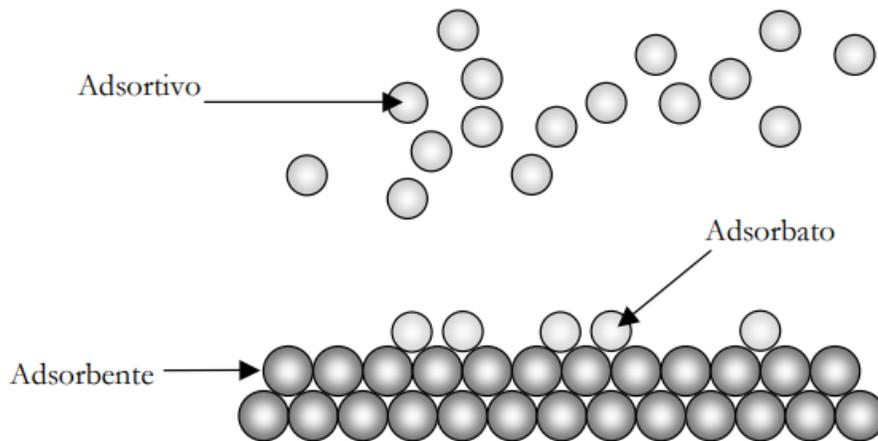
El conocimiento de la relación entre la actividad acuosa y el contenido de humedad de equilibrio de los materiales alimenticios es importante para predecir los cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas que ocurren durante el almacenamiento y transformación.

3.7.3. Las isothermas de adsorción

La relación entre la actividad acuosa (a_w) y el contenido de humedad de equilibrio a una temperatura constante es llamada isoterma de sorción de humedad, la cual, hace referencia a procesos de adsorción (hidratación) o desorción (deshidratación). En el primer caso, la información obtenida es valiosa en el caso de estudios de almacenamiento de productos secos y para el caso de la desorción, se utiliza en trabajos de investigación para procesos de secado. Su aplicación hace énfasis en el análisis y diseño de otros procesos como el mezclado y el envasado de alimentos, además sirve para determinar condiciones óptimas de almacenamiento, predicción de vida útil y selección del material de empaque adecuado (Ramírez *et al.*, 2014).

Cuando un sólido poroso, como por ejemplo un carbón es expuesto en un recipiente cerrado a un gas dada una presión, el sólido comienza a adsorber al gas. El proceso es acompañado de un aumento en el peso del sólido (puede ser medido colocando la muestra en una balanza) y una disminución de la presión. Esto continúa hasta que luego de un tiempo la presión se estabiliza en un valor p y el peso del sólido alcanza su valor máximo.

En esta clase de experimentos el material realmente adsorbido por el sólido (adsorbente) es llamado el adsorbato, para distinguirlo del adsortivo término que se le da al material en la fase gas que es potencialmente capaz de ser adsorbido (López, 2004).



*Fuente: López, 2004.

Figura 5: Diferencia entre el adsorbente, el adsorbato y el adsortivo

La adsorción se produce por las fuerzas de interacción entre el sólido y las moléculas del gas. Básicamente estas fuerzas son de dos clases: físicas y químicas, las que dan lugar a la fisisorción y a la quimisorción, respectivamente.

En la adsorción física las interacciones predominantes son de tipo Van der Waals, mientras que en la adsorción química las interacciones semejan enlaces químicos.

La cantidad de gas adsorbido por la muestra es proporcional a la masa (m) de la muestra, y depende de la temperatura (T), la presión (p) del vapor y de la naturaleza del sólido y del gas. Con lo que si n es la cantidad de gas adsorbido, expresado en moles por gramo de sólido tenemos que:

$$n = f(p, T, gas, sólido) \quad (2)$$

Dado un gas adsorbido sobre un determinado sólido mantenido a una temperatura constante:

$$n = f(p)_{T, gas, sólido} \quad (3)$$

Si la temperatura es mantenida por debajo de la temperatura crítica de condensación del vapor podemos escribir la ecuación 3 como:

$$n = f(p/p_0)_{T, gas, sólido} \quad (4)$$

Para la ecuación 4, p_0 es la presión de saturación del vapor del gas. Las ecuaciones 3 y 4 son las expresiones matemáticas generales que definen la isoterma de adsorción, es decir, la relación a temperatura constante entre la cantidad de gas adsorbido y la presión o la presión relativa ($\frac{p}{p_0}$) (López, 2004).

El valor de la monocapa (M_0), representa el contenido de humedad de mayor estabilidad y en donde se minimizan las reacciones bioquímicas. De igual forma, en la región de la isoterma indica donde los alimentos tienen el valor máximo vida de anaquel. Se han desarrollado modelos matemáticos con dos o más parámetros y más de 270 ecuaciones para describir las isotermas de adsorción de alimentos (Ramírez *et al.*, 2014).

Algunos de estos modelos se clasifican en:

Teóricos:

■ Modelo de B.E.T.:

El modelo más utilizado para estimar el valor de la humedad en la monocapa adsorbida en la superficie de un alimento, es la ecuación 5 (Moraes *et al.*, 2008), desarrollada a partir de la isoterma de Langmuir, por Stephen Brunauer, Paul Emmet y Edward Teller (B.E.T.) en 1938:

$$M = \frac{M_0 * C_B * a_w}{(1 - a_w) * (1 - a_w + C_B * a_w)} \quad (5)$$

donde:

M : contenido de humedad en el equilibrio $\left(\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.} \right)$

M_0 : contenido de humedad en la monocapa (contenido de agua correspondiente a la saturación de todos los sitios primarios por una molécula de agua, $\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.}$)

C_B : parámetro de energía

a_w : actividad acuosa

Sin embargo, el modelo se ajusta a las isotermas dentro de un intervalo limitado de valores, no obstante, el concepto del valor de monocapa de B.E.T. se acepta como punto de referencia para el contenido de humedad de mayor estabilidad para los alimentos secos. El intervalo de a_w al que aplica este modelo es de 0 a 0.55 (Ramírez *et al.*, 2014).

■ Modelo de G.A.B.:

Las limitaciones del modelo de B.E.T. a altos niveles de la actividad acuosa produjeron el desarrollo de otros, como el que se presenta en la ecuación 6 (Moraes *et al.*, 2008), Guggenheim, Anderson y De Boer (G.A.B.) para la región de multicapas:

$$M = \frac{M_0 * C_G * K * a_w}{(1 - K * a_w) * (1 - K * a_w + C_G * K * a_w)} \quad (6)$$

donde:

M : contenido de humedad en el equilibrio $\left(\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.} \right)$

M_0 : contenido de humedad en la monocapa (contenido de agua correspondiente a la saturación de todos los sitios primarios por una molécula de agua, $\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.}$)

C_G : constante de Guggenheim

K : parámetro de corrección para las propiedades de las moléculas en la multicapa con respecto al líquido

a_w : actividad acuosa

El modelo de G.A.B. tiene un número razonablemente reducido de tres parámetros M_0 , C_G , K y representa adecuadamente los datos experimentales en un intervalo de a_w de 0 a 0.95 para la mayoría de los alimentos de interés práctico.

Ambos modelos están basadas en los mismos principios de la monocapa, sin embargo el modelo de G.A.B. introduce un grado de libertad adicional (C_G) que le otorga gran versatilidad, ya que el modelo de B.E.T. asume que la adsorción física se localiza en las multicapas sin interacciones laterales (Ramírez *et al.*, 2014).

Semiempíricos:

■ Modelo de Lewicki (dos parámetros):

Martinelli *et al.* (2007) presenta la ecuación 7:

$$M = A \left(\frac{1}{a_w} - 1 \right)^{B-1} \quad (7)$$

donde:

M : contenido de humedad en el equilibrio $\left(\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.} \right)$

A y B : parámetros matemáticos

a_w : actividad acuosa

■ Modelo de Halsey:

Pahlevanzadeh *et al.* (2004) presenta la ecuación 8:

$$M = \left(-\frac{A}{T * Ln a_w} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (8)$$

donde:

M : contenido de humedad en el equilibrio $\left(\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.} \right)$

A y B : parámetros matemáticos

T : temperatura (K)

a_w : actividad acuosa

La ecuación de Halsey se puede usar para describir 220 isotermas de adsorción experimental de 69 alimentos diferentes en un rango de a_w para 0.1 - 0.8 (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).

Empíricos:

■ **Modelo de Oswin:**

Al-Muhtaseb *et al.* (2002) presenta la ecuación 9:

$$M = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B \quad (9)$$

donde:

M : contenido de humedad en el equilibrio $\left(\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.} \right)$

A y B : parámetros matemáticos

a_w : actividad acuosa

Dicha ecuación es la mejor para describir las isotermas para alimentos ricos en almidón y es razonablemente buena para la carne y las verduras. Esta ecuación también fue utilizada para relacionar los contenidos de humedad de la leche en polvo sin grasa (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).

■ **Modelo de Henderson:**

Martinelli *et al.* (2007) presenta la ecuación 10:

$$M = \left(\frac{-Ln(1 - a_w)}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (10)$$

donde:

M : contenido de humedad en el equilibrio $\left(\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.} \right)$

A y B : parámetros matemáticos

a_w : actividad acuosa

Como ya se ha mencionado, las isotermas describen la relación entre la actividad acuosa y el equilibrio del contenido de humedad de un producto. Su conocimiento y un buen control sobre estos parámetros son de vital importancia para diversos procesos alimentarios, como el secado, el almacenamiento y el envasado, ya que se utiliza para calcular el tiempo, para predecir

el comportamiento de los ingredientes en el mezclado, la selección del envasado, el estudio en los cambios de humedad y para la vida útil del producto. De igual forma, proporcionan información sobre el mecanismo de absorción y las interacciones entre los componentes de los alimentos y el agua para estimar los requisitos energéticos (Martinelli *et al.*, 2007).

Al-Muhtaseb *et al.* (2002) propone que dichas isothermas pueden ser obtenidas en dos formas:

- a) A través de una isoterma de adsorción colocando un material completamente seco en diferentes atmósferas de humedad relativa creciente y midiendo la ganancia de peso debido a la captación de agua
- b) A través de una isoterma de desorción colocando un material inicialmente húmedo bajo las mismas humedades relativas, y midiendo la pérdida de peso

Los procesos de adsorción y desorción no son completamente reversibles, por lo tanto, se puede hacer una distinción entre las isothermas de estos procesos al determinar si los niveles de humedad en el producto aumentan indicando la humectación, o si la humedad disminuye gradualmente para alcanzar el equilibrio con su entorno, lo que implica que el producto se está secando. La diferencia entre la adsorción y desorción se llama histéresis (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).

En la literatura podemos encontrar miles de isothermas de adsorción medidas sobre una amplia variedad de sólidos porosos. A pesar de tal diversidad la mayoría son el resultado de una adsorción física. Estas pueden ser agrupadas convenientemente en seis clases según la clasificación de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC).

Los primeros cinco tipos de la clasificación (I a V) fueron propuestos originalmente por Stephen Brunauer, Paul Emmet y Edward Teller (B.E.T.) La isoterma del Tipo VI es más reciente y se la conoce como isoterma escalonada, es una clase poco común pero interesante desde el punto de vista teórico (López, 2004).

■ Tipo I

La isoterma es cóncava respecto al eje de la presión relativa ($\frac{p}{p_0}$), aumenta rápidamente a baja presión ($\frac{p}{p_0} < 1 \times 10^{-3}$) y posteriormente alcanza una saturación horizontal. Esta clase de isothermas es característica de materiales microporosos. La alta energía de adsorción de los microporos produce que el gas se adsorba a bajas presiones.

Una vez que se ha completado todo el volumen de los microporos la isoterma permanece en un valor casi constante sobre un amplio rango de presiones, lo que produce una línea horizontal hasta su punto más alto (López, 2004).

