



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“Evaluación de diferentes modelos matemáticos
en el proceso de adsorción de humedad en
hidrogeles de aceite de ajonjolí.”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

VALERIA AZUCENA GONZÁLEZ GRANADOS

ASESOR ACADÉMICO:

DR. CÉSAR PÉREZ ALONSO

TOLUCA DE LERDO,

JUNIO 2026

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de México por financiar esta tesis mediante el proyecto con clave 7043/2024CIB, “Evaluación y efecto de microcápsulas de jugo de Averrhoa carambola (Fruto estrella) como colorante y saborizante natural en la producción de alimentos funcionales.”

ÍNDICE

	PÁG.
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	IX
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
1. ANTECEDENTES.....	4
1.1. ACEITES ESENCIALES.....	5
1.1.1. Aceite de ajonjolí.....	7
1.1.2. Beneficios a la salud del aceite de sésamo.....	12
1.2. TÉCNICAS DE ENCAPSULACIÓN.....	15
1.2.1. Emulsionamiento.....	19
1.2.2. Secado por aspersión.....	20
1.2.3. Extrusión.....	21
1.2.4. Liofilización.....	22
1.2.5. Coacervación.....	24
1.2.6. Lecho fluidizado.....	26
1.2.7. Gelación iónica.....	27
1.2.7.1. Mecanismos de gelación iónica.....	29
1.3. AGENTES ENCAPSULANTES.....	30
1.3.1. Lípidos.....	30
1.3.2. Carbohidratos.....	31

1.3.3. Almidón.....	31
1.3.4. Maltodextrinas.....	31
1.3.5. Gomas.....	31
1.3.6. Proteínas.....	31
1.3.7. Antioxidantes.....	32
1.3.8. Alginato de sodio.....	32
1.4. BIOPOLÍMEROS COMO MATERIAL DE PARED.....	33
1.4.1. Gomas vegetales.....	34
1.4.2. Carragenano.....	34
1.4.3. Quitosano.....	34
1.4.4. Celulosa.....	35
1.4.5. Pectina.....	35
1.4.6. Mucílago.....	35
1.4.6.1. Mucílago de nopal.....	35
1.5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	36
2. JUSTIFICACIÓN.....	39
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	42
4. OBJETIVOS.....	44
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	45
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	45
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	46
5.1. MATERIALES.....	47
5.2. MÉTODOS.....	47
5.2.1 Extracción del aceite de ajonjolí.....	47

5.2.2 Extracción del mucílago de nopal.....	47
5.2.3 Preparación de dispersiones e hidrogeles por gelación iónica.....	48
5.2.4 Obtención de las isothermas de adsorción de los hidrogeles.....	48
5.2.5 Modelos matemáticos empleados para ajustar los datos de las isothermas de adsorción.....	50
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 1. La planta de sésamo.....	9
Figura 2. Composición simplificada de una microcápsula de aceite.....	19
Figura 3. Orientación de las moléculas de tensioactivo en la superficie de una gota de aceite en una emulsión O/W y en una emulsión W/O.....	21
Figura 4. Diseño típico de un secador por aspersión.....	22
Figura 5. Diagrama del proceso por extrusión para la elaboración de saborizantes.....	23
Figura 6. Diagrama del método de encapsulación por liofilización (freeze-drying)	24
Figura 7. Ilustración esquemática de diversas morfologías formadas por microencapsulación: microcápsula monocapa y mononuclear (A), microcápsula multicapa y mononuclear (B), microcápsula multicapa y multinuclear (C), y micropartícula (D).....	26
Figura 8. Microencapsulación por lecho fluidizado. Tomado de Espinosa Andrews, H., Yunuen García Carvajal, Z., & García Márquez, E. (Eds.). (2017).	28
Figura 9. Diagrama representativo de gelación iónica externa (A) e interna (B).....	29
Figura 10. Técnica de gelificación iónica.....	30

Figura 11. Cinco tipos de isothermas de adsorción de van der Waals.....	37
Figura 12. Isotherma de sorción generalizada para productos alimenticios (Heldman & Lund, 1992).....	38
Figura 13. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de B.E.T.....	57
Figura 14. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 oC para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de B.E.T.....	58
Figura 16. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0). Modelo de G.A.B.....	60
Figura 17. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-NM y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 oC para la relación AS-NM (1:1) . Modelo de G.A.B.....	60
Figura 18. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de G.A.B.....	61
Figura 19. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de Lewicki.....	64
Figura 20. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de Lewicki.....	64
Figura 21. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de Lewicki.....	65
Figura 22. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de Halsey.....	66

Figura 23. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de Halsey..... 67

Figura 24. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de Halsey..... 67

Figura 25. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de Oswin..... 69

Figura 26. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de Oswin..... 69

Figura 27. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de Oswin..... 70

Figura 28. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de Henderson-Thompson..... 71

Figura 29. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de Henderson-Thompson..... 72

Figura 30. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de Henderson-Thompson..... 72

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁG.
Tabla 1. Actividad de agua de las soluciones saturadas de las sales a diferentes temperaturas.....	49
Tabla 2. Parámetros del modelo B.E.T. para las isothermas de adsorción AS MN.....	57
Tabla 3. Parámetros del modelo G.A.B. para las isothermas de adsorción AS-MN.....	59
Tabla 4. Parámetros del modelo Lewicki para las isothermas de adsorción AS-MN.....	63
Tabla 5. Parámetros del modelo Halsey para las isothermas de adsorción AS-MN..	66
Tabla 6. Parámetros del modelo Oswin para las isothermas de adsorción AS-MN..	68
Tabla 7. Parámetros del modelo Henderson-Thompson para las isothermas de adsorción AS-MN.....	71

RESUMEN

El objetivo de este trabajo se centró en analizar el proceso de adsorción de vapor de agua en tres tipos de perlas de hidrogel conteniendo aceite de ajonjolí (AA). Las perlas de hidrogel se formaron empleando la técnica de encapsulación de gelación iónica a partir de alginato de sodio (AS) y mezclas de alginato de sodio con mucílago de nopal (AS-MN). Para ello, se prepararon dispersiones acuosas de AS y MN al 2% (p/v), las cuales se mezclaron en tres proporciones en peso seco: 1:0, 1:1 y 1:1.5 (AS:MN). Una vez que los hidrogeles fueron obtenidos, se procedió a construir experimentalmente las isotermas de adsorción de estos sistemas acondicionados a 25, 35 y 45 °C, utilizando el método gravimétrico de celdas de equilibrio. Posteriormente, se emplearon seis modelos matemáticos para describir el fenómeno de adsorción: dos modelos teóricos (B.E.T, y G.A.B.), dos modelos semiempíricos (Lewicki y Halsey) y dos modelos empíricos (Henderson-Thompson y Oswin). El modelo de G.A.B. y el modelo de Henderson-Thompson resultaron ser los que mejor correlacionaron los datos experimentales presentando altos valores de $r^2 > 0.998$ y porcentajes de error (%E < 5%). Cabe resaltar que la expresión de Henderson-Thompson al ser un modelo empírico, presentó una compensación entre sus dos parámetros de ajuste para correlacionar adecuadamente los datos experimentales. Por otra parte, el modelo de G.A.B. permitió conocer que las moléculas de vapor de agua se adsorbieron en la superficie de los hidrogeles tanto en la monocapa como en las multicapas, siendo el sistema AS-MN (1:1.5) el que tuvo mayor capacidad de adsorción de humedad, esto se debe a que el MN tiene la propiedad intrínseca de retener agua dentro de su estructura. Estos resultados permiten conocer para cada sistema de hidrogel formulado en qué contenido de humedad equivalente al valor en la monocapa, las perlas son más estables a factores deteriorativos, los que contribuyen a la degradación del aceite de ajonjolí encapsulado.

INTRODUCCIÓN

Actualmente muchas personas se están informando más sobre temas de salud, nutrición y alimentación, y están optando por productos de origen natural debido a sus beneficios a la salud, como lo son las plantas, semillas, frutas, entre otros. Por esto, surge el interés de la industria alimentaria por buscar nuevas fuentes de insumos de origen natural pero que también sean convenientes, estables y que cumplan con ciertas características requeridas por el consumidor y de fácil manipulación. Para mantener dichas características, es importante tener bajo control condiciones de almacenamiento, para evitar procesos de deterioro, disminución del ciclo de vida y la pérdida de propiedades de los productos.

Dentro de los distintos insumos de origen natural, se encuentran los aceites esenciales insaturados, y de particular interés se encuentra el aceite de ajonjolí o sésamo (*Sesamum indicum* L.). Este alimento se encuentra entre los aceites comestibles más atractivos para su consumo a nivel mundial. Es uno de los aceites más saludables, con un 38,84 % de ácido oleico y un 46,26 % de ácido linoleico, que poseen altos niveles de ácidos grasos insaturados, lo que justifica su clasificación en el grupo de aceites que contienen ácido oleico-linoleico. El primero estabiliza los niveles de colesterol, mientras que el segundo permite reducirlos, así como el riesgo de enfermedades cardiovasculares (Oboulbiga et al., 2023).

Además, el aceite de ajonjolí contiene un alto contenido de ácidos grasos esenciales, tocoferoles, esteroides y tocotrienoles (Muangrat & Lertbuaban, 2025). Sin embargo, los ácidos grasos esenciales insaturados presentes en el aceite de sésamo presentan inestabilidad química ante el estrés ambiental (p. ej., luz, oxígeno y humedad). La oxidación del aceite de sésamo no solo disminuye su valor nutricional, sino que también puede generar productos tóxicos, así como un sabor y gusto desagradables (Velázquez-Gutiérrez et al., 2021). Uno de los métodos más conocidos para proteger estas propiedades de inestabilidad, es la encapsulación

mediante gelación iónica, la cual es una alternativa útil y viable para proteger compuestos de interés en productos alimentarios, farmacéuticos y cosméticos. La gelación iónica consiste en producir pequeñas gotas de solución a partir de la mezcla del material de recubrimiento y el compuesto que se desea encapsular. El material de recubrimiento comúnmente usado es el alginato de sodio, debido a que es un polímero de fácil acceso, baja viscosidad y alta reactividad con los iones calcio (Saqib et al., 2022).

Por otra parte, 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 la a_w es un factor clave para el crecimiento microbiano, producción de toxinas y resistencia al calor de los microorganismos, también juega un papel importante en la estabilidad química, física y en la calidad de los alimentos (Fikry et al., 2023).

Por lo anterior, el interés de este trabajo se centra en analizar el fenómeno de adsorción de humedad en hidrogeles de aceite de ajonjolí obtenidas mediante gelación iónica, empleando alginato de sodio y mucílago de nopal como agentes encapsulantes, y a partir de diferentes ajustes de modelos matemáticos de isotermas de adsorción, poder establecer condiciones de almacenamiento de los hidrogeles conteniendo aceite de ajonjolí.



ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES

1.1 ACEITES ESENCIALES

Los aceites esenciales son compuestos de naturaleza compleja formados por varias sustancias orgánicas volátiles, solubles en solventes orgánicos no polares (Nejatian et al., 2024; Bakkali et al., 2008). Los aceites esenciales generalmente son mezclas complejas de hasta más de 100 componentes que pueden ser:

- Compuestos alifáticos de bajo peso molecular (alcanos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres y ácidos),
- Monoterpenos,
- Sesquiterpenos y
- Fenilpropanos.

En su gran mayoría son de olor agradable, aunque existen algunos de olor relativamente desagradable (Tsitlakidou et al., 2023; Martínez, 2003). Los aceites esenciales se clasifican con base en diferentes criterios: consistencia, origen y naturaleza química de los componentes mayoritarios.

Martínez (2003) señala que de acuerdo con su consistencia los aceites esenciales se clasifican en esencias fluidas, bálsamos y oleorresinas. Por su origen los aceites esenciales se clasifican como naturales, artificiales y sintéticos. Los naturales se obtienen directamente de la planta y no sufren modificaciones físicas ni químicas posteriores. Los artificiales se obtienen a través de procesos de enriquecimiento de la misma esencia con uno o varios de sus componentes. Los aceites esenciales sintéticos como su nombre lo indica son los producidos por la combinación de sus componentes, los cuales son la mayoría de las veces producidos por procesos de síntesis química.

De acuerdo con el diccionario del Instituto Nacional de Cáncer de Estados Unidos (NCI), se define como aceite esencial al “Líquido con fragancia que se extrae de ciertas plantas mediante vapor o prensado. Los aceites esenciales contienen sustancias químicas naturales que le dan su "esencia" (olor y sabor específicos) a las plantas. Los aceites esenciales se emplean en los perfumes, los saborizantes de alimentos, los medicamentos y la aromaterapia.”

Características físicas (Nejatian et al., 2023; Kuklinski, 2000)

- Son líquidos a temperatura ambiente
- Son incoloros o ligeramente amarillos
- Algunos son inflamables
- Menos densos que el agua
- Lipófilos y solubles en disolventes orgánicos apolares (hexano, éter etílico)
- Solubles en alcoholes de alta graduación y en disolventes orgánicos habituales como cloroformo y alcohol de alta gradación
- Índices de refracción elevados
- Presentan actividad óptica, casi siempre dotados del poder rotatorio.
- Son liposolubles y muy poco solubles en agua
- Se oxidan con facilidad y polimerizan dando productos resinosos

Características químicas (García et al., 2010):

- Composición: Están formados principalmente por terpenoides volátiles formados por unidades de isopreno unidas en estructuras de 10 carbonos (monoterpenoides) y 15 carbonos (sesquiterpenoides). Las sustancias responsables del olor suelen poseer en su estructura química grupos funcionales característicos: aldehídos, cetonas, ésteres, etc.
- Grupos Funcionales: Los grupos funcionales en los aceites esenciales son alcoholes, aldehídos, alquenos, cetonas, ésteres, éteres, fenoles y polifenoles.

- Volatilidad: Son compuestos volátiles, (se evaporan fácilmente a temperatura ambiente).
- Solubilidad: En su mayoría insolubles en agua, pero fácilmente solubles en alcohol, éter y aceites vegetales y minerales.
- Actividad Biológica: En general, los aceites esenciales caracterizados por un alto nivel de compuestos fenólicos, como carvacrol, eugenol y timol, tienen importantes actividades antibacterianas. La estructura química de los aceites esenciales afecta su modo de acción con respecto a su actividad antibacteriana.
- Origen: Son producidos por las plantas como metabolitos secundarios: Flores, hojas, raíces, rizomas, semillas, frutas, madera y corteza.
- Extracción: Los aceites esenciales son muy inestables: volátiles, frágiles, y alterables con la luz. Para obtenerlos de la fuente natural se utilizan principalmente dos métodos:
 - Destilación en corriente de vapor (o por arrastre de vapor).
 - Extracción, que puede ser por presión en frío, entre otros.

1.1.1 ACEITE DE AJONJOLÍ

El ajonjolí, también conocido como sésamo (*Sesamum indicum* L.), es una semilla oleaginosa pequeña y plana, originaria de la India y África. Las semillas oleaginosas ocupan un lugar importante, junto con los cereales, en la nutrición humana y el comercio mundial. Sus productos derivados, en diferentes presentaciones comerciales, contribuyen al equilibrio alimentario en una proporción de aproximadamente 1/3, junto con los carbohidratos y las proteínas. Las semillas de sésamo, consideradas tanto especias como semillas oleaginosas, son una fuente equilibrada de aceite. Su contenido en aceite es superior (~ 50 %) al de la mayoría de las semillas oleaginosas conocidas (Oboulbiga et al., 2023).

Se cree que el sésamo (*Sesamum indicum* L.) es uno de los cultivos más antiguos cultivados por los humanos. Se registró por primera vez como cultivo en Babilonia y Asiria hace más de 4000 años. Sus semillas se utilizan como condimento y fuente de aceite. Los babilonios elaboraban vino y pasteles con semillas de sésamo, mientras que el aceite de sésamo se utilizaba con fines culinarios, medicinales y cosméticos. Los antiguos indios utilizaban el aceite de sésamo como aceite para encender velas, y las semillas de sésamo eran comunes en los ritos religiosos hindúes. Los chinos creían que las semillas de sésamo podían promover la salud y la longevidad (Hwang, 2020).



Figura 1. La planta de sésamo. De Bailey's Industrial Oil and Fat Products, Sixth Edition. (p. 537) por L.S. Hwang, 2005.

El aceite de semilla de sésamo (SSO, por sus siglas en inglés) se encuentra entre los aceites comestibles más caros y codiciados del mundo. Es uno de los aceites más saludables, con un 38,84 % de ácido oleico y un 46,26 % de ácido linoleico, que son altos niveles de ácidos grasos insaturados, lo que justifica la clasificación del SSO en el grupo de aceites con ácido oleico-linoleico. El primero estabiliza los niveles de colesterol, mientras que el segundo permite reducirlos, así como el riesgo de accidentes cardiovasculares (Song et al., 2025; Oboulbiga et al., 2023).

Las semillas de sésamo contienen altos niveles de grasa y proteínas. La composición química de las semillas de sésamo varía según la variedad, el origen, el color y el tamaño de la semilla. El contenido de grasa de las semillas de sésamo es de alrededor del 50%, mientras que el contenido de proteínas es de alrededor del 25% (Song et al., 2025; Hwang, 2020).

Producción de semillas de sésamo

El mercado del SSO ha crecido significativamente en los últimos años, y se prevé que esta tendencia continúe durante el período de pronóstico 2022-2032. Su consumo es amplio debido a sus múltiples beneficios para la salud. Según datos de 2019, existen diez grandes productores de SSO en el mundo. Estos países producen una gran cantidad de semillas de sésamo. Asia fue el mayor productor de aceite de sésamo en 2019, con una producción de 777,000 toneladas. África ocupa el segundo lugar con una producción de 179.000 toneladas, y Europa, América y Oceanía son el tercer, cuarto y quinto productores más importantes, con una producción de 36.91, 36.93 y 2.68 toneladas, respectivamente (Oboulbiga et al., 2023).

Contenido de aceite en la semilla de sésamo

Las semillas de sésamo se componen de un 50% de aceite y un 25% de proteína, y el resto son azúcares, humedad, fibra y minerales. La semilla de sésamo es una fuente rica de aceite comestible. Contiene más aceite que las principales semillas oleaginosas, como la soja, la colza, el girasol y el algodón. El contenido de aceite de la semilla de sésamo varía según la variedad; puede oscilar entre el 28 % y el 59 %. Las semillas silvestres contienen menos aceite (~30 %) que las cultivadas, ya que este es un criterio importante para la selección de semillas en la práctica agrícola. En general, la semilla cultivada contiene alrededor del 50 % de aceite, mientras que el color de la testa influye ligeramente en el contenido de aceite (Liu et al., 2025; Hwang, 2020).

El SSO se caracteriza por un buen equilibrio en ácido oleico-linoleico. La presencia de ácidos grasos poliinsaturados omega-3 y poliinsaturados omega-6 permite categorizar el SSO del aceite n-oleico/linoleico (40/44,1%). Contiene menos del 20% de ácidos grasos saturados, principalmente ácido palmítico (7,9–12%) y ácido esteárico (4,8–6,1%), mientras que los ácidos oleico y linoleico constituyen más del 80% de los ácidos grasos totales de este aceite. El SSO se caracteriza por un buen equilibrio en ácido oleico-linoleico. La presencia de ácidos grasos poliinsaturados omega-3 y poliinsaturados omega-6 permite categorizar el SSO del aceite n-oleico/linoleico (40/44,1%). Contiene menos del 20% de ácidos grasos saturados, principalmente ácido palmítico (7,9–12%) y ácido esteárico (4,8–6,1%), mientras que los ácidos oleico y linoleico constituyen más del 80% de los ácidos grasos totales de este aceite (Oboulbiga et al., 2023).

Lignanos

Los lignanos son un grupo de compuestos naturales que se definen como un producto de acoplamiento oxidativo del β -hidroxifenilpropano y se distribuyen ampliamente como compuestos menores en el reino vegetal. Aunque el SSO contiene casi un 85 % de ácidos grasos insaturados, se sabe que es altamente resistente a la rancidez oxidativa y puede almacenarse durante largos periodos. (Oboulbiga et al., 2023). La notable estabilidad del aceite de sésamo puede deberse a la presencia de componentes insaponificables únicos, como los lignanos y los tocoferoles (Abou-Gharbia et al., 2000).

En las semillas de sésamo existen dos tipos de compuestos lignanos: los lignanos solubles en aceite y los glicósidos de lignano solubles en agua. En las semillas de sésamo crudas, la sesamina y la sesamolina son los dos principales lignanos (Hwang, 2020).

Existen cuatro lignanos de sésamo comúnmente conocidos: sesamina, sesamol, sesaminol y sesamolina. Estos lignanos de sésamo son conocidos por sus diversas actividades y aplicaciones biológicas. La sesamina, un lignano furfurano, participa

en la eliminación de radicales libres y el metabolismo de lípidos y glucosa. El sesamol posee una alta actividad antioxidante, que implica la protección de la membrana contra la peroxidación lipídica. El sesaminol exhibe propiedades inhibitorias contra la peroxidación lipídica de la membrana y mejora la disponibilidad de tocoferoles de vitamina E mediante el aumento de las concentraciones en el hígado y el plasma. La sesamolina regula positivamente la tasa de oxidación de ácidos grasos peroxisomales y mitocondriales hepáticos, y tiene un efecto sinérgico con los insecticidas de piretro (Aslam et al., 2020).