- **Tipo II**

A bajas presiones es cóncava respecto al eje de la presión relativa ($\frac{p}{p_0}$), luego aumenta linealmente y finalmente se vuelve convexa. Puede ser interpretada como la formación de una capa adsorbida cuyo espesor es incrementado progresivamente a medida que aumenta la presión. Si la rodilla de la isoterma es pronunciada, se asume que en el punto B (el punto donde comienza la sección cuasilineal de la isoterma) se ha completado la formación de la monocapa y empieza la formación de las capas multimoleculares (multicapas). La ordenada del punto B nos da una estimación de la cantidad de adsorbato requerido para cubrir por unidad de masa la superficie del sólido con una monocapa (capacidad de la monocapa). Esta clase de isoterma es característica de sólidos no porosos o de adsorbentes macroporosos. La total reversibilidad de la isoterma de adsorción - desorción, es decir, la ausencia del lazo de histéresis, es una condición que se cumple en este tipo de sistemas (López, 2004).

- **Tipo III**

Es convexa respecto al eje de la presión relativa ($\frac{p}{p_0}$) en todo el rango de presión. Esta característica es indicativa de interacciones débiles entre el adsorbato y el adsorbente. En la práctica no es común encontrarse con este tipo de isothermas (López, 2004).

- **Tipo IV**

A bajas presiones se comporta como la del tipo II, siendo el rasgo distintivo de esta isoterma su lazo de histéresis. Es característica de los sólidos mesoporosos. La aparición del ciclo de histéresis se debe a que el proceso de llenado de los mesoporos esta gobernado por el fenómeno de condensación capilar y por las propiedades del sólido (López, 2004).

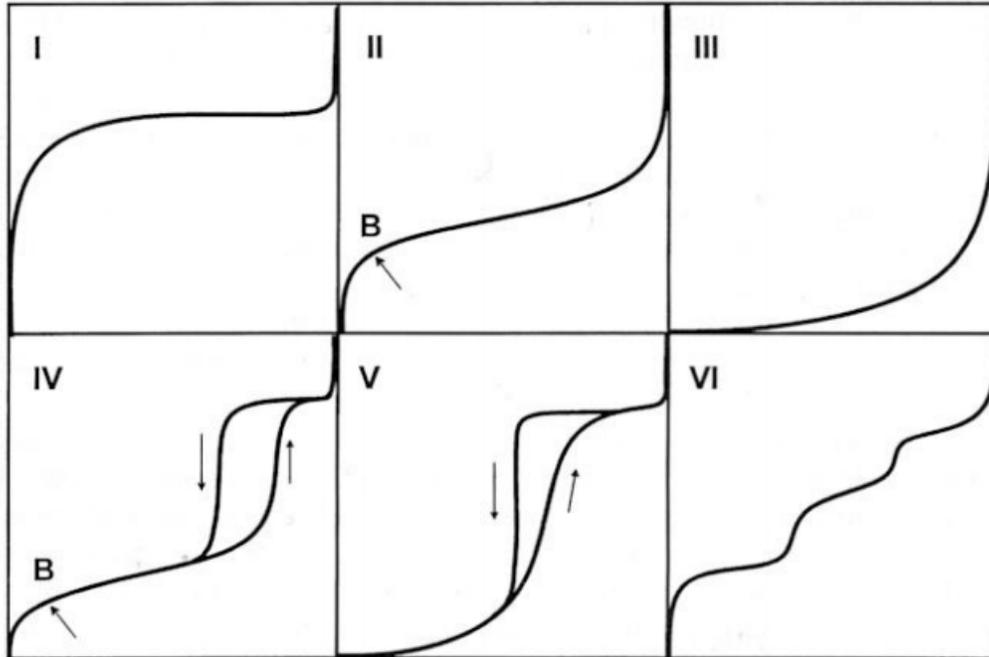
- **Tipo V**

Del mismo modo que las de tipo III, esta clase de isothermas se obtiene cuando las interacciones entre el adsorbato y el adsorbente son débiles. La presencia del lazo de histéresis está asociado con el mecanismo de llenado y vaciado de los poros. En la práctica es poco usual encontrarse con este tipo de isothermas (López, 2004).

▪ Tipo VI

La isoterma escalonada es la menos común de todas las isotermas. Se la asocia con la adsorción capa por capa sobre superficies que son altamente homogéneas respecto del adsorbato. La forma del escalón depende de la temperatura y de los detalles del sistema (López, 2004).

En la figura 6 se puede observar la clasificación descrita (I-VI):



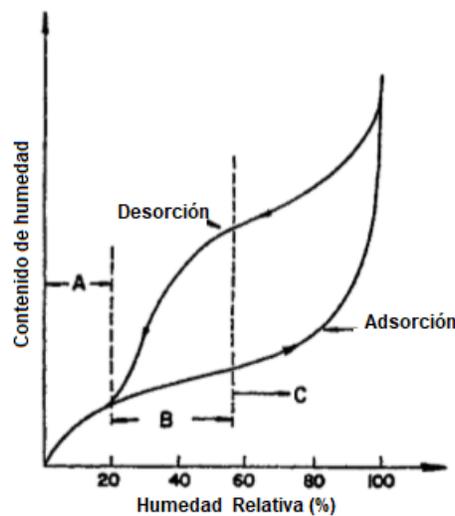
*Fuente: López, 2004.

Figura 6: Los seis tipos de isotermas de adsorción según la clasificación de la IUPAC

Para efectos de interpretación, la isoterma generalizada de sorción de humedad para un sistema alimentario hipotético puede dividirse en tres regiones principales, como se muestra en la figura 7.

La región A representa el agua contenida ligada con la entalpía de vaporización. Un caso típico es la sorción de agua en biopolímeros altamente hidrofílicos, tales como proteínas y polisacáridos. El contenido de humedad en teoría, representa la adsorción de la primera capa de moléculas de agua. Por lo general, las moléculas de agua en esta región son inestables y no están disponibles para reacciones químicas. Se observa empíricamente que la mayoría de los productos alimenticios secos muestran su mayor estabilidad en contenidos de humedad comparables al contenido de humedad en monocapa.

La región B, representa moléculas de agua que están firmemente menos unidas, inicialmente como multicapas por encima de la monocapa. En esta región, el agua se mantiene en la matriz sólida por condensación capilar y está disponible como disolvente para solutos de bajo peso molecular y para algunas reacciones bioquímicas. La cantidad de agua presente en el material que no se congela en el punto de congelación normal generalmente está dentro de esta región. En la región de C o superior, el exceso de agua está presente en los macrocapilares o como parte de la fase fluida y por lo tanto es capaz de actuar como un disolvente. El crecimiento microbiano se convierte en una importante reacción de deterioro en esta región (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).



*Fuente: Al-Muhtaseb *et al.*, 2002.

Figura 7: Isoterma general de sorción para productos alimenticios

El efecto de la temperatura en las isotermas de sorción es de gran importancia dado que los alimentos están expuestos a un rango de temperaturas durante el almacenamiento, procesamiento y los cambios de humedad. Esta variable afecta la movilidad de las moléculas de agua y el equilibrio dinámico entre el vapor y las fases adsorbidas.

En general, se ha encontrado que si la actividad acuosa se mantiene constante, un aumento en la temperatura provoca una disminución en la cantidad de agua absorbida, debido a que algunas moléculas se activan a niveles de energía que les permiten separarse de sus sitios de sorción, disminuyendo así el contenido de humedad en el equilibrio (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).

4. Justificación, hipótesis y objetivos

4.1. Justificación

El modelo actual de consumo de nuestra sociedad busca un sentido basado en la manifestación y uso de materias primas amigables con el medio ambiente y alternativas saludables como fuente de nutrición. Es por ello, que las diversas industrias de diferentes sectores tienden a buscar e invertir en investigaciones y desarrollos compatibles con las necesidades del ser humano. La oferta, la demanda, los costos de producción y la factibilidad tecnológica juega un papel fundamental en la formulación de las condiciones ideales para establecer un nuevo producto de consumo.

Es así como el mucílago extraído de la semilla de chía (*Salvia hispanica L.*) es parte de un sistema que compite como un agente saludable y funcional debido a sus propiedades de estructuración, texturización, emulsionante y espesante, además de ser un excelente modulador de saciedad, índice glucémico, microbiota intestinal y supresor en la densidad calorífica de los alimentos recomendándose por sus altos niveles de proteína, fibra dietética, vitaminas y minerales (calcio, potasio, magnesio, fósforo, selenio, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, sodio y zinc), pero sobre todo por su alto contenido de aceite omega 3 en comparación con otras fuentes naturales conocidas hasta la fecha.

Estas propiedades son resultado de la naturaleza de mucílago, sin embargo, durante el secado, almacenamiento y procesamiento con otros alimentos es susceptible a sufrir un cambio fisicoquímico y biológico como resultado de las diferentes interacciones moleculares y ambientales (temperatura y humedad). En efecto, la importancia en el establecimiento de las condiciones anteriores juega un rol que impacta directamente en el uso y proceso de este alimento con otros así como de forma individual reflejándose como un material alternativo que sea técnicamente compatible y económico.

Este trabajo explica la importancia alimenticia y social de la semilla de la chía así como las aplicaciones fundamentales en los diferentes sectores de la industria de consumo a través de un análisis termodinámico experimental para establecer las condiciones de estabilidad del mucílago liofilizado a partir del contenido de humedad y la actividad acuosa a diferentes temperaturas ajustándolos con diferentes modelos matemáticos por regresión no lineal.

4.2. Hipótesis

Es posible establecer las condiciones de estabilidad del mucílago liofilizado de la semilla de chía a partir de datos experimentales de las isothermas de adsorción de vapor de agua utilizando modelos teóricos, semiempíricos y empíricos como ecuaciones de ajuste.

4.3. Objetivo general

Analizar el fenómeno de adsorción en el mucílago liofilizado de la semilla de chía a partir de los parámetros termodinámicos (contenido de humedad, actividad de agua y temperatura) para establecer las condiciones de estabilidad.

4.4. Objetivos específicos

- Extraer el mucílago a partir de la semilla de chía
- Liofilizar el mucílago de la chía extraído
- Obtener las isothermas de adsorción mediante el método gravimétrico de celdas en equilibrio
- Ajustar los datos experimentales obtenidos mediante los modelos matemáticos por regresión no lineal
- Obtener el área superficial de adsorción y el radio del poro para el mucílago liofilizado de la semilla de chía
- Establecer las condiciones de estabilidad para el mucílago liofilizado de la semilla de chía

5. Metodología

5.1. Materiales

Las semillas de chía (*Salvia hispanica L.*) fueron suministradas por agricultores en el Región Atlixco, Estado de Puebla, México. Los reactivos químicos fueron comprados en la empresa Sigma Aldrich S.A. de C.V. (Toluca, Estado de México, México). Toda el agua utilizada en los experimentos fue bidestilada.

5.2. Extracción del mucílago

La extracción del mucílago se realizó según el método propuesto por Muñoz *et al.* (2011) con algunas modificaciones de acuerdo a la experimentación. Se colocaron 40g de semilla de chía en un vaso de precipitado de 1L y se añadió agua bidestilada en una proporción en peso 1:20. El pH fue ajustado a un valor de 8 usando soluciones 0.1M NaOH y HCl.

La mezcla se colocó en un agitador magnético y se hidrató durante 2h a una temperatura constante de 80°C. El mucílago se separó de la semilla con una espátula de goma sobre una malla No.40 (abertura: 0.400mm). El filtrado colocó en una centrífuga de alta velocidad *Hermle Z323K* (Hermle, Labortechnik, Alemania) durante 8 minutos a 524 x g (RCF). Finalmente el producto final se decantó.

5.3. Liofilización del mucílago

El mucílago extraído se congeló con acetona previamente enfriada a una temperatura de -50°C utilizando hielo seco (CO_2 en estado sólido). Posteriormente, la muestra se deshidrató utilizando un liofilizador *Labconco Bench Lyph-lock 6* (Labconco, MO, E.U.A.) durante un tiempo de 48h.

5.4. Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción se determinaron mediante el método gravimétrico de celdas en equilibrio descrito por Lang *et al.* (1981). Aproximadamente se colocaron 0.5g de diversas muestras de mucílago seco en pequeños desecadores de vidrio de 10cm de diámetro, previamente acondicionados, que contenían soluciones salinas saturadas en el fondo: cloruro de litio ($LiCl$), cloruro de magnesio ($MgCl_2$), carbonato de potasio (K_2CO_3), cloruro de sodio ($NaCl$) y cloruro de potasio (KCl) proporcionando diferentes valores de actividad acuosa

(a_w) en un intervalo de 0.11 – 0.85 (Labuza *et al.*, 1985).