Tocoferoles

Los tocoferoles (vitamina E) se refieren a un conjunto de moléculas que contienen un anillo de 2-metil-6-cromanol y una cadena de fitilo completamente saturada. La cadena carbonada existe en dos formas: una forma que comprende tres insaturaciones que caracterizan a los tocotrienoles y una forma totalmente saturada que caracteriza a los tocoferoles (Oboulbiga et al., 2023).

Las diferentes formas de tocoferoles (α , β , γ y δ) se distinguen entre sí por el número y la ubicación de los grupos metilo unidos al anillo de cromanol (Jiang et al., 2000). El SSO es conocido por su estabilidad oxidativa; una de las razones de esta estabilidad se atribuye a su contenido de tocoferoles que va de 33 mg/100 g a 101 mg/100 g según la Norma del Codex Alimentarius.

Jiang et al. (2000) mencionan que el SSO obtenido de semillas negras contiene menos tocoferoles que el obtenido de semillas marrones o blancas y concluyen que el γ -tocoferol, la forma más abundante en las semillas de sésamo, podría ser importante para la salud humana, en comparación con el α -tocoferol, la forma predominante de vitamina E en tejidos humanos y animales, y la principal forma de suplementos.

1.1.2 BENEFICIOS A LA SALUD DEL ACEITE DE SÉSAMO

Antioxidante

Los fitoesteroles, los tocoferoles (vitamina E) y los lignanos presentes en el SSO son potentes antioxidantes (Imran, et al., 2020). Estos compuestos neutralizan los radicales libres en el organismo para reducir el riesgo de desarrollar enfermedades crónicas. El SSO es una excelente fuente de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) y presenta propiedades cardioprotectoras. Presenta una buena estabilidad oxidativa gracias a su alto contenido en estos ácidos grasos. El SSO contiene de forma natural vitamina E, un antioxidante que protege las membranas celulares de la oxidación. Protege la piel de agresiones externas como la radiación UV. Los principios activos sesamina, sesamol, sesamol y sesaminol son otros antioxidantes naturales interesantes para la reconstitución celular. La presencia de estos dos componentes inusuales en el aceite, a saber, sesamina y sesamol, confiere al SSO un fuerte poder antioxidante, lo que le confiere una gran estabilidad a la oxidación (Muangrat & Lertbuaban, 2025; Oboulbiga et al., 2023).

Colesterol

El aceite de sésamo es muy beneficioso para la salud. Los ácidos grasos del SSO tienen un lugar esencial, y dos de ellos, el ácido linoleico y el ácido α -linolénico, son esenciales, ya que el ser humano no puede sintetizarlos; por lo tanto, es necesario incluirlos en la dieta en cantidades adecuadas. Estos dos ácidos grasos pertenecen a la clase de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) (Oboulbiga et al., 2023).

El SSO es cardiosaludable y delicioso gracias a su contenido en ácidos grasos. Según investigaciones realizadas sobre los efectos del SSO, podría reducir los niveles de colesterol malo gracias a su contenido en una amplia gama de AGPI, como el sesamol y la sesamina. Estos ácidos grasos mantienen el sistema cardiovascular fuerte y los niveles de colesterol LDL bajos, previniendo así la aterosclerosis. La sesamina es uno de los compuestos activos presentes en el SSO

y justifica las propiedades antinociceptivas y antiinflamatorias de este aceite (Henriques-Monteiro et al., 2014).

Azúcar en la sangre

El SSO puede ayudar a regular el azúcar en sangre. Un estudio en adultos diabéticos que consumían SSO mostró una disminución del azúcar en sangre en ayunas (azúcar en sangre después de una noche de sueño) y de la hemoglobina A1c (azúcar en sangre promedio durante los últimos dos a 3 meses) (Oboulbiga et al., 2023). Además, también un estudio realizado por Haidari et al. en diabéticos mostró que aquellos tratados con SSO tenían niveles de glucosa significativamente más bajos y niveles más altos de lipoproteínas de alta densidad que el grupo control diabético. Otros estudios han mostrado colesterol total, triglicéridos, azúcar en sangre en ayunas, resistencia a la insulina, inflamación y estrés oxidativo más bajos. Esto puede explicarse por la acción antioxidante de la vitamina E, así como por los lignanos y ácidos grasos insaturados contenidos en el SSO (Oboulbiga et al., 2023).

Salud cardíaca

El SSO tiene una proporción equilibrada de ácidos grasos omega-3, omega-6 y omega-9. Las investigaciones demostraron que una dieta que contiene estas grasas saludables reduce el riesgo de desarrollar enfermedades cardíacas. Algunos estudios demostraron que consumir SSO puede ayudar a reducir el colesterol LDL y los triglicéridos, que desempeñan un papel en la protección del corazón. La presencia de lecitina, a través de su papel como emulsionante, se opone al depósito de colesterol y grasas saturadas en las arterias (Oboulbiga et al., 2023).

Cáncer

El SSO contiene altos niveles de lecitina (2,85 a 3,57%), lo que convierte a las semillas de sésamo en una fuente alternativa de lecitina. (Mumeen et al., 2018). La lecitina es eficaz para reducir la esteatosis hepática en pacientes con

enfermedades relacionadas con la nutrición parenteral y constituye un tratamiento eficaz contra la dermatitis y la piel seca. El SSO contiene altos niveles de linoleato unido a triglicéridos, que inhibe selectivamente el desarrollo de melanomas. Se ha demostrado que inhibe el crecimiento del melanoma maligno in vitro y la proliferación de células de cáncer de colon humano (Muangrat & Lertbuaban, 2025; Oboulbiga et al., 2023).

En el cáncer de hígado, estudios han demostrado que la administración oral de SSO ejerce importantes efectos protectores contra el daño oxidativo y hepático inducido por la dietilnitrosamina (DEN), al aumentar los mecanismos de defensa antioxidante del hígado huésped (Mokh et al., 2019).

Problemas de memoria y enfermedad de Alzheimer

De acuerdo con Mohamed et al. (2021), en su estudio, el SSO alivia el deterioro de la memoria, el estrés oxidativo y la neurodegeneración en pacientes con Alzheimer. El efecto neuroprotector del SSO implica la modulación de diferentes mecanismos que actúan sobre el estrés oxidativo, la neuroinflamación y las funciones cognitivas. El consumo prolongado de sesaminol puede inhibir la acumulación de A β patógeno en el cerebro (Katayama et al., 2016).

Reducción de inflamación

Muchas culturas a nivel mundial han utilizado el SSO en la medicina tradicional como producto antiinflamatorio. La medicina tradicional taiwanesa lo ha utilizado para tratar dolor articular, dolor de muelas, cortes, raspaduras, calambres premenstruales, etc. Aunque se necesitan más estudios en humanos, algunos estudios in vitro sugieren que el SSO es eficaz para reducir los marcadores inflamatorios (Oboulbiga et al., 2023).

Una dieta rica en aceite de sésamo podría influir tanto en la progresión como en la regresión de las lesiones ateroscleróticas de manera positiva (Narasimhulu et al., 2015).

Prevención del daño solar

El SSO es un útil protector solar natural contra los rayos UV. Algunas investigaciones han demostrado que los antioxidantes del SSO pueden proteger la piel del daño UV. El SSO es resistente hasta al 30% de los rayos UV, mientras que otros aceites solo lo son al 20% (Korać et al., 2011).

En los tejidos hipodérmicos, este aceite neutraliza los radicales de oxígeno. Penetra rápidamente en la piel y entra en el torrente sanguíneo a través de los capilares. La investigación sobre este tema es limitada. Sin embargo, algunas fuentes afirman que el SSO puede ser un protector solar natural eficaz (Oboulbiga et al., 2023).

Mencionada la importancia y beneficios que tiene el aceite de ajonjolí para la salud, se debe tomar en cuenta la importancia de proteger estas propiedades de la inestabilidad. Como menciona Velázquez-Gutiérrez et al. (2021), los ácidos grasos esenciales insaturados presentes en el aceite de sésamo presentan inestabilidad química ante el estrés ambiental (p. ej., luz, oxígeno y humedad). La oxidación del aceite de sésamo no solo disminuye su valor nutricional, sino que también puede generar productos tóxicos, así como un sabor y un gusto desagradables. En este sentido, la encapsulación del aceite de sésamo puede utilizarse para protegerlo de los efectos adversos del medio ambiente y facilitar su manipulación, procesamiento y almacenamiento.

1.2 TÉCNICAS DE ENCAPSULACIÓN

La encapsulación es una técnica para entrapar una sustancia o una mezcla de materiales dentro de otro material. Inspirado en el modelo celular, el concepto de encapsulación se inventó para proteger materiales funcionales lábiles de condiciones indeseadas (Nejatian et al., 2024; Omer et al., 2021). También puede definirse como un proceso industrial en el cual una sustancia activa queda

entrampada dentro de otra sustancia conocida como material de pared. La sustancia encapsulada, puede denominarse núcleo, relleno, fase activa, interna o de carga útil. La sustancia que encapsula se suele denominar recubrimiento, membrana, cubierta, cápsula, material portador, fase externa o matriz (Onsaard et al., 2018; Nedovic et al., 2011).

El producto final se conoce como encapsulados denominados como nanocápsulas, microcápsulas o esferas dependiendo del orden de magnitud con el que hayan sido producidas. Las microesferas poseen una forma esférica característica y su intervalo de tamaño útil se encuentra entre 1 y 10 μm . Las microesferas de núcleo-capa pueden emplearse para encapsular y suministrar ingredientes alimentarios de valor añadido, como aromas y vitaminas (Omer et al., 2021).

En el área de alimentos, un sistema eficiente de encapsulación debe permitir la incorporación de esos compuestos en matrices alimenticias, proporcionando alta estabilidad fisicoquímica y mínimo impacto en las propiedades organolépticas del producto. La aplicación de este método proporciona ventajas como la mejora de la estabilidad oxidativa, reducción de la volatilidad de los compuestos aromáticos y la conservación frente a factores como oxígeno, humedad y luz (Ortiz-Romero et al., 2021).

Entre los materiales generalmente reconocidos como comestibles seguros y ampliamente utilizados como agentes encapsulantes en aplicaciones alimentarias se encuentran las biomacromoléculas, como proteínas, polisacáridos, lípidos y polímeros de carbohidratos. Los materiales de pared más comunes se pueden dividir en tres grupos principales:

1) Carbohidratos

- a) Carbohidratos de origen vegetal como maltodextrina, almidón, celulosa, goma arábiga, goma de mezquite, goma guar, galactomananos, ciclodextrina y pectina.

- b) Carbohidratos de origen marino como carragenina y alginato.
- c) Carbohidratos de origen microbiano o animal como xantano, gellan, dextrano y quitosano.

2) Proteínas

- a) Proteínas de origen vegetal como proteína de soja, proteína de guisante, proteína de cebada, zeína y gluten.
- b) Proteínas de origen animal como caseína, proteína de suero, gelatina.

3) Lípidos y ceras como grasa láctea, fosfolípidos, cera de abejas y cera de carnauba (Özbek et al., 2017).