Se colocó papel de filtro (Whatman No.1) sobre las soluciones salinas saturadas, en una placa perforada utilizada como soporte y permitir la transmisión de humedad. Cinco desecadores para cada muestra de mucílago seco se colocaron en hornos de secado por convección forzada a 25°C, 35°C y 40°C (± 0.1). Las muestras se pesaron con una balanza electrónica *Ohaus* (modelo AP210, Pine Brook, E.U.A.) cada cinco días hasta alcanzar el equilibrio. Se asumió el equilibrio cuando la diferencia entre dos ponderaciones consecutivas fue inferior a $1 \frac{mg}{g}$ de sólidos. El tiempo para alcanzar el equilibrio varió de 20 a 25 días; aunque un verdadero estado de equilibrio en términos termodinámicos es difícil de alcanzar, un estado de pseudo-equilibrio puede ser considerado como estable para fines prácticos. La actividad acuosa (a_w) se midió con un medidor *Aqualab* con compensación de temperatura (serie 3 modelo TE, Decagon Devices Inc. Pullman, E.U.A.).

El contenido de humedad en el equilibrio del mucílago liofilizado se determinó por diferencia de peso después de secarlo al vacío (modelo Felisa FE 100, Ciudad de México, México) a 60°C durante un tiempo de 24h, utilizando perclorato de magnesio como desecante ($Mg(ClO_4)_2$). Todos los experimentos de adsorción de humedad se replicaron tres veces.

La diferencia porcentual en los contenidos de humedad en el equilibrio, entre las muestras por triplicado fue en promedio, menos del 1% de la media de los tres valores. Los valores promedio fueron utilizados en la determinación de las isothermas de adsorción de humedad.

Los valores fueron ajustados por las ecuaciones de los modelos teóricos de B.E.T. (ecuación 5) y G.A.B. (ecuación 6), los modelos semiempíricos de Lewicki (dos parámetros) (ecuación 7) y Halsey (ecuación 8) y los modelos empíricos de Oswin (9) y Henderson (ecuación 10). Los parámetros se estimaron ajustando el modelo matemático a los datos experimentales a partir de una regresión no lineal (*Program REG Regression*) en el software Polymath (6.0).

El ajuste se evaluó utilizando la diferencia porcentual relativa entre los valores experimentales y previstos del contenido de humedad, es decir, utilizando el módulo de desviación relativa media (E), definido por la ecuación 11 (Pérez-Alonso *et al.*, 2006). En general, se obtiene un buen ajuste cuando $E < 5\%$.

$$E = \frac{100}{N} \sum \frac{(M_i - M_{Ei})}{M_i} \quad (11)$$

donde:

M_i : contenido de humedad en la observación i

M_{Ei} : contenido de humedad previsto en esa observación

N : número de observaciones

5.5. Área específica de adsorción

El área específica de adsorción (S_0) juega un papel importante en la determinación de los enlaces de agua en un material. Se calcula a partir de los valores de humedad en la monocapa (M_0) tal como se muestra en la ecuación 12 y 13 (Velázquez-Gutiérrez *et al.*, 2015):

$$S_0 = M_0 * \left(\frac{1}{M_w} \right) * N_0 * A_{H_2O} \quad (12)$$

donde:

S_0 : área específica de adsorción ($\frac{m^2}{g}$)

M_w : peso molecular del agua ($0.018015 \frac{Kg}{mol}$)

N_0 : número de Avogadro ($6.023 \times 10^{23} \frac{moléculas}{mol}$)

A_{H_2O} : área de la molécula del agua ($1.06 \times 10^{-19} m^2$)

Por lo tanto,

$$S_0 = 3.5 \times 10^3 * M_0 \quad (13)$$

La ecuación de Kelvin (ecuación 14) se utilizó para calcular el radio crítico del poro. Esta ecuación se aplica principalmente en la región de condensación para la isoterma (Velázquez-Gutiérrez *et al.*, 2015).

$$r_c = \frac{2 * \sigma * V_m}{R * T * Ln(a_w)} \quad (14)$$

donde:

r_c : radio crítico del poro (m)

σ : tensión superficial ($\frac{N}{m}$)

V_m : volumen molar del sorbato ($\frac{m^3}{mol}$)

R : constante universal de los gases ideales ($8.314 \times 10^{-3} \frac{KJ}{molK}$)

T : temperatura (K)

a_w : actividad acuosa

A partir de la ecuación de Halsey (ecuación 8) se calculó el espesor de las multicapas de agua adsorbida (ecuación 15):

$$t = 0.354 \left(\frac{-5}{\ln a_w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

donde:

t : espesor de la multicapas de agua adsorbida (nm)

Finalmente, el radio del poro (r_p) se puede obtener por la ecuación 16 (Velázquez-Gutiérrez *et al.*, 2015), a partir de la suma del radio crítico (r_c) cuando se produce la condensación o evaporación capilar y el espesor de las múlticapas (t):

$$r_p = r_c + t \quad (16)$$

6. Resultados y discusión

6.1. Isotermas de adsorción

6.1.1. Modelo teórico de B.E.T.

El modelo teórico de B.E.T. (ecuación 5) fue utilizado para ajustar los datos experimentales obtenidos (tabla 22, tabla 23 y tabla 24), los valores del módulo de desviación relativa media (E) encontrados fueron 13.806 %, 4.131 % y 2.187 % a 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente. Se observa que dicho valor se vuelve confiable a medida que la temperatura aumenta, si bien, el modelo aplica en un intervalo de a_w de 0 a 0.55 (Ramírez *et al.*, 2014), los valores de la última temperatura utilizada se encuentra más cercana al límite superior del mismo, lo cual resulta con un mayor ajuste. Los coeficientes de determinación (R^2) son 0.957, 0.997 y 0.999 en orden ascendente.

Las dos constantes obtenidas del modelo de B.E.T. (tabla 13) son el contenido de humedad de monocapa (M_0) y la constante de energía (C_B). Ambas constantes son derivadas de la ecuación de Langmuir a altos valores de presión (Ramírez *et al.*, 2014).

Tabla 13: Parámetros del modelo de B.E.T. para las isotermas de adsorción

Modelo B.E.T. Parámetros	Temperatura		
	25°C	35°C	40°C
M_0	4.707	4.581	4.228
C_B	63.078	10.777	5.679
R^2	0.957	0.997	0.999
Varianza	4.291	0.196	0.050
%Error	13.806	4.131	2.187

La disminución del valor de la monocapa y la constante de energía con la temperatura, indica que existen menos sitios activos de adsorción de agua con el incremento de esta (Alpizar-Reyes *et al.*, 2002). Los valores estables óptimos para el mucílago obtenidos a través de este modelo son 4.707, 4.581 y 4.228 $\left[\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.} \right]$ a 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente. Si bien, el modelo presenta un porcentaje de error mayor a una baja temperatura no deja de ser un elemento confiable conforme esta aumenta, es decir, presenta valores aceptables para la compleja composición y estructura de los alimentos, tal como lo es el mucílago de la semilla de chíá.

6.1.2. Modelo teórico de G.A.B.

Con base en el modelo de G.A.B. (ecuación 6) los parámetros C_G y K se obtuvieron a través de una regresión no lineal (*Program REG Regression*) en el software Polymath (6.0). Los valores del módulo de desviación relativa media (E) fueron menores al 3.0% y los coeficientes de determinación (R^2) fueron superiores a un valor de 0.998 en todas las temperaturas. La importancia de este modelo, recae principalmente en el valor de la monocapa (M_0), ya que indica la cantidad de agua que se adsorbe fuertemente en sitios específicos y se considera como el valor óptimo en el que un alimento es más estable (Pérez-Alonso *et al.*, 2006).

En la tabla 14 se muestran los parámetros obtenidos para el modelo de G.A.B.:

Tabla 14: Parámetros del modelo de G.A.B. para las isotermas de adsorción

Modelo G.A.B. Parámetros	Temperatura		
	25°C	35°C	40°C
M_0	7.929	5.326	4.048
C_G	4.965	6.164	6.526
K	0.872	0.963	1.010
R^2	0.998	0.999	0.999
Varianza	0.156	0.021	0.048
%Error	2.996	1.006	2.886

Los resultados anteriores demuestran que este es un modelo robusto de ajuste para los datos experimentales obtenidos, principalmente por la versatilidad otorgada por los parámetros del mismo.

Los valores de la monocapa (M_0) son 7.929, 5.326 y 4.048 $\left[\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.}\right]$ para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente. Al igual que en el modelo B.E.T. dicha disminución se atribuye a las reducciones en el número de sitios disponibles para la unión de agua debido a cambios fisicoquímicos, topología y cambios estructurales causados por aumentos de temperatura en el mucílago (Pérez-Alonso *et al.*, 2006).

Por otra parte, la constante de Guggenheim (C_G) incrementó al hacerlo la temperatura, se obtuvieron valores de 4.965, 6.164 y 6.526 a 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente, lo que sugiere que las interacciones entre el mucílago y el vapor de agua fueron mayores a una temperatura menor. Al no presentarse una tendencia general en la constante C_G y no tener un significado físico para este comportamiento, puede explicarse en términos matemáticos, es decir, es posible que C_G sea el resultado de la compensación matemática entre los parámetros durante el proceso de ajuste de la curva (Velázquez-Gutiérrez *et al.*, 2015).

Los valores del parámetro de corrección (K) son 0.872, 0.963 y 1.010 a 25°C, 35°C y 40°C, respectivamente, estos implican las interacciones entre las moléculas de agua y el adsorbente (mucílago) en la multicapa.

Los resultados fueron menores para el mucílago liofilizado almacenado a 25°C lo que implica que hubo menos interacciones entre las moléculas de agua y el mucílago en la multicapa. El modelo G.A.B. describe las isothermas de tipo sigmoidal cuando los valores de K caen entre los valores de 0.24 y 1. También un valor de $K < 1$ indica un estado estructurado del adsorbato en las capas adyacentes a la monocapa.

La naturaleza del comportamiento de adsorción en los materiales alimenticios es difícil de explicar. Para los biopolímeros, el proceso implica la adsorción y los cambios estructurales (cristalinos o amorfos) de la matriz del polímero debido a la hinchazón (Pérez-Alonso *et al.*, 2006). Otros factores involucrados en el mecanismo son la porosidad y la especificidad de la atracción de moléculas de agua a la superficie de los sitios hidrofílicos en las matrices de los biopolímeros (Velázquez-Gutiérrez *et al.*, 2015).

Ambos modelos teóricos están fundamentados bajo el principio de la adsorción en la monocapa, sin embargo, es el de G.A.B. quien representa un mejor ajuste para los datos experimentales. Los parámetros matemáticos introducen los elementos necesarios para tratar de explicar la naturaleza del mucílago estudiado. El modelo de B.E.T. demuestra mantener un grado de compatibilidad y confianza en este estudio, a pesar de que asume que la adsorción física se localiza en las multicapas sin interacciones laterales (Ramírez *et al.*, 2014).

Las isothermas de adsorción (experimentales y ajustadas) a 25°C, 35°C y 40°C para el mucílago liofilizado de la semilla de chía se muestran en las figuras 8 y 9.

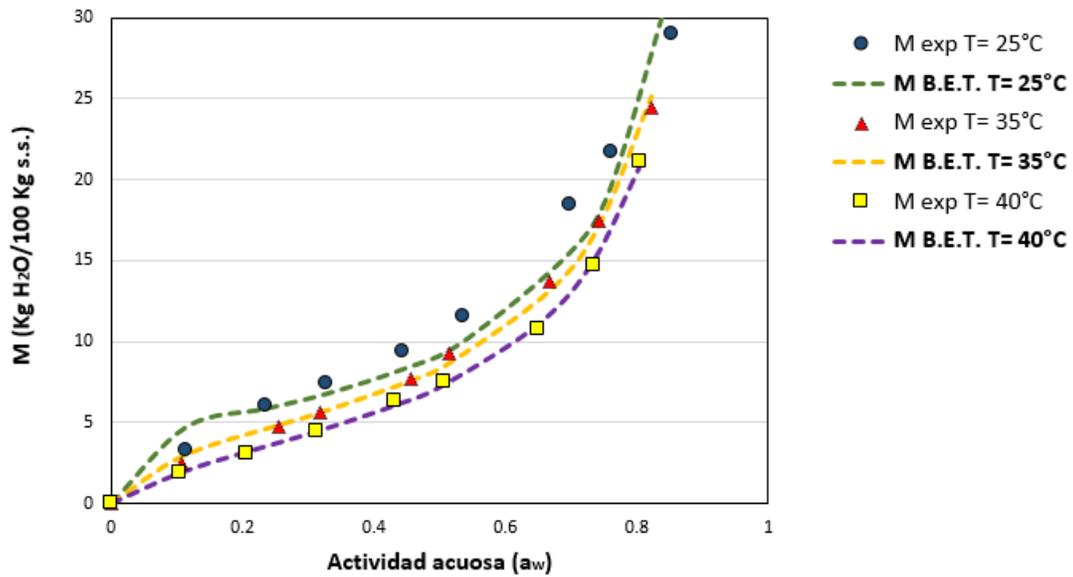


Figura 8: Isotherma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá. Modelo de B.E.T.

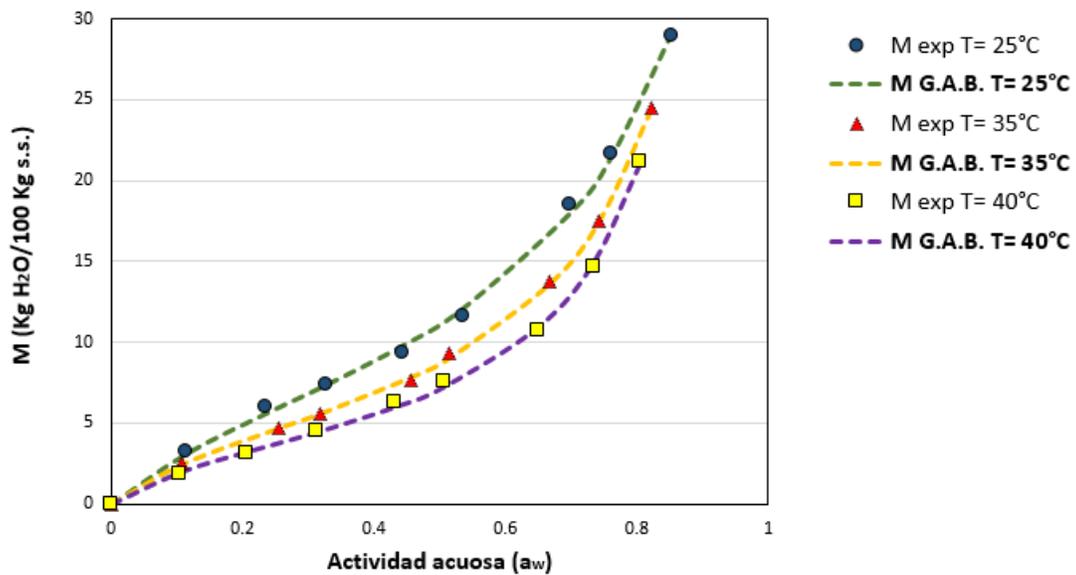


Figura 9: Isotherma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chíá. Modelo de G.A.B.

Las figuras 8 y 9 representan una isoterma sigmoideal de tipo II según la clasificación propuesta por López (2004) que es característica de biopolímeros como el almidón de patata, goma arábiga, goma de mezquite, mucílago de nopal (Velázquez-Gutiérrez *et al.*, 2015) y alimentos como la nuez de macadamia, zanahoria, cacao, cebolla, pimienta verde, entre otros (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002). Gráficamente, es posible visualizar el ajuste robusto del modelo de G.A.B sobre los datos experimentales mientras que el modelo de B.E.T. tiende a hacerlo en temperaturas más altas.

De igual forma, a medida que la temperatura aumenta a una actividad acuosa constante, el contenido de humedad disminuye. Esta tendencia ha sido explicada por el estado de excitación de las moléculas. Por lo tanto, a altas temperaturas, las fuerzas atractivas entre las moléculas de agua son menores debido a un aumento en la energía cinética lo que conduce a una mayor distancia entre sí. En consecuencia, las moléculas de agua con movimiento lento (menor energía) se unen fácilmente en la superficie (Alpizar-Reyes *et al.*, 2017).

Por otra parte, se observa que el contenido de humedad en equilibrio aumentó con la actividad acuosa a temperatura constante, un comportamiento que podría atribuirse a la tendencia del mucílago a disminuir la presión de vapor cuando la humedad relativa del aire lo hace. En consecuencia, el contenido de humedad aumenta casi linealmente con la actividad acuosa, sin embargo, a altos valores el contenido de humedad aumenta rápidamente, lo cual puede explicarse por el hecho de que la adsorción física ocurre en sitios muy activos a bajos valores de actividad acuosa. Por lo tanto, el agua se puede unir solo a la superficie en los sitios con grupos hidroxilo (Alpizar-Reyes *et al.*, 2017).

Las isotermas de adsorción de humedad de la mayoría de los alimentos no son lineales y generalmente son de forma sigmoideal tipo II. La mayor parte del agua en los alimentos frescos ejerce una presión de vapor muy cercana a la del agua pura, en este nivel la presión se mantiene hasta que el contenido de humedad de los alimentos disminuye hasta aproximadamente el 22%. Por lo tanto, el nivel de humedad ya no puede sostener la presión de vapor de los alimentos y comienza a mostrar una presión más baja. La fracción de 22% de agua en alimentos deshidratados da como resultado la forma sigmoideal característica de las isotermas de adsorción de agua (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).

6.1.3. Modelo semiempírico de Lewicki (dos parámetros)

Los modelos semiempíricos de Lewicki (ecuación 7) y Halsey (ecuación 8) contienen una parte basada en la teoría y una parte basada en datos obtenidos experimentalmente. Inicialmente, del primer modelo se obtuvieron valores para el módulo de desviación mayores al 5 % a 25°C, 35°C y 40°C y los coeficientes de determinación (R^2) fueron inferiores a 0.90. En efecto este modelo, específicamente para este conjunto de datos experimentales no representa un ajuste favorable para replicar los resultados así como para explicar la proporción de variación de los parámetros obtenidos.

Tabla 15: Parámetros del modelo de Lewicki (dos parámetros) para las isotermas de adsorción

Modelo LEWICKI (2P) Parámetros	Temperatura		
	25°C	35°C	40°C
A	9.276	7.295	5.894
B	0.339	0.203	0.108
R^2	0.851	0.865	0.876
<i>Varianza</i>	15.010	9.375	6.430
<i>%Error</i>	20.022	28.860	38.123

La inmensa variación en los módulos así como en los coeficientes, denota que el modelo no sigue la trazabilidad de los datos experimentales, sin embargo, en valores experimentales de a_w mayores a 0.7 se observa un porcentaje de error menor. Los parámetros A y B representan un ajuste matemático más que un significado físico, a pesar de ello, no deja de ser un modelo que manifieste la posibilidad de dar sentido y explicación en el estudio de otros alimentos. Utilizando este modelo y bajo las mismas temperaturas, Alpizar-Reyes *et al.* (2013) obtuvo coeficientes de determinación menores a 4.015 %, varianzas no mayores a 0.08 y coeficientes de determinación mayores a 0.995 en el efecto de la actividad de agua y temperatura de transición vítrea en la estabilidad de microcápsulas de jugo de betabel.

6.1.4. Modelo semiempírico de Halsey

Los valores para el módulo de desviación relativa media a 25°C, 35°C y 40°C son 34.994 %, 13.662 % y 6.952 %, respectivamente. Los coeficientes de determinación (R^2) son 0.898, 0.980 y 0.995 en orden ascendente. Se observa que conforme aumenta el valor de la temperatura así como el valor de a_w también lo hace el ajuste en los datos experimentales, lo que tiende a ser que este modelo es aplicable a temperaturas mayores a 40°C para el mucílago liofilizado de la semilla de chíca.

Tabla 16: Parámetros del modelo de Halsey para las isotermas de adsorción

Modelo HALSEY	Temperatura		
	25°C	35°C	40°C
<i>A</i>	46.220	47.771	43.994
<i>B</i>	0.029	0.031	0.031
R^2	0.898	0.980	0.995
<i>Varianza</i>	10.253	1.369	0.223
<i>%Error</i>	34.994	13.662	6.952

Alpizar-Reyes *et al.* (2013) obtuvo coeficientes de determinación de hasta 12.5 %, varianzas de hasta 0.37 y coeficientes de determinación mayores a 0.97 en su estudio previamente mencionado. En ambos modelos semiempíricos los parámetros demuestran cierta tendencia respecto a la temperatura, ya que en ambos casos A y B disminuyen al incrementar la misma.

Las figuras 10 y 11 representan las isotermas de adsorción sigmoidales de tipo II (experimentales y ajustadas) a 25°C, 35°C y 40°C para los modelos semiempíricos.

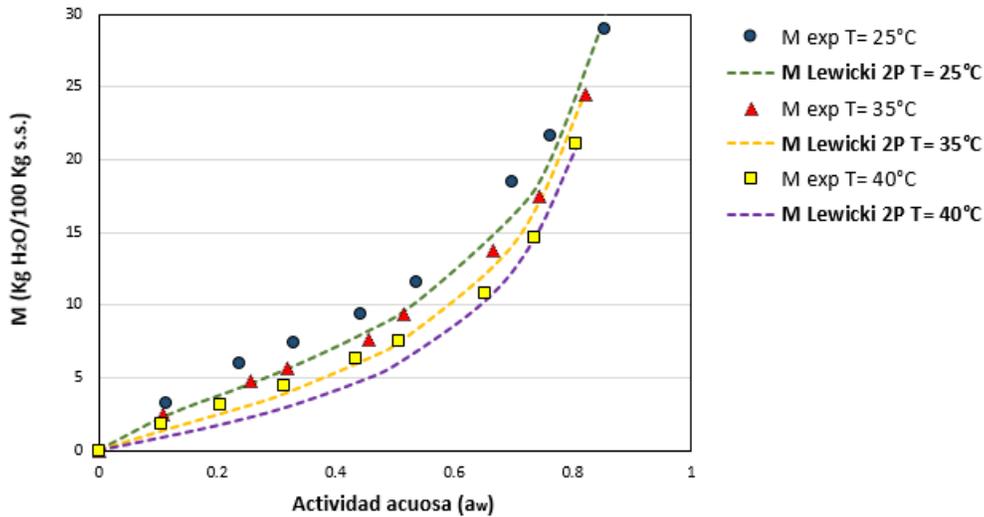


Figura 10: Isoterma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía. Modelo de Lewicki (2 parámetros)

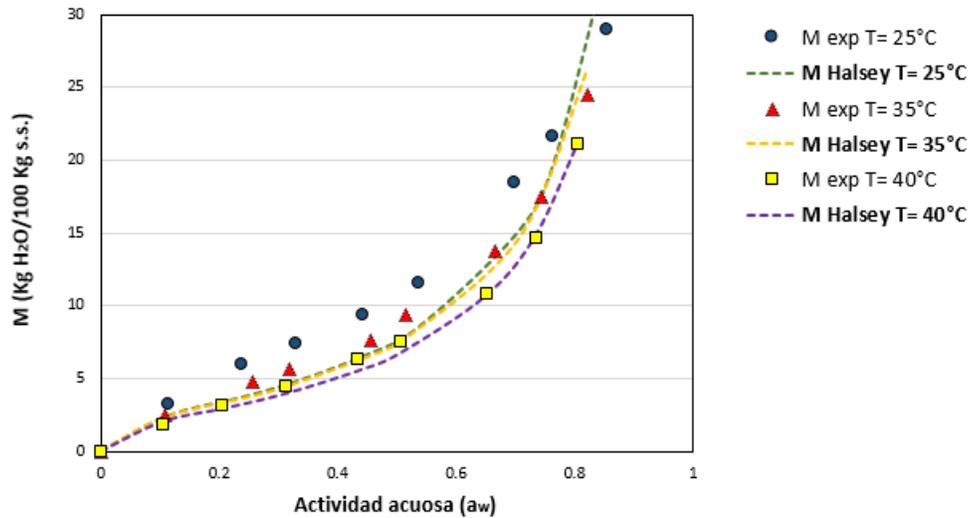


Figura 11: Isoterma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía. Modelo de Halsey

6.1.5. Modelo empírico de Oswin

Del modelo empírico de Oswin (ecuación 9) se obtuvieron valores para el módulo de desviación relativa media (E) menores a 5.0% para las temperaturas de 25°C y 35°C; a 40°C superó el valor aceptable de ajuste. A pesar de ello, los coeficientes de determinación (R^2) fueron mayores a 0.99, indicando la utilidad y flexibilidad de este modelo para obtener resultados intuitivos y rápidos. La tabla 17 muestra los parámetros obtenidos.