La selección de materiales de pared adecuados depende de las propiedades del material del núcleo y de las cápsulas finales. Un material de pared óptimo debe tener las siguientes características:

- a) Ser apto para uso alimentario
- b) Ser económico
- c) Tener baja viscosidad con alto contenido de sólidos
- d) Tener buenas propiedades emulsionantes
- e) Tener buena estabilidad de la emulsión
- f) Tener la capacidad de retener el material del núcleo en su estructura sin ninguna reactividad durante el procesamiento o el almacenamiento
- g) Liberación controlada del material del núcleo
- h) Proteger el material del núcleo de cualquier condición ambiental, especialmente oxígeno, humedad y luz (Özbek et al., 2017).

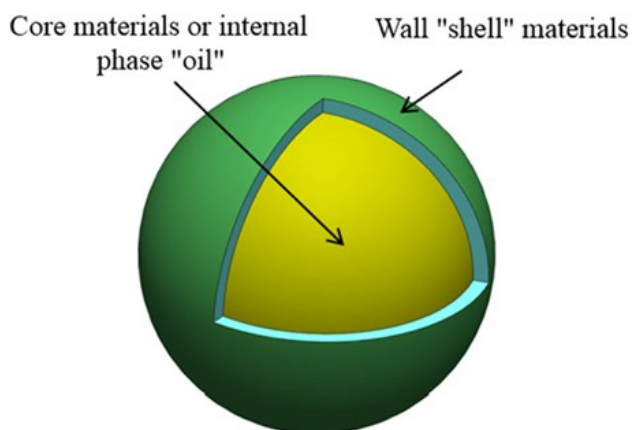


Figura 2. Composición simplificada de una microcápsula de aceite. Tomado de Bakry et al. (2016).

La selección del método a encapsular depende de los costos, el tamaño de la cápsula, las propiedades físicas y químicas de los materiales, la aplicación y el mecanismo de liberación deseado. Existen muchos métodos que son propiedad intelectual de las empresas y, por lo tanto, su conocimiento es restringido (Aldana, Rodríguez Sandoval, & Ayala Aponte, 2004). Las técnicas de encapsulación pueden ser divididas en dos grupos: químicos y mecánicos (físicos) (Madene et al., 2006).

Los métodos físicos no implican reacciones de polimerización, ya que los materiales utilizados inicialmente ya están caracterizados como algún tipo de polímero. Por lo tanto, solo la formación de la forma de las microcápsulas ocurre mecánicamente (Martins et al., 2014; Tyagi et al., 2011).

Los métodos químicos implican la obtención de microcápsulas mediante reacciones de polimerización por materiales precursores como monómeros o prepolímeros o asociación con interacciones químicas (Gouin, 2004; Poshadri & Kuna, 2010).

1.2.1 Emulsiónamiento

El emulsiónamiento implica la dispersión de un líquido en otro líquido inmiscible, lo que generalmente da como resultado emulsiones de aceite en agua (O/W) o agua en aceite (W/O). Esta técnica es crucial para encapsular compuestos hidrofóbicos dentro de una matriz hidrofílica. El emulsiónamiento puede lograrse mediante diversos métodos, como la mezcla de alto cizallamiento, la emulsificación ultrasónica y la emulsificación por membrana (Santosa et al., 2021).

Las emulsiones se utilizan en una amplia variedad de productos alimenticios y farmacéuticos. La tecnología de emulsificación es un paso clave en la microencapsulación de aceites. Generalmente, se aplica para la encapsulación de bioactivos en soluciones acuosas, que pueden usarse directamente en estado líquido o secarse (secado por aspersión o liofilización) para formar polvos después de la emulsificación. Por lo tanto, forma parte del proceso de microencapsulación (Bakry et al., 2016).

Básicamente, una emulsión consta de al menos dos líquidos inmiscibles, generalmente aceite y agua, con uno de los líquidos disperso en el otro como pequeñas gotas esféricas. Un sistema que consiste en gotitas de aceite dispersas en una fase acuosa se denomina emulsión de aceite en agua (O/W), mientras que un sistema que consiste en gotitas de agua dispersas en una fase oleosa se denomina emulsión de agua en aceite (W/O). También se han desarrollado emulsiones múltiples, como las emulsiones de aceite en agua en aceite (O/W/O) o de agua en aceite en agua (W/O/W). Para obtener una solución cinéticamente estable, comúnmente se añaden emulsionantes o modificadores de textura al sistema de emulsión. Los diámetros de las gotitas de emulsión en los sistemas alimentarios varían de 0,1 a 100 μm (Fang & Bhandari 2010).

Hay diversos métodos de preparación de emulsiones. Los métodos convencionales son la agitación mecánica o la homogeneización a alta presión, aunque también se pueden preparar mediante el uso de molinos coloidales o

mediante técnicas más novedosas que permiten controlar el tamaño de gota como es la emulsificación con membranas o el uso de microcanales de flujo focalizado (Matos, M., Luque, S., & Gutiérrez, G., 2020).

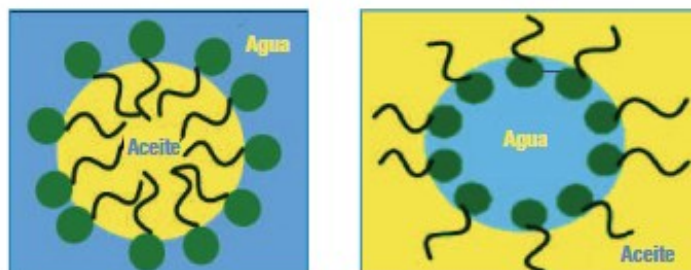


Figura 3. Orientación de las moléculas de tensioactivo en la superficie de una gota de aceite en una emulsión O/W y en una emulsión W/O. Tomado de Formulación y estabilidad de emulsiones para encapsulación de biocompuestos (2020) en Anales de Química de la RSEQ.

1.2.2 Secado por aspersión

El secado por aspersión es un método para producir un polvo seco a partir de un líquido o una suspensión mediante secado rápido con gas caliente. Este es el método de secado preferido para muchos materiales termosensibles. Todos los secadores por aspersión utilizan algún tipo de atomizador o boquilla para dispersar el líquido o la suspensión en una pulverización de tamaño de gota controlado (Paniwnyk, 2014).

Es el método de mayor uso y el de menor costo. El proceso requiere tres pasos básicos, la formación de la emulsión entre el material central y el recubrimiento, la homogenización y la aspersión. La emulsión se atomiza dentro de una corriente de aire caliente, al evaporarse el agua los sólidos remanentes forman una cápsula alrededor del material central por atracción másica, la remoción rápida del agua mantiene la temperatura del centro por debajo de 100 °C. El tamaño promedio de la cápsula obtenida es 100 µm y su recolección se realiza mediante ciclones. Las propiedades físicas de las microcápsulas dependen de la temperatura del aire caliente, el grado de uniformidad de la aspersión y el contenido de sólidos en la emulsión (Sandoval et al., 2004).

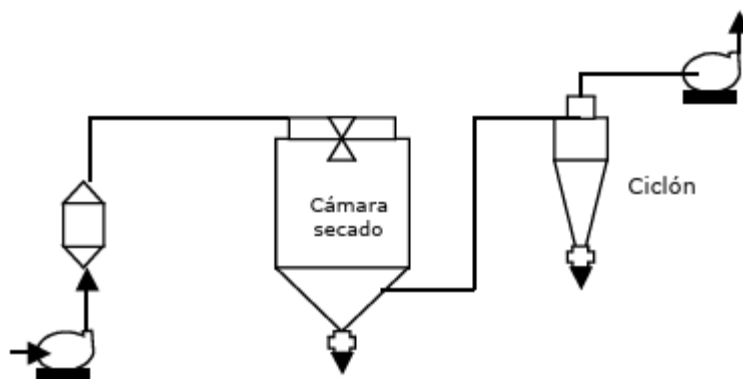


Figura 4. Diseño típico de un secador por aspersión. Tomado de Sandoval Aldana, Rodríguez Sandoval y Ayala Aponte (2004).

1.2.3 Extrusión

La extrusión es un proceso continuo que involucra el trabajo y la compresión sobre un material para formar una masa semisólida, que en determinadas condiciones controladas es forzada a fluir a través de una abertura restringida. En este proceso se combinan una serie de operaciones unitarias que incluyen mezclado, amasado, cizallamiento, calentamiento, enfriamiento y conformación. Debido a que la extrusión se realiza bajo condiciones de poca humedad. El producto resultante requiere muy poco o no requiere secado para alcanzar humedades seguras para el almacenamiento. Las altas temperaturas del proceso pasteurizan efectivamente el producto, lo cual incrementa su estabilidad, pues es equivalente a casi una esterilidad "comercial" (Vergara et al., 2023).

La tecnología de extrusión para microencapsulación permite producir microcápsulas de alta densidad. Para utilizar este método, el núcleo y el material de la pared deben ser inmiscibles. En este método, los materiales del núcleo y de la pared se pasan de forma que el material de la pared rodee el núcleo y a través de boquillas concéntricas, formando así gotitas que contienen el núcleo rodeado por el material de la pared. Posteriormente, la solidificación se realiza mediante enfriamiento o utilizando un baño de gelificación adecuado, donde las gotitas caen

y se solidifican mediante la formación de un complejo. Las cápsulas formadas con este método son relativamente más grandes que las formadas con cualquier otro método y, además, esta tecnología es útil con materiales de pared limitados (Choudhury et al., 2021).

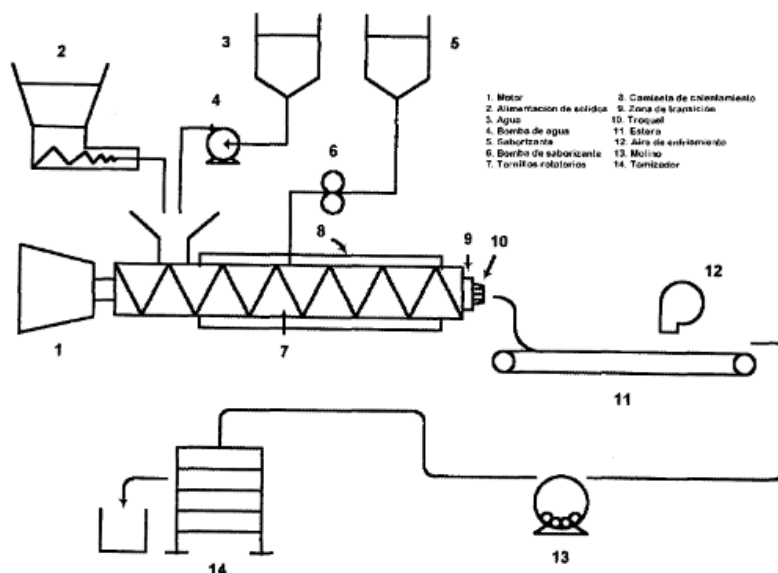


Figura 5. Diagrama del proceso por extrusión para la elaboración de saborizantes. Tomado de Encapsulación de saborizantes por extrusión. Madai Bringas, Jorge A. Pino y William Pérez (2011).

1.2.4 Liofilización

La liofilización es el método de encapsulación más utilizado, basado en la deshidratación por sublimación de una muestra congelada. Es una técnica de microencapsulación adecuada para compuestos bioactivos sensibles, ya que las sustancias no se exponen a altas temperaturas como ocurre con la técnica de secado por aspersión. Los productos liofilizados se pueden reconstituir rápida y fácilmente, lo cual resulta especialmente valioso en casos de emergencia; por ejemplo, anticuerpos y vacunas, que deben administrarse lo antes posible. Además, la liofilización es más sencilla que otras técnicas de microencapsulación debido a su número limitado de pasos (en comparación, por ejemplo, con la coacervación, la extracción con disolventes, la precipitación con fluidos supercríticos, etc.) (Pudziuvelyte et al., 2020).

Es la técnica más adecuada para la deshidratación de todos los materiales sensibles al calor y también para la microencapsulación (Desai & Park, 2005). Es una operación de múltiples etapas que estabiliza los materiales mediante cuatro operaciones principales: congelación, sublimación, desorción y, finalmente, almacenamiento. La eficiencia de la protección o liberación controlada depende principalmente de la composición y la estructura del material de pared (Desai, K. G., & Park, 2005). Los materiales de pared más utilizados son la goma arábica, la maltodextrina, los almidones emulsionantes, la proteína de suero, etc. (Ezhilarasi et al., 2013). Las mezclas de biopolímeros como materiales de pared pueden aumentar la eficiencia de encapsulación y la vida útil de las microcápsulas debido a la interacción de sus propiedades (Pérez-Alonso et al., 2009).

El proceso de liofilización se realiza en varias etapas que estabilizan los compuestos mediante cuatro operaciones principales como la congelación, la sublimación, la desorción y eficacia de la protección o la liberación controlada que depende de la composición y la estructura del material de la pared.

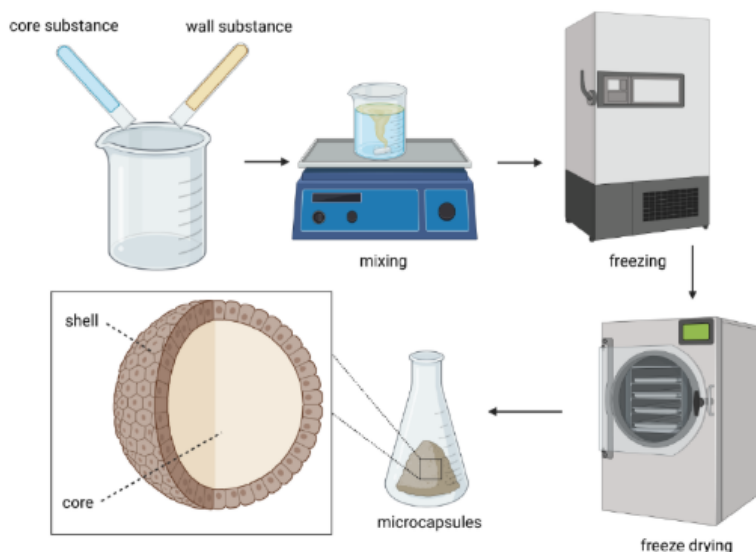


Figura 6. Diagrama del método de encapsulación por liofilización (freeze-drying). Tomado de Bińkowska et al., 2024, p. 6.

1.2.5 Coacervación

La coacervación es una de las técnicas de encapsulación más antiguas y utilizadas. Es un método relativamente simple, comparable a una técnica de emulsificación modificada (Napiórkowska et al., 2022). El nombre "coacervación" proviene del latín *acervus*, que significa agregación, y el prefijo "co" indica la fusión de partículas coloidales (Nirmala et al., 2017). El mecanismo de este proceso consiste en la separación del hidrocoloide de la solución primaria, seguida de su aglomeración en una fase líquida separada, denominada "coacervado".

Los coacervados se denominan "fase continua", mientras que la segunda fase se denomina "solución de equilibrio". El proceso de coacervación se divide en cuatro etapas: suspensión de las partículas del núcleo en la fase líquida, producción de un sistema trifásico (es decir, secreción de la segunda fase líquida, coacervado), deposición de polímero líquido alrededor del núcleo, gelificación y solidificación de la pared de la microcápsula (Napiórkowska et al., 2022).

La coacervación se ha clasificado en simple y compleja. La simple se refiere a los casos en los que solo participa un polímero, el cual se descompone mediante la acción de electrolitos (sulfato de sodio) o se desolvata mediante la adición de un no disolvente miscible en agua (etanol) o mediante el aumento o la disminución de la temperatura (Xiang-Ling et al., 2010). La complejación es un proceso de separación de fases causado por la interacción de dos o más coloides con carga opuesta (biopolímeros), generalmente proteínas y polisacáridos. El término "coacervación compleja" fue introducido por primera vez por Bungenberg de Jong y Kruyt en la década de 1940 para distinguirla de la coacervación simple de un solo polímero (Nirmala et al., 2017). En esta técnica, la fase líquida se separa de la fase rica en polímero (coacervado).

La principal fuerza impulsora para la coacervación compleja es la reducción en la energía electrostática libre del sistema de reacción resultante de la interacción entre

iones con carga opuesta (Yakindra et al., 2019). Este proceso también está influenciado por parámetros como el pH, la fuerza iónica, la relación proteína-polisacárido, la concentración total de biopolímeros, el tipo de material del núcleo y la relación núcleo: pared. La velocidad de agitación juega un papel importante en el control del tamaño de los coacervados formados. Además, la diferencia entre las cargas de polímero debe ser lo suficientemente grande como para causar interacción, pero no lo suficientemente grande como para causar precipitación.

Las microcápsulas preparadas de esta manera son insolubles en agua y resistentes al calor, pero las principales ventajas de la coacervación compleja en comparación con otros métodos de microencapsulación son la mayor eficiencia de encapsulación general y la posibilidad de usar liberación controlada. El proceso da como resultado una microcápsula circular en la que el núcleo está rodeado por un material de pared que protege el compuesto activo (Napiórkowska et al., 2022).

La coacervación compleja es conocida por su simplicidad, bajo coste, escalabilidad y reproducibilidad en la encapsulación de ingredientes alimentarios, lo que permite una alta eficiencia de encapsulación incluso con cargas útiles muy elevadas (hasta el 99%). Se ha informado que las características de los materiales de cubierta utilizados en el proceso de encapsulación afectan significativamente la estabilidad del núcleo, la eficiencia del proceso y el grado de protección de los componentes activos (Yakindra et al., 2019).

El proceso de microencapsulación de aceites esenciales mediante coacervación compleja se lleva a cabo en varias etapas. La primera consiste en la hidratación y preparación de la solución de los materiales de pared. A continuación, se añaden los aceites esenciales y un emulsionante a estas soluciones, y se lleva a cabo el proceso de emulsificación. Este paso es esencial, ya que la calidad de la emulsión y la interacción entre sus gotitas afectan directamente la estabilidad de las microcápsulas producidas posteriormente. El paso final es el curado mediante secado por aspersión o liofilización (Napiórkowska et al., 2022).

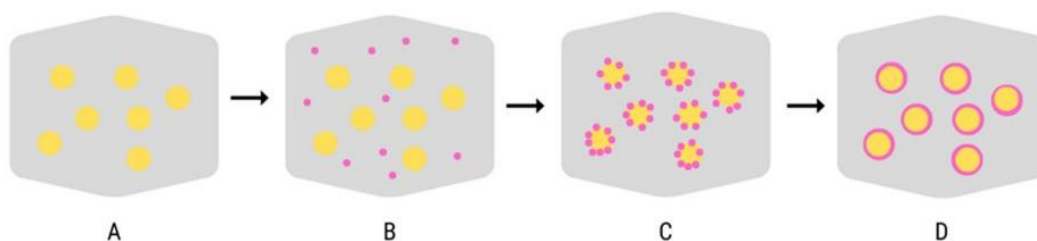


Figura 7. Ilustración esquemática de diversas morfologías formadas por microencapsulación: microcápsula monocapa y mononuclear (A), microcápsula multicapa y mononuclear (B), microcápsula multicapa y multinuclear (C), y micropartícula (D). Tomado de Napiórkowska y Kurek (2022, Figura 3), *Molecules*, 27(16), 5142. <https://doi.org/10.3390/molecules27165142>. Reproducida bajo licencia CC BY 4.0.

La microencapsulación de aceites esenciales mediante coacervación compleja permite su liberación controlada. La preparación de microcápsulas de aceites esenciales producidas por coacervación compleja puede ser un método eficaz para preservar sus propiedades fisicoquímicas. Al mismo tiempo, puede contribuir a aumentar la aplicabilidad de los aceites esenciales en alimentos como aditivos naturales con efecto conservante y a aumentar el valor nutricional del producto final (Napiórkowska et al., 2022).

1.2.6 Lecho Fluidizado

La tecnología de lecho fluidizado es una herramienta muy eficiente para la aplicación de capas uniformes de cualquier material de pared sobre partículas sólidas. El lecho fluidizado es una de las pocas metodologías capaces de recubrir partículas con cualquier tipo de material de pared (polisacáridos, proteínas, emulsificantes, grasas, formulaciones complejas, formulaciones entéricas, recubrimientos en polvo, extractos de levadura, etc.). El lecho fluidizado como método de encapsulación es utilizado también para revestir partículas de polvo en lotes o en forma continua (Espinosa Andrews et al., 2017).

Esta tecnología está basada en la separación de partículas individuales en una corriente gaseosa y la fijación a capas de materiales de pared por medio de polimerización, secado o cristalización alrededor de un núcleo sólido. El recubrimiento en lecho fluidizado es un método de encapsulación en el que el

material de recubrimiento se pulveriza sobre el material del núcleo fluidizado. En este caso, el material del núcleo se fluidifica mediante la aplicación de aire, sobre el cual se pulveriza el material de recubrimiento. Los diferentes métodos de recubrimiento en lecho fluidizado son: (a) pulverización superior, (b) pulverización inferior y (c) pulverización tangencial.

En este método de encapsulación, la eficiencia del recubrimiento del material de pared depende de diversos parámetros, como la velocidad de alimentación del material de pared, la presión de atomización de la boquilla, la temperatura y la velocidad del aire de entrada, etc. (Choudhury et al., 2021).