Tabla 17: Parámetros del modelo de Oswin para las isotermas de adsorción

Modelo Oswin Parámetros	Temperatura		
	25°C	35°C	40°C
A	11.107	8.884	7.317
B	0.551	0.655	0.724
R^2	0.997	0.998	0.995
<i>Varianza</i>	0.259	0.086	0.242
<i>%Error</i>	3.862	4.113	7.249

6.1.6. Modelo empírico de Henderson

Todos los valores del módulo de desviación relativa media (E) fueron mayores al 5.0% a 25°C, 35°C y 40°C y los coeficientes de determinación (R^2) fueron mayores a 0.98. La tabla 18 muestra todos los resultados.

Tabla 18: Parámetros del modelo Henderson para las isotermas de adsorción

Modelo Henderson	Temperatura		
	25°C	35°C	40°C
<i>A</i>	0.044	0.080	0.114
<i>B</i>	1.125	0.971	0.891
R^2	0.995	0.988	0.982
<i>Varianza</i>	0.486	0.786	0.924
<i>%Error</i>	9.571	16.817	22.411

A pesar de que las constantes en los modelos empíricos no representan ningún sentido físico, demuestran un ajuste sobre los datos experimentales evidenciando cierta tendencia respecto a la temperatura, ya que para el modelo de Oswin (ecuación 9) el parámetro *A* disminuye y el parámetro *B* incrementa conforme al aumento de dicha variable. En el modelo de Henderson (ecuación 10) el parámetro *A* aumenta, mientras que el parámetro *B* disminuye (tabla 18). Alpizar-Reyes *et al.* (2013) obtuvo relaciones iguales conforme a su estudio.

Las isotermas de adsorción sigmoidales de tipo II (experimentales y ajustadas) a 25°C, 35°C y 40°C para los modelos empíricos se observan en las figuras 12 y 13.

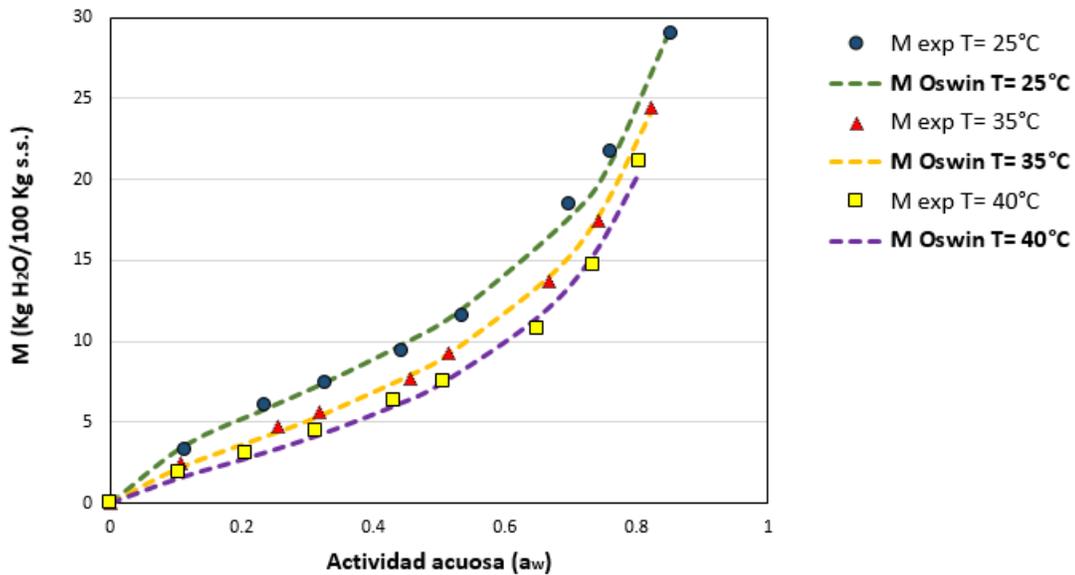


Figura 12: Isoterma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía. Modelo de Oswin

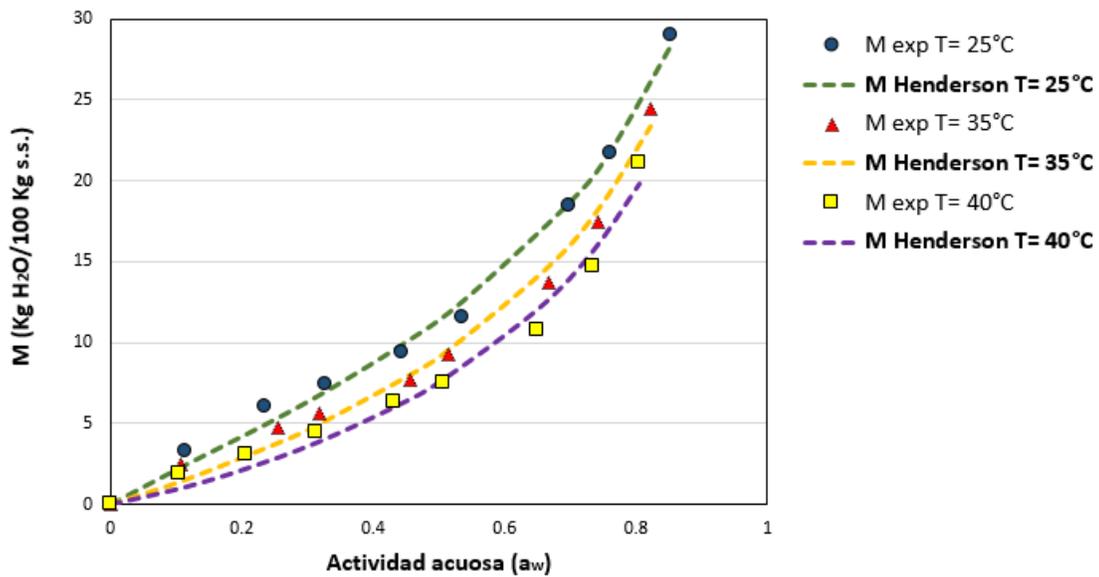


Figura 13: Isotherma de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía.
Modelo de Henderson

6.2. Interpretación de las isothermas de adsorción: modelo teórico de G.A.B.

Las isothermas de adsorción a 25°C, 35°C y 40°C obtenidas a partir del modelo teórico de G.A.B. (figura 9) se pueden dividir en tres regiones principales con la finalidad de representar graficamente las zonas de estabilidad del mucílago liofilizado de la semilla de chía.

Las figuras 14, 15 y 16 muestran lo descrito anteriormente:

■ Isoterma de adsorción a 25°C:

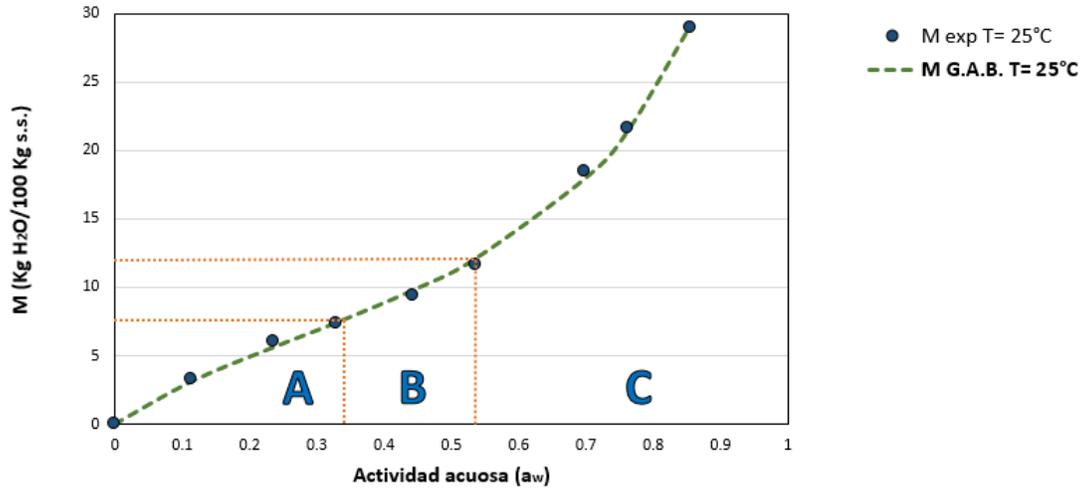


Figura 14: Regiones de la isoterma de adsorción a 25°C: modelo de G.A.B.

■ Isoterma de adsorción a 35°C:

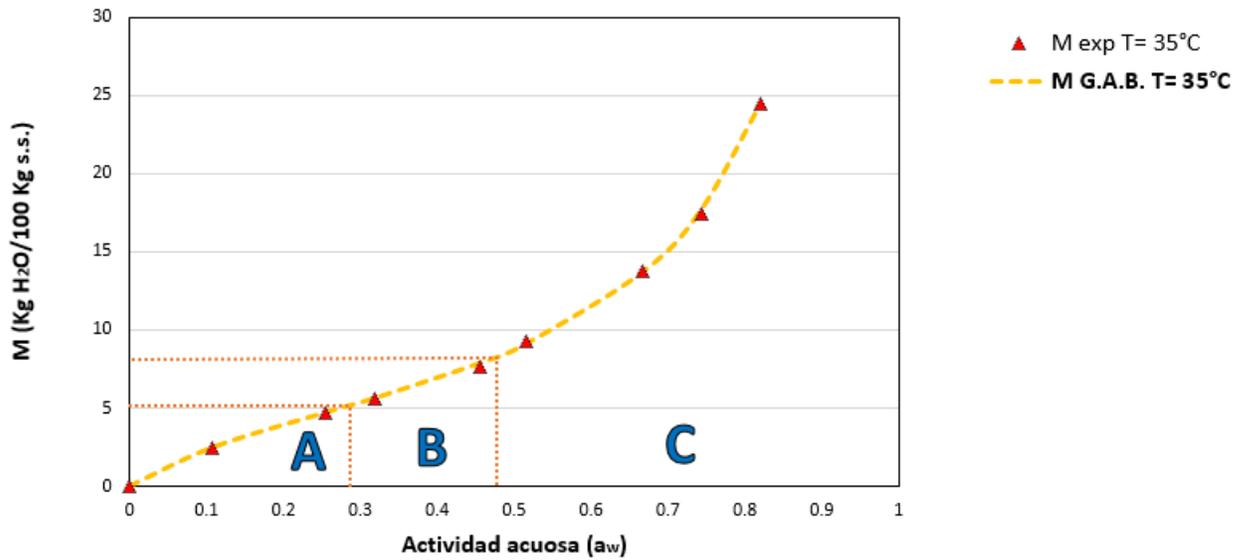


Figura 15: Regiones de la isoterma de adsorción a 35°C: modelo de G.A.B.