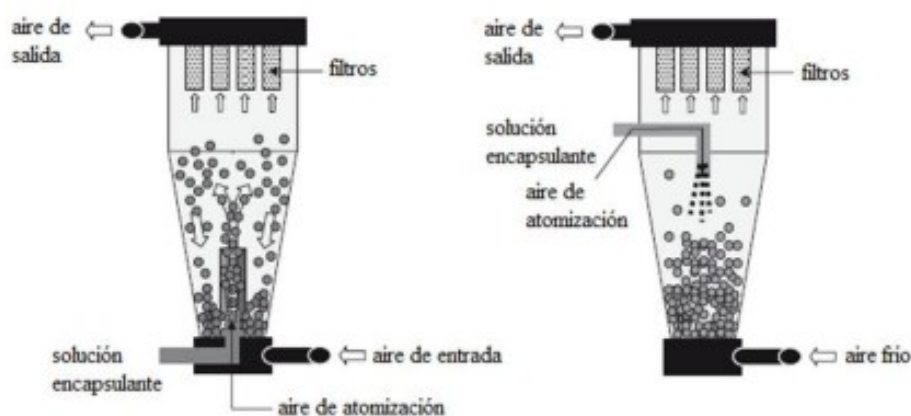


Figura 8. Microencapsulación por lecho fluidizado. Tomado de Espinosa Andrews, H., Yunuen García Carvajal, Z., & García Márquez, E. (Eds.). (2017). Avances en la seguridad y actividad biológica de sustancias bioactivas y probióticos.

1.2.7 Gelación iónica

La gelación iónica es una técnica de encapsulación que da como resultado cápsulas con un diámetro menor de 1000 μm , mediante el método de extrusión. Para llevar a cabo la gelación son necesarios materiales de recubrimiento, los cuales pueden ser gomas, carbohidratos, celulosas, lípidos, proteínas y materiales

inorgánicos, y una solución reticulante, que, por lo general, son iones calcio (cloruro de calcio).

La gelación iónica consiste en producir pequeñas gotas de solución a partir de la mezcla del material de recubrimiento y el compuesto que se desea encapsular. El material de recubrimiento comúnmente usado es el alginato de sodio, debido a que es un polímero de fácil acceso, baja viscosidad y alta reactividad con los iones calcio. Esta solución se fuerza a través de boquillas generando gotas, y éstas caen en un baño de iones calcio formando así una cápsula de gel. Este mecanismo se denomina de gelificación externa y es el más común y fácil para ambos tipos de compuestos, solubles e insolubles. Se producen geles heterogéneos, debido a que la gelificación en la superficie ocurre antes de la gelificación del núcleo, dando como resultado una superficie rígida y un núcleo blando (Ortiz-Romero et al., 2021).

Por otro lado, existe también el mecanismo denominado gelificación interna, el cual consiste en la preparación de una solución de iones calcio y el compuesto de interés que se desea encapsular, esta mezcla se fuerza a través de una boquilla y se vierte en un baño de alginato de sodio. Para llevar a cabo la liberación de los iones calcio se acidifica el medio adicionando un ácido orgánico como el acético, adípico y la glucono δ -lactona, se añade también un agente secuestrante, el cual se enlaza con el calcio libre retardando así el proceso de gelificación (Ortiz-Romero et al., 2021).

Entre las principales ventajas de la gelación iónica está que no emplea altas temperaturas ni disolventes orgánicos (Ortiz-Romero et al., 2021). Este método de encapsulación ampliamente utilizado comprende la formación de partículas mediante la interacción iónica entre un biopolímero, como el alginato de sodio, y una solución electrolítica, como la solución de cloruro de calcio (Ca_2). Las perlas de alginato de Ca (II) se explican mediante el modelo de caja de huevo, basado en la capacidad de intercambio entre cationes divalentes o trivalentes, como Ca_2 , Mn_2

y Al_3 , y las cadenas laterales del ácido carboxílico ($-\text{COOH}$) presente en el alginato de sodio (Traffano-Schiffo et al., 2018).

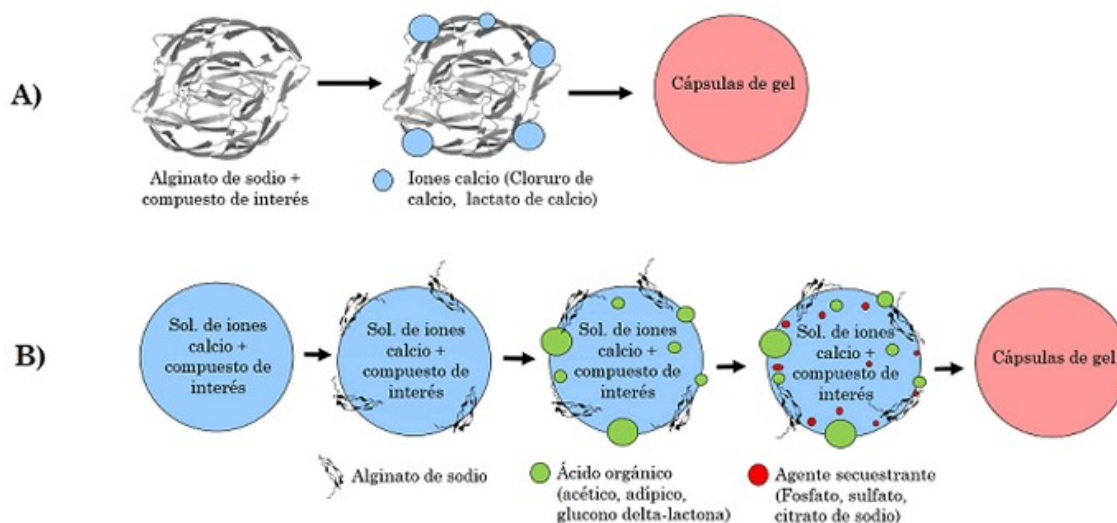


Figura 9. Diagrama representativo de gelación iónica externa (A) e interna (B). Fuente: Ortiz-Romero, N., Ochoa-Martínez, L. A., González-Herrera, S. M., Rutiaga-Quñones, O. M., & Gallegos-Infante, J. A. (2021).

Este sistema de encapsulación resulta interesante para sustancias termosensibles, como los ácidos grasos poliinsaturados, ya que permite la protección del compuesto activo, así como su aplicación en sistemas alimentarios. Además, la gelificación iónica permite una mayor carga de aceite en comparación con el secado por aspersión, donde la carga habitual es del 10 al 30 % de los sólidos totales (Menin et al., 2018).

1.2.7.1 Mecanismos de gelación iónica

Los mecanismos de gelificación iónica se clasifican en cinco grupos: gelificación interrumpida externa, interna, inversa, interfacial y de varios pasos (Alkhatib et al., 2022). La gelificación iónica externa es la más utilizada para producir cápsulas y consiste en que el agente (aceites, probióticos, vitaminas, entre otros) se dispersa

primero en una fase acuosa continua, que comúnmente se usa una solución de alginato, esta mezcla del agente y del alginato se atomiza en un baño de gelificación. Al inicio del proceso, se forma una membrana semisólida que rodea la cápsula generada, en esta etapa, el núcleo todavía es líquido, posteriormente, de forma gradual el núcleo se transforma en sólido a medida que las gotas entran en contacto con un agente reticulante (solución de cloruro de calcio Ca^{2+}) hasta que la cápsula es completamente sólida (Thanh et al., 2020).

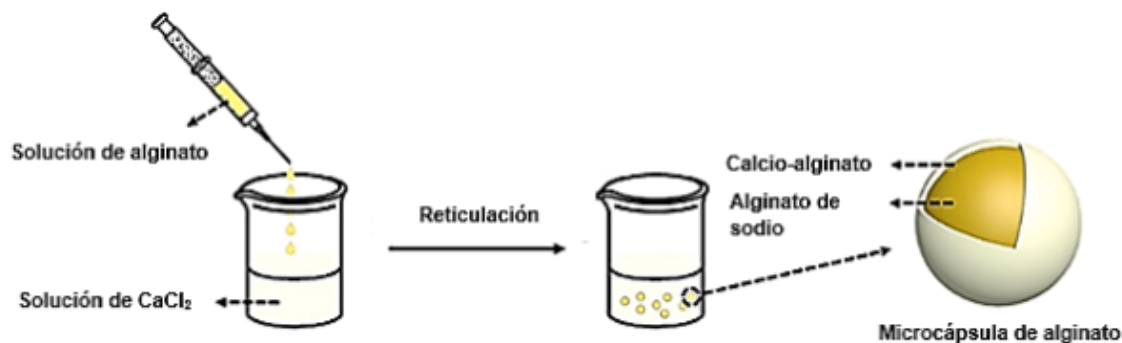


Figura 10. Técnica de gelificación iónica. Tomado de González-Rodríguez, A. M., Vargas-Pérez, J., & Torres-Peña, A. (2024).

1.3 AGENTES ENCAPSULANTES

Generalmente, las microcápsulas consisten en un material de núcleo, al que se hace referencia como fase interna o relleno, y una pared a la que se hace referencia como recubrimiento, cáscara o membrana. El material de pared determina la estabilidad de las micropartículas, la eficiencia del proceso y el grado de protección del núcleo.

Los materiales de pared comúnmente utilizados para la microencapsulación de aceites incluyen polímeros sintéticos y biomateriales naturales (generalmente carbohidratos y proteínas) (Bakry et al., 2016).

1.3.1 Lípidos: dentro de los principales agentes encapsulantes de carácter lipídico están: grasa láctea, lecitinas, ceras, ácido esteárico, monoglicéridos, diglicéridos, parafinas, aceites hidrogenados como el

aceite de palma, algodón y soya; son excelentes formadores de películas capaces de cubrir las partículas individuales, proporcionando una encapsulación uniforme (Yañez et al., 2002).

1.3.2 Carbohidratos: son extensivamente empleados en la encapsulación, se utiliza la técnica de secado por aspersión para ingredientes alimenticios como soporte de encapsulamiento, dentro de este amplio grupo se encuentran los almidones, maltodextrinas y gomas (Madene, Scher y Desobry, 2006; Murúa, Beristain y Martínez, 2009).

1.3.3 Almidón: almidones basados en ingredientes (almidones modificados, maltodextrinas, β -ciclodextrinas) son muy utilizados en la industria alimenticia (Madene, Scher y Desobry, 2006; Murúa, Beristain y Martínez, 2009)

1.3.4 Maltodextrinas: Se elaboran por métodos de hidrólisis ácida o enzimática de los almidones. En la selección de materiales de pared para encapsular, la maltodextrina es una buena solución entre el costo y la efectividad; tiene baja viscosidad a alta proporción de sólidos, son inodoras, incoloras y de baja viscosidad a altas concentraciones, además permiten la formación de polvos de libre flujo sin enmascarar el sabor original (García et al., 2004).