■ Isoterma de adsorción a 40°C:

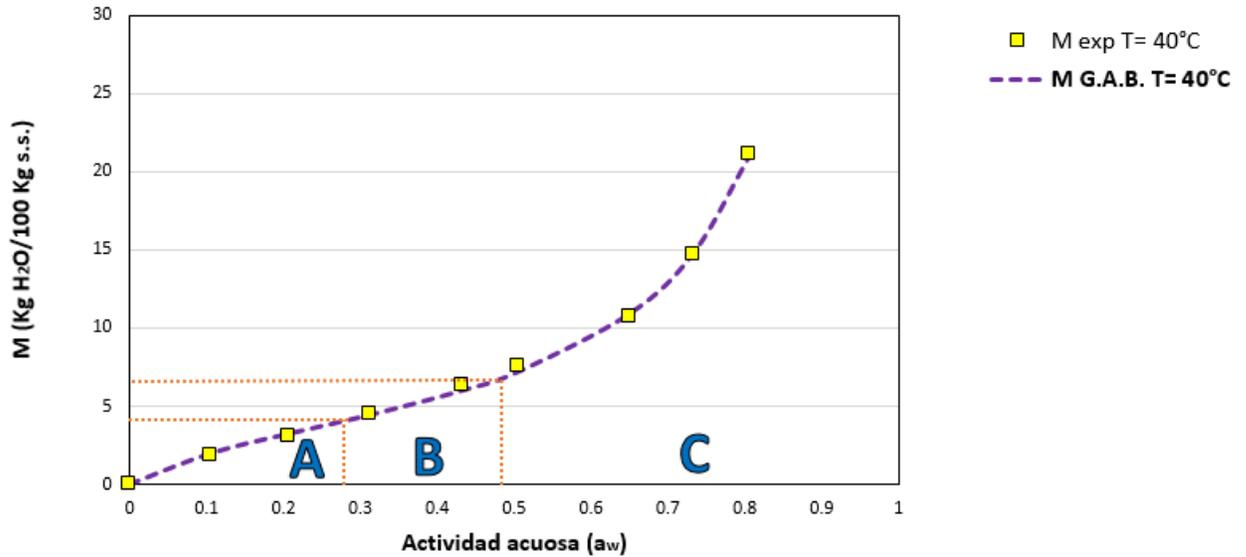


Figura 16: Regiones de la isoterma de adsorción a 40°C: modelo de G.A.B.

Tomando como puntos de referencia el contenido de humedad en la monocapa (M_0) y la actividad acuosa (a_w) se construyó la región A en las tres isotermas de adsorción a 25°C, 35°C y 40°C. Siendo esta la región que representa físicamente la adsorción de la primera capa de moléculas de agua cuyo espesor es incrementado progresivamente a medida que aumenta la presión, así como la zona más inestable y no disponible para las reacciones químicas. A medida que incrementa la temperatura, dicha región comienza a hacerlo, limitando la zona segura o estabilidad para el mucílago liofilizado de la semilla de chía.

La construcción de la región B está basada en el punto siguiente del contenido de humedad en la monocapa (M_0) a 25°C, 35°C y 40°C. Tiene una forma cuasilineal y físicamente indica la formación de las multicapas, por lo cual el agua adsorbida está disponible como disolvente para los solutos de bajo peso molecular y para algunas reacciones bioquímicas. Por ello, el trabajar con contenidos de humedad en esta zona resulta poco conveniente y en consecuencia puede resultar en reacciones deteriorativas.

La región de C o superior se encuentra una vez que la forma cuasilineal comienza a ser convexa respecto a la actividad acuosa (a_w). Esta zona representa físicamente el exceso de agua presente en los poros y por lo tanto es capaz de actuar como un disolvente. Por lo tanto, los cambios fisicoquímicos ocurren dentro de esta zona de riesgo.

6.3. Área específica de adsorción

La estabilidad de los alimentos depende de la cantidad de agua adsorbida en la superficie que interactúa con sus sitios activos. Algunas de las propiedades de estudio son el área específica de adsorción (S_0) y radio del poro (r_p). El modelo teórico de G.A.B. representa el mejor ajuste sobre los datos experimentales obtenidos debido a que los valores del módulo de desviación relativa media fueron menores al 3.0 % y los coeficientes de determinación fueron superiores a 0.998. A partir de ello, se tomaron los valores del contenido de humedad en la monocapa (M_0) y se calculó el área específica de adsorción con la ecuación 13.

La tabla 19 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 19: Áreas específicas de adsorción a 25°C, 35°C y 40°C

Temperatura	M_0 $\left[\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.} \right]$	S_0 $\left[\frac{m^2}{g} \right]$
25°C	7.929	277.517
35°C	5.326	186.437
40°C	4.048	141.692

Los resultados anteriores indican que a medida que la temperatura aumenta, la disponibilidad de los sitios activos disminuyen para la unión hidrofílica. Dichas tendencias decrecientes revelan que las energías de unión asociadas con la adsorción en la monocapa y multicapa en las muestras del mucílago liofilizado disminuyeron al aumentar la temperatura. Esto puede atribuirse a una reducción en la capacidad de adsorción total del mucílago, que a su vez puede reflejar modificaciones físicas y químicas inducidas por la temperatura.

Labuza (1968) afirma que los valores de S_0 para los productos alimenticios están dentro del rango de 100 – 250 $\left[\frac{m^2}{g} \right]$. Dichos valores están presentes en muchos biopolímeros debido a la existencia de una estructura microporosa intrínseca. La cantidad y el tamaño de los poros en la matriz de los carbohidratos determinan el área y las propiedades de la superficie así como la velocidad y el grado de hidratación.

6.3.1. Radio del poro

El radio de poro (r_p) del mucílago liofilizado de la semilla de chía se determinó con base al modelo teórico de G.A.B. (ecuación 6) y utilizando la herramienta *Solver* en la hoja de cálculo de Microsoft Excel (2013). Con ello, se obtuvo la actividad acuosa para diferentes valores específicos de contenido de humedad en el equilibrio (tabla 20).

Tabla 20: Actividad acuosa para diferentes valores específicos de contenido de humedad en el equilibrio a 25°C, 35°C y 40°C

$M \left[\frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.} \right]$	Actividad acuosa (a_w)		
	25°C	35°C	40°C
1	0.031	0.035	0.044
2.5	0.087	0.109	0.144
5.0	0.204	0.275	0.358
7.5	0.333	0.435	0.520
10	0.452	0.554	0.622
12.5	0.550	0.637	0.689
15.0	0.627	0.697	0.736
17.5	0.688	0.741	0.770
20.0	0.738	0.776	0.797
22.5	0.778	0.803	0.817
25.0	0.811	0.826	0.834
27.5	0.839	0.844	0.848
30.0	0.862	0.860	0.859

Finalmente, con los datos de la tabla 43 y las ecuaciones 14, 15 y 16 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 21: Radio del poro del mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C, 35°C y 40°C

$M \left[\frac{Kg H2O}{100 Kg s.s.} \right]$	Radio del poro (nm)		
	25°C	35°C	40°C
1	0.70	0.070	0.72
2.5	0.88	0.91	0.98
5.0	1.18	1.32	1.53
7.5	1.54	1.83	2.16
10	1.97	2.39	2.79
12.5	2.47	2.97	3.41
15.0	3.02	3.58	4.02
17.5	3.64	4.19	4.61
20.0	4.34	4.84	5.21
22.5	5.12	5.50	5.77
25.0	6.01	6.21	6.34
27.5	7.04	6.90	6.91
30.0	8.18	7.67	7.43

La importancia de conocer el radio del poro radica en que las características de los procesos de transporte y adsorción en el interior, están fuertemente influenciadas por su tamaño. De acuerdo a los valores de la tabla 21, la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) clasifica los poros obtenidos de acuerdo a su dimensión transversal (w) en microporos y mesoporos (tabla 44). Los límites de distinción entre los distintos tipos de poros son sólo aproximados ya que las propiedades que presentan en el proceso de adsorción son dependientes de su geometría y de las características de la molécula que se adsorbe (López, 2004). La relación encontrada a partir de los datos esta en función del aumento de la temperatura y el contenido de humedad en el equilibrio, a medida que estas dos variables lo hacen también lo hace el radio del poro. Los mecanismos de difusión dependen de las propiedades dentro de la estructura local de la matriz porosa. En los microporos, la difusión está dominada por las interacciones entre las moléculas de agua y las paredes de los poros, es decir, los efectos estéricos y asociados con la proximidad de las paredes se vuelven importantes y las barreras controlan el proceso. En los mesoporos, las fuerzas de la superficie y las fuerzas capilares cobran importancia, mientras que para los macroporos las características de los poros aportan muy poco a la capacidad de adsorción (Velázquez-Gutiérrez *et al.*, 2015).

7. Conclusiones

- Las isothermas de adsorción construidas a partir de los datos experimentales presentan una forma sigmoïdal de tipo II en el intervalo de temperatura estudiado.
- El modelo teórico de G.A.B. resultó ser la aplicación más satisfactoria para el ajuste matemático por regresión no lineal en comparación del modelo de B.E.T., a pesar de ello, los parámetros intrínsecos de ambos representan un significado físico en el proceso de adsorción.
- Los modelos empíricos de Oswin y Henderson son adecuados para el ajuste experimental, mientras que los modelos semiempíricos de Lewicki (dos parámetros) y Halsey tienden a una menor correlación. Los parámetros matemáticos son una variable de aproximación y no representan un significado físico, sin embargo, plantean la posibilidad de dar sentido y explicación al estudio del fenómeno de adsorción en los alimentos.
- Las condiciones de estabilidad del mucílago liofilizado de la semilla de chíá se establecen con base al valor del contenido de humedad en la monocapa (M_0) y la actividad acuosa (a_w), dichos valores se encuentran en un intervalo de $[7.929 - 4.048] \frac{Kg H_2O}{100 Kg s.s.}$ y $[0.355 - 0.278] \frac{p}{p_0}$ entre 25°C y 40°C, respectivamente.
- La disminución del área específica de adsorción revela que las energías de unión asociadas en la monocapa y multicapa disminuyen al aumentar la temperatura. La dimensión transversal de los microporos y mesoporos determinan la capacidad de difusión y control de los procesos asociados a la adsorción física y química, es decir, a partir de las características del medio poroso se definen y afectan todas a las propiedades del mucílago liofilizado de la semilla de chíá.

8. Glosario

- **Ácido α -linolénico:** es un ácido graso poliinsaturado esencial de la serie omega-3. Es un componente de muchos aceites vegetales comunes y es importante para la nutrición humana; llamados así porque no se pueden producir dentro del organismo y deben ser adquiridos a través de la dieta.
- **Ácido galacturónico:** monosacárido de 6 átomos de carbono correspondiente a la forma oxidada de la galactosa, por lo que también pertenece al grupo de los azúcares (monosacáridos) ácidos. Es el principal componente de las pectinas.
- **Ácido glucorónico:** es un ácido carboxílico que pertenece al grupo de los azúcares (monosacáridos) ácidos, similar a la glucosa pero que presenta un grupo carboxilo en el carbono 6.
- **Ácido graso:** es una biomolécula de naturaleza lipídica formada por una larga cadena de hidrocarburos de diferente longitud o número de átomos, en cuyo extremo hay un grupo carboxilo.
- **Ácido graso poliinsaturados (PUFAs: Poly - Unsaturated Fatty Acids):** ácidos grasos que poseen más de un doble enlace entre sus carbonos. Dentro de este grupo encontramos el ácido linolénico (omega 3 y el omega 6) que es esencial para el ser humano. Tienen un efecto beneficioso en general, disminuyendo el colesterol total.
- **Ácido graso saturado (SFA: Saturated Fatty Acids):** son ácidos carboxílicos de cadena larga sin dobles enlaces entre sus átomos de carbono. Se encuentran presentes en los lípidos. Son generalmente de cadena lineal y tienen un número par de átomos de carbono.
- **Ácido urónico:** se deriva a partir de un monosacárido por oxidación en el carbono 6 (glucosa), mediante la conversión de un alcohol primario en un carboxilo.
- **Adsorbato:** sustancia que se pega (adsorbe) en la superficie.
- **Adsorbente:** superficie sobre la que sucede la adsorción.
- **Amilopectina:** polisacárido que se diferencia de la amilosa en que contiene ramificaciones que le dan una forma molecular parecida a la de un árbol.
- **Aldosa:** monosacárido (carbohidrato simple) cuya molécula contiene un grupo aldehído, es decir, un carbonilo en el extremo de la misma.