1.3.5 Gomas: Son generalmente insípidas, pero pueden tener un efecto pronunciado en el gusto y sabor de alimentos, son solubles, de baja viscosidad, poseen características de emulsificación y es muy versátil para la mayoría de los métodos de encapsulación (Madene, Scher y Desobry, 2006; Murúa, Beristain y Martínez, 2009)

1.3.6 Proteínas: alimentos hidrocoloides son ampliamente utilizados como microencapsulantes, por ejemplo: proteínas alimenticias como caseinato de sodio, proteína de lactosuero, aislados de proteína de soya (Madene, Scher y Desobry, 2006; Murúa, Beristain y Martínez, 2009)

1.3.7 Antioxidantes: Vitaminas liposolubles (por ejemplo, vitamina A, D, E, K y carotenos) y vitaminas hidrosolubles como vitamina C pueden ser encapsuladas utilizando varias tecnologías. (Schrooyen, Meer y Kruif, 2001). Aparte del encapsulamiento de aceites, el tocoferol basado en microcápsulas de alginato de sodio, ha sido utilizado como material natural, resistente contra el fluido gástrico simulado (Li et al., 2009).

1.3.8 Alginato de sodio

El alginato de sodio es la sal sódica del alginato, un polisacárido no ramificado y soluble en agua, extraído de algas pardas o mediante biosíntesis bacteriana (Lee & Mooney, 2012). La cadena polimérica del alginato consta de dos tipos de unidades monoméricas: ácido β -D-manurónico (M) y ácido α -L-gulurónico (G), distribuidas aleatoriamente en la cadena (Draget & Taylor, 2011). Los bloques de G pueden formar enlaces cruzados en presencia de cationes divalentes, lo que da lugar a la formación de un gel de alginato (El Hariri El et al., 2022; George & Abraham, 2006).

La encapsulación con alginato de sodio se conoce como gelificación iónica, donde el alginato se usa como un material encapsulante que, al contacto con una solución de catión divalente o polivalente, forma un hidrogel al instante. Esta facilidad de producción permite tener una técnica de encapsulado con buenas perspectivas de aplicación industrial, no solo por el bajo costo de los materiales formadores de hidrogel, sino, además, por las mínimas pérdidas durante la gelificación iónica una vez establecidas las mejores condiciones de proceso Muchiutti et al., 2019).

1.4. BIOPOLÍMEROS COMO MATERIAL DE PARED

Los polímeros son macromoléculas formadas por cientos o miles de unidades básicas funcionales denominadas monómeros. Los polímeros pueden ser de naturaleza sintética, artificial y/o natural; estos últimos, provenientes directamente del reino animal o vegetal, presentan variadas propiedades y usos, destacándose en el sector farmacéutico, agrícola, alimenticio y textil. En los últimos años, los polímeros naturales o biopolímeros han adquirido gran importancia en el área biomédica, especialmente en el desarrollo de nuevas terapias celulares (Cabané y cols. 2011).

Cuando los polímeros son producidos en la naturaleza por organismos como plantas, animales, bacterias, algas y hongos, se denominan polímeros naturales. Cuando se producen en un laboratorio, se denominan polímeros sintéticos (Bhatia, 2016). Tanto los polímeros naturales como los sintéticos se han utilizado ampliamente en numerosas industrias, como la textil, la cosmética, la farmacéutica, la médica y la alimentaria.

En la industria alimentaria, los polímeros se han utilizado para formar y modificar las estructuras de los alimentos. La encapsulación consiste en confinar una sustancia dentro de un material de pared, aislándola del entorno. De esta manera, es posible mejorar la biodisponibilidad de las biomoléculas mediante su transporte y protección.

La alta biocompatibilidad, el bajo costo y la gran disponibilidad de los polímeros naturales los han convertido en los polímeros más utilizados como material de pared para la encapsulación de sustancias bioactivas y su incorporación en alimentos (Tong et al., 2020). En este sentido, los polímeros naturales más utilizados para la encapsulación de sustancias bioactivas y su uso en alimentos son el alginato, el quitosano, la gelatina, la albúmina, el carragenano, el almidón y la goma guar (George, Shah, & Shrivastav, 2019).

1.4.1 Gomas vegetales

Las gomas vegetales son polisacáridos hidrofílicos que se obtienen cuando una planta, al sufrir una lesión, secreta una sustancia gomosa para protegerse de los microorganismos. Están compuestas principalmente de galactosa y arabinosa, y tienen la capacidad de retener agua para formar geles, dispersiones y soluciones coloidales. Esto se debe a la presencia de grupos hidroxilo en su estructura. Los principales usos de las gomas vegetales en la industria son como agentes de recubrimiento, emulsionantes, agentes suspensores, estabilizantes y agentes retenedores de agua. (Amiri et al., 2021: Taheri et al., 2019).

1.4.2 Carragenano

El carragenano es un polisacárido aniónico extraído de algas rojas de la familia Rhodophyceae, compuesto por unidades sulfatadas de D-galactosa y 3,6-anhidrogallactosa. (Amiri et al., 2021). Los carragenanos se clasifican en seis tipos: κ -, ι -, λ -, μ -, ν - y θ -carragenanos, según su estructura. Son poligalactanos sulfatados con una proporción de grupos éster sulfato entre el 15 y el 40 %. Además, el carragenano es un emulsionante, espesante y estabilizante (Shukla, al., 2016).

1.4.3. Quitosano

El quitosano es un polímero lineal natural que se obtiene del exoesqueleto de crustáceos, insectos y hongos mediante la desacetilación de la quitina (Jain, et al., 2016: Alvarenga et al., 2011). Se ha estudiado ampliamente como biopolímero para el desarrollo de nanomateriales en las industrias alimentaria y farmacéutica. Su aplicación en el diseño de liberación controlada de bioactivos ha aumentado debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad, mucoadhesividad, así como a su naturaleza no inmunogénica y no tóxica (Wei et al., 2020).

1.4.4. Celulosa

La celulosa es un polisacárido ramificado formado por unidades de D-glucosa unidas por enlaces β -glucosídicos 1,4. Se extrae de las plantas, ya que es uno de los principales componentes de las paredes celulares vegetales. La celulosa es insoluble en agua y el cuerpo humano no puede digerirla. Sin embargo, una vez procesada, puede utilizarse para diversos fines, entre ellos la encapsulación de bioactivos. La celulosa procesada presenta baja toxicidad, biodegradabilidad y biocompatibilidad. Asimismo, algunos de los sistemas de encapsulación generados con este polímero son nanofibrillas, hidrogeles y nanopartículas tóxica (Wei et al., 2020).

1.4.5. Pectina

La pectina es un polisacárido extraído de las paredes celulares de las plantas y se utiliza principalmente como agente gelificante, espesante o estabilizante. Debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad y no toxicidad, se utiliza ampliamente en las industrias farmacéutica y alimentaria (Joshi et al., 2018).

1.4.6. Mucílago

El mucílago es un biopolímero de carbohidratos funcional, hidrofílico y pegajoso, que se extrae principalmente de plantas y algunos microorganismos. Su peculiar diversidad estructural y fisicoquímica ha impulsado una intensa investigación para su uso como agente gelificante, espesante, estabilizante y emulsionante, además de sus múltiples beneficios para la salud (Nader & Baraka; 2012).

1.4.6.1. Mucílago de nopal

El mucílago de nopal es considerado un hidrocoloide, sustancia formadora de matrices, característica necesaria para poder obtener un recubrimiento (Peña-Valdivia et al., 2012).

La alta concentración de mucílago encontrado en algunas especies de nopal, la conformación polimérica y las propiedades reológicas (viscosidad) de este

compuesto han despertado un gran interés en el área de los alimentos debido a que estas cactáceas tienen potencial para ser consideradas materia prima en la elaboración de recubrimientos comestibles o en la obtención de aditivos mejoradores de la textura en los alimentos (Del Valle et al., 2005). Las sustancias pécticas son hidrocoloides con una composición compleja y una función importante como constituyentes primarios de la pared celular (Lutz et al., 2009).

1.5 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Un aspecto fundamental de adsorción ocurre el adsorbente (vapor de agua) se pone en contacto en la superficie del material conocido como adsorbato (hidrogel). El término “adsorción” se refiere al proceso en el que las moléculas del adsorbente se acumulan en la capa interfacial, mientras que la desorción denota el proceso inverso. Se dice que la histéresis de adsorción ocurre cuando las curvas de adsorción y desorción se desvían entre sí.

El concepto fundamental en la ciencia de la adsorción es el denominado isoterma de adsorción. Es la relación de equilibrio entre la cantidad de material adsorbido y la presión o concentración en la fase de fluido a granel a temperatura constante.

Sobre la base de la adsorción de gases de van der Waals en varios sustratos sólidos, Brunauer et al. (1938) clasificaron las isotermas de adsorción en cinco tipos generales. El tipo I es Langmuir y el tipo II la isoterma de adsorción de forma sigmoidea; sin embargo, no se han asignado nombres especiales a los otros tres tipos. Los tipos II y III están estrechamente relacionados con los tipos IV y V, excepto que la adsorción máxima se produce a una presión más baja que la presión de vapor del gas. Sin embargo, si el sólido es poroso de modo que tiene una superficie interna, entonces el grosor de la capa adsorbida en las paredes de los poros está necesariamente limitado por la anchura de los poros. La forma de la isoterma se

modifica correspondientemente; en lugar de los tipos II y III, existen los tipos IV y V (Al-Muhtaseb et al., 2002).

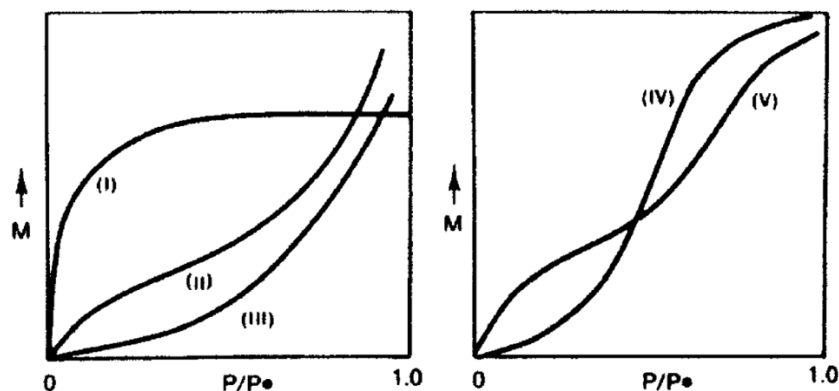


Figura 11. Cinco tipos de isothermas de adsorción de van der Waals

Las isothermas de adsorción de humedad de la mayoría de los alimentos no son lineales, generalmente son de forma sigmoideal, y se han clasificado como isothermas de tipo II. Caurie sugirió que la mayor parte del agua en los alimentos frescos ejerce una presión de vapor muy cercana a la del agua pura (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Para fines de interpretación, la isoterma de absorción de humedad generalizada para un sistema alimentario hipotético puede dividirse en tres regiones principales (Figura 12):

La región A representa agua fuertemente ligada con una entalpía de vaporización considerablemente mayor que la del agua pura. Un caso típico es la adsorción de agua en biopolímeros altamente hidrófilos como proteínas y polisacáridos. En teoría, el contenido de humedad representa la adsorción de la primera capa de moléculas de agua. En esta región, las moléculas de agua no se pueden congelar y no están disponibles para reacciones químicas o como plastificantes. Se observa empíricamente que la mayoría de los productos alimenticios secos muestran su mayor estabilidad a contenidos de humedad comparables al contenido de humedad de la monocapa.