- **Alginato:** es un polisacárido aniónico presente ampliamente en las paredes celulares de las algas marinas pardas. También es producido por algunas especies bacterianas.
- **Arabinosa:** también llamada azúcar árabe, por su gran concentración en la goma arábiga, es un monosacárido de cinco carbonos con un grupo aldehído por lo que pertenece al grupo de las aldosas.
- **Azúcares ácidos:** son aquellos monosacáridos en los cuales algún o varios de sus radicales hidroxilo (-OH) han sido oxidados para dar lugar a un grupo carboxilo.
- **Carragenano:** es una mezcla de varios polisacáridos formados por derivados de la galactosa, se encuentra en la estructura de las paredes celulares de algunas algas.
- **Coalescencia:** posibilidad de que dos o más materiales se unan en un único cuerpo.
- **Contenido de aire (overrun):** se refiere al aumento de volumen del helado efectuado durante el batido.
- **Contenido de humedad en base seca:** compara la masa de agua que contiene un material sólido con su masa seca. Un valor de 200% significa que la masa de agua presente en el material es dos veces su masa seca.
- **Desorción:** es la liberación de una sustancia de otra, ya sea desde la superficie o a través de la superficie. La desorción puede ocurrir cuando se altera una situación de equilibrio.
- **Enlace glucosídico:** es aquel mediante el cual un carbohidrato se enlaza con otra molécula, sea o no un carbohidrato.
- **Entalpía de vaporización:** es la cantidad de energía necesaria para que una unidad de masa (kilogramo, mol, etc.) de una sustancia que se encuentre en equilibrio con su propio vapor a una presión de una atmósfera pase completamente del estado líquido al estado gaseoso.
- **Floculación:** es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.
- **Fucosa:** es un monosacárido de seis carbonos con un grupo aldehído por lo que pertenece al grupo de las aldosas. Se puede encontrar en la superficie de las células de mamíferos, insectos y plantas, siendo la subunidad fundamental del polisacárido de fucoidina.

- **Fuerzas de Van der Waals:** son las fuerzas atractivas y/o repulsivas entre moléculas distintas a aquellas debidas a un enlace intermolecular (iónico, metálico y covalente de tipo reticular) o a la interacción electrostática de iones con moléculas neutras.
- **Fuerza centrífuga relativa o fuerza g (RCF):** es la cantidad de aceleración que se aplicará a la muestra en una centrífuga.
- **Galactosa:** es un azúcar simple o monosacárido formado por seis átomos de carbono.
- **Glúcido (carbohidrato):** biomoléculas compuestas de carbono, hidrógeno y oxígeno, cuyas principales funciones en los seres vivos son el brindar energía inmediata y estructural.
- **Glúcica:** monosacárido con 6 átomos de carbono, y es una aldosa, esto es, el grupo carbonilo está en el extremo de la molécula (grupo aldehído).
- **Hemicelulosa:** son heteropolisacáridos (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero), formado por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formados por un solo tipo de monosacáridos (fundamentalmente xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa y ácido glucurónico) , que forman una cadena lineal ramificada.
- **Histéresis:** el fenómeno de histéresis se manifiesta cuando la isoterma de adsorción no coincide con la isoterma de desorción. Esto se debe a la presencia de microporos en la superficie, que provoca condensación capilar del adsorbato y entonces, la desorción se lleva a cabo bajo la presión del líquido puro.
- **Humedad de equilibrio:** se define como el contenido de humedad de un material higroscópico después de estar expuesto a un ambiente en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, durante un lapso prolongado.
- **Humedad del aire:** es la cantidad de vapor de agua presente en el aire, se puede expresar de forma absoluta mediante la humedad absoluta, o de forma relativa mediante la humedad relativa.
- **Humedad relativa:** es la cantidad de agua en el aire en forma de vapor, comparándolo con la cantidad máxima de agua que puede ser mantenida a una temperatura dada.
- **Liofilización:** es un proceso de deshidratación usado generalmente para conservar un alimento perecedero o hacer el material más conveniente para transportarlo. Funciona congelando el material y luego reduciendo la presión circundante para permitir que el agua congelada en el material se sublime directamente desde la fase sólida a la fase

gaseosa, sin pasar por el estado líquido. Para acelerar el proceso se utilizan ciclos de congelación-sublimación con los que se consigue eliminar prácticamente la totalidad del agua libre contenida en el producto original, pero preservando la estructura molecular de la sustancia liofilizada.

- **Monosacárido (azúcares simples):** son los glúcidos más sencillos, no se hidrolizan, es decir, no se descomponen en otros compuestos más simples. Poseen de tres a siete átomos de carbono.
- **Monómero:** es una molécula de pequeña masa molecular que está unida a otros monómeros, a veces cientos o miles, por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, formando macromoléculas llamadas polímeros.
- **Pectina:** mezcla de polímeros ácidos y neutros ramificados. Son el principal componente de la pared celular; en presencia de agua forman geles. Poseen tres dominios principales: homogalacturonanos, ramnogalacturonano I y ramnogalacturonano II.
- **Polímero:** son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades simples llamadas monómeros. Estos forman largas cadenas que se unen entre sí por fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno o interacciones hidrofóbicas.
- **Polisacárido:** son polímeros cuyos constituyentes (monómeros) son monosacáridos, los cuales se unen repetitivamente mediante enlaces glucosídicos.
- **Puente de hidrógeno:** es la fuerza electrostática atractiva entre un átomo electronegativo y un átomo de hidrógeno unido covalentemente a otro átomo electronegativo. Resulta de la formación de una fuerza carga-dipolo con un átomo de hidrógeno unido a un átomo de nitrógeno, oxígeno o flúor.
- **Ramnosa:** monosacárido de seis carbonos que pertenece al grupo de las metilpentosas y de las desoxihexosas. Su nombre proviene de la planta de la cual se aisló por primera vez, la especie *Rhamnus frangula*.
- **Sinéresis:** es la separación de las fases que componen una suspensión o mezcla; extracción o expulsión de un líquido de un gel, por lo que el gel pasa de ser una sustancia homogénea a una segregación de componentes sólidos separados y contenidos en la fase líquida.
- **Sorción:** abarca tres tipos de fenómenos: la adsorción sobre las superficies, la absorción dentro del sólido y la condensación capilar que ocurre en el interior de los poros.

- ***Tensión superficial:*** la superficie de cualquier líquido se comporta como si sobre esta existe una membrana a tensión; es causada por los efectos de las fuerzas intermoleculares que existen en la interfase. Está asociada a la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área.
- ***Xilosa:*** también llamada azúcar de madera es una aldopentosa; un monosacárido que contiene cinco átomos de carbono y que contiene un grupo funcional aldehído que tiene un isómero funcional que es la xilulosa.

9. Referencias

- [1] Angioloni, A. (2013). “Los hidrocoloides, aditivos de alta funcionalidad”, *La Revista de la tecnología alimentaria*, 19 (1), 97-99.
- [2] Alejo, A. y Custodio, P. (2010). “Microencapsulamiento de Ácido Linolénico (Omega 3) extraído a partir de semilla de chía (*Salvia hispanica*)”, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México.
- [3] Al-Muhtaseb, A., McMin, A. y Magee, T. (2002). “Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review ”, Queen’s University Belfast Northern Ireland, UK.
- [4] Alpizar, E., Carrillo, H., Romero, R., Varela, V., Alvarez, J. y Pérez, A. (2017). “Thermodynamic sorption properties and glass transition temperature of tamarind seed mucilage (*Tamarindus indica* L.)”, *Food and Bioproducts Processing*, 101, 166-176.
- [5] Alpizar, E. y Villavicencio, F. (2013). “Efecto de la actividad de agua y temperatura de transición vítrea en la estabilidad de microcápsulas de jugo de betabel (*Beta vulgaris* L.)”, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- [6] Arce, P. (2017). *Ojo con la chía!*. Recuperado de: <https://www.elnuevodiario.com.ni/blogs/articulo/1735-ojo-chia/> (consultado el 20 de Julio del 2019).
- [7] Busilacchi, H., Qüesta, T y Zuliani, S. (2015). “La chía como una nueva alternativa productiva para la región pampeana”, *Agromensajes*, 41 (2), 37-46.
- [8] Calderon, A., Chavez, E., Montalvo, C., Arroyo, R., Monterrosas, M., Jiménez, T. y Tapia, A. (2013). “Characterization of black chia seed (*Salvia hispanica* L.) and oil and quantification of B-sitosterol”, *International Research Journal of Biological Sciences*, 2 (1), 70-72.
- [9] Capitani, M., Ixtania, V., Nolasco, S. y Tomás, M. (2013). “Microstructure, chemical composition and mucilage exudation of chia (*Salvia hispanica* L.) nutlets

- from Argentina ”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(15), 3856-386.
- [10] Chang,R. y College, W. (2002).“Química ”. Recuperado de: <https://clea.edu.mx/biblioteca/Quimica%20General%20-%207ma%20Edicion%20-%20Raymond%20Chang.pdf>
- [11] Çengel, Y. y Ghajar A. (2011).“Transferencia de calor y masa ”. Recuperado de: https://www.academia.edu/22123569_TransferenciadeCaloryMasa.Cengel4Ed.pdf
- [12] FAO/WHO. (2016).“Report joint FAO/WHO food standards programme”, *Codex alimentarius commission*, 39, 80.
- [13] Ferrari, M., Wahanik, A., Gomes, C., Pedrosa, M., Chang, Y. y Joy, C. (2015).“Use of chia (*Salvia hispanica* L) mucilage gel to reduce fat in pound cakes ”, *Food Science and Technology*, 30, 1-7.
- [14] Guiotto, E., Ixtania, V., Nolasco, S., y Tomás, M. (2013).“Moisture-dependent engineering properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds ”, *Food Industry Intech*, 17, 381-397.
- [15] Labuza,P. (1968).“Sorption phenomena in foods ”, *Food Technology*, 22 (3), 263-272.
- [16] Labuza,P., Kaanane, A. y Chen, J. (1985).“Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods ”, *Journal of Food Science*, 50, 385–391.
- [17] Lang, K., McCune, T. y Steinberg, M. (1981).“A proximity equilibration cell for rapid determination of sorption isotherms ”, *Journal of Food Science*, 46, 936–938.
- [18] Lin, K., Daniel, J. y Whistler,R.(1994).“Structure of chia seed polysaccharide exudate ”, *Carbohydrate Polymers*, 23 (1), 13-18.
- [19] López, R. (2004).“Caracterización de Medios Porosos y Procesos Percolativos y de Transporte”, Universidad Nacional de San Luis, Argentina.
- [20] Martinelli, L., Gabas, A. L. y Telis-Romero, J. (2007).“Thermodynamic and quality properties of lemon juice powder as affected by maltodextrin and Arabic gum ”, *Drying Technology*, 25 (12), 2035-2045.

- [21] Moraes, M., Gabriela, S. y Luiz, A. (2008). "Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of apple Fuji and garlic ", *International Journal of Food Science and Technology*, 43, 1824-1831.
- [22] Muñoz, L., Cobos, A. y Aguilera, J. (2011). "Chia seeds: microstructure, mucilage extraction and hydration", *Journal of Food Engineering*, 108 (2012), 216-224.
- [23] Pahlevanzadeh, H. y Yazdani, M.(2004). "Moisture adsorption isotherms and isosteric energy for almond ", Chemical Engineering Department Tarbiat Modarres University (TMU), Teherán.
- [24] Pasquel, A. (2001). "Gomas: Una aproximación a la industria de alimentos ", *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria*, 1 (1), 1-8.
- [25] Pérez-Alonso, C., Beristain, C., Lobato-Calleros, C., Rodríguez, M. y Vernon-Carter, E. (2006). "Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers ", *Journal of Food Engineering*, 77, 753-760.
- [26] Ramamoorthy, T.(2001). "Salvia hispanica L. In: flora fanerogámica del Valle de México ", *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, Instituto de Ecología, Pátzcuaro, Michoacán, 632-644.
- [27] Ramírez, M., Cruz, M., Vizcarra, M. y Anaya, I. (2014). "Determinación de las isoterms de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz nixtamalizada ", *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13 (1), 165-178.
- [28] Sargi, S., Silva, B., Santos, H., Montanher, P., Boeing, J., Santos, O., Souza, N. y Visentainer, J. (2013). "Antioxidant capacity and chemical composition in seeds rich in omega-3: chia, flax, and perilla ", *Food Science and Technology (Campinas)*, 33 (3), 541-548.
- [29] Sargi, S., Silva, B., Santos, H., Montanher, P., Boeing, J., Santos, O., Souza, N. y Visentainer, J. (2013). "Antioxidant capacity and chemical composition in seeds rich in omega-3: chia, flax, and perilla ", *Food Science and Technology (Campinas)*, 33 (3), 541-548.
- [30] Shacham, M., Cutlip, M. y Elly, M. (2004). Polymath. (6.0). [Software]. Recuperado de: <http://www.polymath-software.com>

- [31] SIAP. (2019). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Recuperado de: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricolapor-estado> (consultado el 10 de Julio del 2019).
- [32] Soukoulis, C., Gaiani, C. y Hoffmann, L. (2018). "Plant seed mucilage as emerging biopolymer in food industry applications ", *Food Science*, 1, 28-42.
- [33] Velázquez-Gutiérrez, S., Figueira, A., Rodríguez-Huezo, M., Román, A., Carrillo-Navas, H. y Pérez-Alonso, C (2015). "Sorption isotherms, thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (*Salvia hispanica* L.) ", *Carbohydrate Polymers*, 121, 411-419.
- [34] Viades, J. (2013). *Fenómenos de superficie. Adsorción*, disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Adsorcion23226.pdf> (consultado el 19 de Julio del 2019).
- [35] Xingú, A., González, A., De la Cruz, E., Sangerman, D., Orozco, G. y Rubí, M. (2017). "Chía (*Salvia hispanica* L.) situación actual y tendencias futuras ", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8 (7), 1619-1631.

10. Anexos

10.1. Anexo I: datos experimentales de las isothermas de adsorción para el mucílago de la chía liofilizado a 25°C, 35°C y 40°C

Tabla 22: Datos experimentales de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C

Temperatura: 25°C	
a_w (<i>experimental</i>)	M (<i>experimental</i>)
0	0
0.114	3.2532
0.237	5.9937
0.328	7.3927
0.443	9.3489
0.535	11.5894
0.698	18.4589
0.761	21.6557
0.854	28.9565

Tabla 23: Datos experimentales de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 35°C

Temperatura: 25°C	
a_w (<i>experimental</i>)	M (<i>experimental</i>)
0	0
0.108	2.497
0.255	4.731
0.318	5.595
0.456	7.656
0.515	9.329
0.666	13.723
0.743	17.480
0.821	24.475

Tabla 24: Datos experimentales de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 40°C

Temperatura: 40°C	
a_w (<i>experimental</i>)	M (<i>experimental</i>)
0	0
0.105	1.851
0.206	3.101
0.313	4.455
0.433	6.283
0.506	7.513
0.651	10.759
0.734	14.665
0.805	21.120

10.2. Anexo II: datos ajustados de las isothermas de adsorción con los modelos matemáticos para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C, 35°C y 40°C

Modelo teórico de B.E.T.

Tabla 25: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C. Modelo de B.E.T.

a_w (<i>experimental</i>)	M (<i>experimental</i>)	M (<i>teórico</i>)	% <i>Error</i>
0	0	0	0.00
0.114	3.253	4.732	31.26
0.237	5.993	5.867	2.16
0.328	7.392	6.792	8.84
0.443	9.348	8.289	12.78
0.535	11.589	10.003	15.85
0.698	18.458	15.502	19.07
0.761	21.655	19.656	10.17
0.854	28.956	32.288	10.32
			Promedio: 13.81

Tabla 26: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 35°C. Modelo de B.E.T.

$a_w(experimental)$	$M(experimental)$	$M(teórico)$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.108	2.497	2.909	14.16
0.255	4.731	4.844	2.33
0.318	5.595	5.602	0.13
0.456	7.656	7.586	0.91
0.515	9.329	8.694	7.30
0.666	13.723	13.131	4.51
0.743	17.480	17.270	1.22
0.821	24.475	25.099	2.49
			Promedio: 4.13

Tabla 27: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 40°C. Modelo de B.E.T.

$a_w(experimental)$	$M(experimental)$	$M(teórico)$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.105	1.851	1.895	2.31
0.206	3.101	3.173	2.28
0.313	4.455	4.441	0.32
0.433	6.283	6.061	3.68
0.506	7.513	7.304	2.86
0.651	10.759	11.079	2.89
0.734	14.665	14.956	1.95
0.805	21.120	20.867	1.21
			Promedio: 2.18

Modelo teórico de G.A.B.

Tabla 28: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C. Modelo de G.A.B.

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.114	3.253	3.122	4.19
0.237	5.993	5.632	6.42
0.328	7.392	7.405	0.17
0.443	9.348	9.795	4.56
0.535	11.589	12.106	4.27
0.698	18.458	17.964	2.75
0.761	21.655	21.441	1.00
0.854	28.956	29.135	0.61
			Promedio: 2.99

Tabla 29: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 35°C. Modelo de G.A.B.

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.108	2.497	2.482	0.60
0.255	4.731	4.721	0.21
0.318	5.595	5.516	0.38
0.456	7.656	7.876	2.79
0.515	9.329	9.085	2.69
0.666	13.723	13.652	0.52
0.743	17.480	17.607	0.72
0.821	24.475	24.441	0.14
			Promedio: 1.00

Tabla 30: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 40°C. Modelo de G.A.B.

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.105	1.851	1.982	6.61
0.206	3.101	3.230	3.99
0.313	4.455	4.448	0.16
0.433	6.283	6.011	4.53
0.506	7.513	7.223	4.02
0.651	10.759	10.959	1.83
0.734	14.665	14.880	1.44
0.805	21.120	21.011	0.52
			Promedio: 2.88

Modelo semiempírico de Lewicki (2 parámetros)

Tabla 31: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C. Modelo de Lewicki (2 parámetros)

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.114	3.253	2.395	35.79
0.237	5.993	4.278	40.076
0.328	7.392	5.786	27.755
0.443	9.348	7.977	17.189
0.535	11.589	10.198	13.640
0.698	18.458	16.156	14.250
0.761	21.655	19.992	8.321
0.854	28.956	29.900	3.157
			Promedio: 20.02

Tabla 32: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 35°C. Modelo de Lewicki (2 parámetros)

$a_w(experimental)$	$M(experimental)$	$M(teórico)$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.108	2.497	1.357	83.99
0.255	4.731	3.111	52.056
0.318	5.595	3.971	40.88
0.456	7.656	6.344	20.67
0.515	9.329	7.662	21.75
0.666	13.723	12.672	8.29
0.743	17.480	17.001	2.82
0.821	24.475	24.572	0.40
			Promedio: 28.86

Tabla 33: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 40°C. Modelo de Lewicki (2 parámetros)

$a_w(experimental)$	$M(experimental)$	$M(teórico)$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.105	1.851	0.876	111.17
0.206	3.101	1.772	75.00
0.313	4.455	2.926	52.22
0.433	6.283	4.635	35.56
0.506	7.513	6.021	24.784
0.651	10.759	10.280	4.66
0.734	14.665	14.574	0.626
0.805	21.120	20.920	0.955
			Promedio: 38.12

Modelo semiempírico de Halsey

Tabla 34: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C. Modelo de Halsey

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.114	3.253	2.447	32.92
0.237	5.993	3.685	62.63
0.328	7.392	4.773	54.88
0.443	9.348	6.526	43.25
0.535	11.589	8.510	36.17
0.698	18.458	14.794	24.770
0.761	21.655	19.509	11.00
0.854	28.956	33.799	14.328
			Promedio: 34.99

Tabla 35: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 35°C. Modelo de Halsey

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.108	2.497	2.316	7.82
0.255	4.731	3.776	25.28
0.318	5.595	4.497	24.42
0.456	7.656	6.566	16.59
0.515	9.329	7.773	20.02
0.666	13.723	12.704	8.02
0.743	17.480	17.344	0.78
0.821	24.475	26.140	6.37
			Promedio: 13.66

Tabla 36: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 40°C. Modelo de Halsey

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.105	1.851	2.056	9.98
0.206	3.101	2.929	5.87
0.313	4.455	3.984	11.81
0.433	6.283	5.528	13.67
0.506	7.513	6.792	10.62
0.651	10.759	10.787	0.26
0.734	14.665	14.975	2.07
0.805	21.120	21.404	1.33
			Promedio: 6.95

Modelo empírico de Oswin

Tabla 37: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C. Modelo de Oswin

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.114	3.253	3.589	9.36
0.237	5.993	5.823	2.92
0.328	7.392	7.491	1.33
0.443	9.348	9.793	4.54
0.535	11.589	12.021	3.59
0.698	18.458	17.648	4.60
0.761	21.655	21.080	2.73
0.854	28.956	29.496	1.83
			Promedio: 3.86

Tabla 38: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 35°C. Modelo de Oswin

$a_w(experimental)$	$M(experimental)$	$M(teórico)$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.108	2.497	2.225	12.19
0.255	4.731	4.406	7.38
0.318	5.595	5.386	3.88
0.456	7.656	7.919	3.33
0.515	9.329	9.250	0.85
0.666	13.723	13.995	1.95
0.743	17.480	17.825	1.93
0.821	24.475	24.137	1.40
			Promedio: 4.11

Tabla 39: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 40°C. Modelo de Oswin

$a_w(experimental)$	$M(experimental)$	$M(teórico)$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.105	1.851	1.554	19.06
0.206	3.101	2.755	12.57
0.313	4.455	4.142	7.55
0.433	6.283	6.019	4.40
0.506	7.513	7.445	0.92
0.651	10.759	11.500	6.44
0.734	14.665	15.272	3.97
0.805	21.120	20.487	3.09
			Promedio: 7.25

Modelo empírico de Henderson

Tabla 40: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 25°C. Modelo de Henderson

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.114	3.589	2.433	33.67
0.237	5.823	4.958	20.89
0.328	7.491	7.005	5.53
0.443	9.793	9.860	5.19
0.535	11.589	12.540	7.58
0.698	18.458	18.636	0.95
0.761	21.655	21.857	0.93
0.854	28.956	28.433	1.83
			Promedio: 9.57

Tabla 41: Datos ajustados de las isothermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 35°C. Modelo de Henderson

$a_w(\text{experimental})$	$M(\text{experimental})$	$M(\text{teórico})$	$\%Error$
0	0	0	0.00
0.108	2.497	1.432	74.29
0.255	4.731	3.800	24.50
0.318	5.595	4.966	12.66
0.456	7.656	8.016	4.49
0.515	9.329	9.578	2.60
0.666	13.723	14.702	6.66
0.743	17.480	18.300	4.48
0.821	24.475	23.341	4.86
			Promedio: 16.82

Tabla 42: Datos ajustados de las isotermas de adsorción para el mucílago liofilizado de la semilla de chía a 40°C. Modelo de Henderson

$a_w(experimental)$	$M(experimental)$	$M(teórico)$	%Error
0	0	0	0.00
0.105	1.851	0.970	90.71
0.206	3.101	2.198	41.06
0.313	4.455	3.797	17.32
0.433	6.283	6.033	4.14
0.506	7.513	7.701	2.44
0.651	10.759	12.080	10.94
0.734	14.665	15.630	6.17
0.805	21.120	19.827	6.52
			Promedio: 22.41

10.3. Anexo III: densidad, tensión superficial y volumen molar del agua a 25°C, 35°C y 40°C

Tabla 43: Densidad, tensión superficial y volumen molar del agua a 25°C, 35°C y 40°C

Temperatura	Densidad [$\frac{g}{cm^3}$]	Tensión superficial [$\frac{N}{m}$]	Volumen molar [$\frac{m^3}{mol}$]
25	0.997	0.0717	1.8054×10^{-5}
35	0.994	0.0697	1.8108×10^{-5}
40	0.992	0.0686	1.8145×10^{-5}

*Fuente: Çengel *et al.*, (2011) y Velázquez, *et al.*, (2015)

10.4. Anexo III: clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal (w)

Tabla 44: Clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal (w)

Clasificación	Dimensión transversal (w)
Microporo	Menor a 0.20 nm
Mesoporo	Entre 0.20 nm y 50 nm
Macroporo	Mayor a 50 nm

*Fuente: López, 2004.