La región B representa moléculas de agua que están unidas con menos firmeza, inicialmente como multicapas por encima de la monocapa. En esta región, el agua se mantiene en la matriz sólida por condensación capilar. Esta agua 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 se encuentra dentro de esta región.

En la región C o superior, el exceso de agua está presente en los macrocapilares o como parte de la fase líquida en materiales con alto contenido de humedad. Esto exhibe casi todas las propiedades del agua a granel y, por lo tanto, es capaz de actuar como disolvente. El crecimiento microbiano se convierte en una importante reacción de deterioro en esta región.

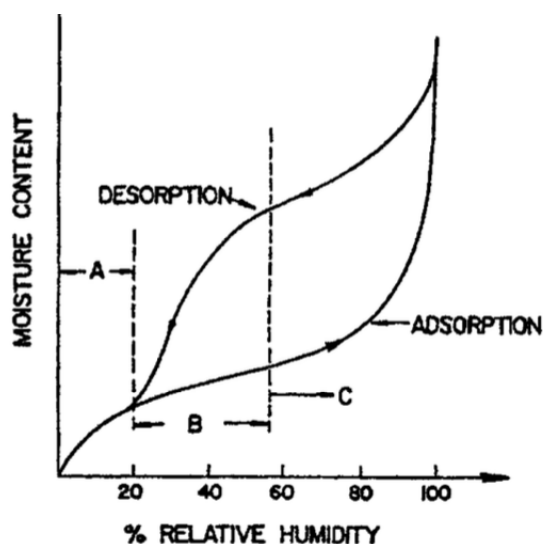


Figura 12. Isoterma de sorción generalizada para productos alimenticios (Heldman & Lund, 1992)



JUSTIFICACIÓN

2 JUSTIFICACIÓN

Los objetivos de desarrollo sostenible generados en la agenda 2030 de la ONU, enmarca en alguno de ellos, que se debe de minimizar el hambre a nivel mundial. Para ello, es importante que se engloben varios aspectos a considerar para lograr dicho fin. Entre estos aspectos a considerar, es que los procesos industriales deben ser sustentables y sostenibles, los productos alimentarios deben ser mínimamente procesados para reducir riesgos a la salud humana, y que estos productos puedan ser accesibles para todas las personas. En los últimos años, la industria alimentaria se ha enfocado en elaborar alimentos que de alguna manera le aporten salud y nutrición al ser humano, para ello se enfocan en utilizar materias primas cada vez más naturales, de bajo costo y sustituyendo parcialmente los sintéticos para mejorar la calidad de vida.

El consumo de ácidos grasos poliinsaturados es de vital importancia debido a sus aportes benéficos a la salud humana como es la prevención de enfermedades cardiovasculares reduciendo niveles altos de colesterol y triglicéridos. En el caso específico del aceite esencial de sésamo, este posee una combinación atractiva y balanceada de ambos tipos de ácidos grasos (omega 3 y omega 6) que potencialmente pueden ser utilizados en la producción de alimentos funcionales. Aunque existe una limitante para su uso, transporte y almacenamiento, ya que es un insumo susceptible a sufrir ciertos tipos de descomposición fisicoquímica y biológica al ponerse en contacto con oxígeno, temperatura, humedad y actividad de agua.

Para su protección, estabilidad y extensión de vida útil del aceite de sésamo, se ha recurrido a la tecnología de encapsulación para contrarrestar estos efectos deteriorativos. Una de estas tecnologías que ha recibido gran atención y aplicación

en el sector industrial ha sido la gelación iónica. Esta técnica se basa en crear un entrecruzamiento de carácter físico entre el biomaterial conocido como alginato de sodio y algún ion de tipo divalente como el calcio, de esta manera se producen esferas de hidrogel de alginato que sirven como agentes encapsulantes y protectores de compuestos activos como es el caso del aceite de sésamo.

Por otra parte, se ha demostrado que el mucílago de nopal (MN) cuenta con propiedades funcionales (espesantes, espumantes, emulsionantes, gelificantes, encapsulantes, retenedores de agua), que permite también retener aceites esenciales, y, por ende, es un atractivo biomaterial para ser considerado como agente encapsulante.

Una vez que se han producidos hidrogeles por la tecnología de gelación iónica, se necesita evaluar la estabilidad de estos sistemas coloidales para garantizar condiciones de almacenamiento apropiados para retardar mecanismos deteriorativos del aceite de sésamo. Por lo que en este trabajo, se estudia y se analiza el fenómeno de adsorción de humedad en perlas de hidrogel de aceite de sésamo obtenidos mediante gelación iónica empleando alginato de sodio (AS) y mucílago de nopal (MN) como agentes encapsulantes y, a partir de diferentes modelos matemáticos empíricos, semiempíricos y teóricos poder evaluar y establecer condiciones de almacenamiento.



PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible establecer condiciones de estabilidad de almacenamiento de hidrogeles de aceite de ajonjolí a partir de isothermas de adsorción de humedad utilizando modelos teóricos, semiempíricos y empíricos de parámetros ajustables?



OBJETIVOS

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar diferentes modelos matemáticos en el proceso de adsorción de humedad en hidrogeles de aceite de ajonjolí para establecer condiciones de estabilidad de almacenamiento.

4.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Obtener hidrogeles de aceite de ajonjolí mediante la técnica de gelación iónica con diferentes concentraciones de agentes encapsulantes (alginato de sodio y mucílago de nopal).
- Obtener experimentalmente isotermas de adsorción de humedad en los hidrogeles a diferentes temperaturas de almacenamiento (25, 35 y 45 °C) en un intervalo de a_w entre 0.05 y 0.84
- Ajustar los datos experimentales de las isotermas de adsorción empleando diferentes modelos matemáticos (empíricos, semiempíricos y teóricos).
- Establecer las condiciones de estabilidad y almacenamiento de los hidrogeles con aceite de ajonjolí.



MATERIALES Y MÉTODOS

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 MATERIALES

Semillas de sésamo y nopales fueron adquiridos en un centro comercial (Toluca, Estado de México). Alginato de sodio (AS) fue amablemente suministrado por la empresa FMC Health & Nutrition (Ciudad de México, México). Todos los reactivos y agua desionizada se compraron en Sigma Aldrich S.A. de C.V.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Extracción del aceite de ajonjolí

Se emplearon lotes de 500 g de semilla de sésamo para colocarse en un embolo cilíndrico de acero inoxidable cuyas dimensiones son de 10 cm × 40 cm. Posteriormente el embolo se colocó en una prensa hidráulica (Tamer PHT-20, China) y se aplicó una presión de 8.8×10^8 N/m² a condiciones ambientales (~20°C). El aceite extraído se filtró con una tela de algodón para retirar impurezas y restos de semilla. Posteriormente, el aceite fue recolectado en frascos ámbar y se almacenaron en refrigeración a 4 °C (Fuentes-Ortega et al., 2017).

5.2.2 Extracción del mucílago de nopal

El mucílago de nopal (MN) se extrajo de los cladodios siguiendo el método descrito por Cortés-Camargo et al. (2019). Brevemente, los cladodios de nopal fueron lavados y rebanados teniendo un área de contacto de 36 cm². Las rebanadas se colocaron en un contenedor de acero inoxidable al cual se adicionó agua desionizada en una proporción 1:2.5 nopal-agua desionizada. Las muestras se calentaron a 86°C por 2.5 h bajo agitación mecánica (Caframo BDC-3030, Ontario, Canadá). El mucílago extraído se separó de la fase sólida por filtración usando una

mallita metálica No.100. El MN filtrado se puso sobre recipientes de aluminio para ser deshidratado en una estufa bacteriológica a 65°C por 4 h. Finalmente, el MN fue pulverizado empleando una malla No. 40 para obtener partículas de 420 µm.

5.2.3 Preparación de dispersiones e hidrogeles por gelación iónica

Se formularon soluciones acuosas al 2% w/v de AS y MN de manera independiente y se mantuvieron en agitación mecánica durante 24 h a temperatura ambiente con el objetivo de llevar a cabo una hidratación completa de cada hidrocoloide. Después, se formularon tres sistemas dispersantes entre el AS y MN con relaciones en peso de: i) AS-MN (1:0 w/w); ii) AS-MN (1:1 w/w); iii) AS-MN (1:2 w/w) en cada una de estas dispersiones se colocaron 2 g de aceite de sésamo mediante homogeneización con un equipo Ultra-Turrax T50 (IKA®-Werke Works Inc., Wilmington, NC, EUA) a 6400 rpm durante 10 min.

Posteriormente, se extrajo una muestra de cada dispersión en una jeringa de 10 mL unida con una punta de aguja de 0.70 mm de diámetro (calibre 22) y se goteó en una solución acuosa de 100 mL de CaCl₂, (2.5% w / v) contenida en un vaso de precipitados con agitación de 250 rpm mediante un agitador mecánico para evitar la aglomeración de las perlas de hidrogel. La punta de la aguja se fijó a 30 cm por encima de la superficie de la solución de reticulación. La tasa de goteo se fijó en 20 gotas por minuto. La solución gelificante (solución SSO-AS-MN/CaCl₂) se agitó durante 60 min a 20 °C para completar la gelificación y producir las perlas de hidrogel. Finalmente, las perlas de hidrogel producidas se lavaron con agua desionizada y deshidratadas en una estufa bacteriológica a 40 °C durante 24 h. Las perlas de hidrogel se almacenaron en frascos de color ámbar hasta su uso posterior.

5.2.4 Obtención de las isotermas de adsorción de los hidrogeles

Antes de obtener experimentalmente las isotermas de adsorción de los sistemas de hidrogeles producidos, estos fueron pre-acondicionados en Pentóxido de Fosforo para reducir su humedad a un 2% de humedad en base seca. Una vez alcanzado

este porcentaje de humedad por parte de los hidrogeles, estos fueron utilizados para generar las isothermas a 25, 35 y 45 °C, utilizando el método gravimétrico de celdas de equilibrio en el intervalo de actividad acuosa (a_w) de 0.11 a 0.85 descrito por Velázquez-Gutiérrez et al. (2024). El método consistió en preparar previamente 8 soluciones salinas con diferentes sales que proporcionaron una actividad de agua específica a la temperatura de almacenamiento (Tabla 1). Alícuotas de 5 mL de cada solución salina se colocaron en el fondo de pequeños desecadores de vidrio de 10 cm de diámetro, y se emplearon 3 desecadores por cada solución salina acondicionados a las temperaturas de operación.

Tabla 1. Actividad de agua de las soluciones saturadas de las sales a diferentes temperaturas

Sales / T (°C)	25	35	45
LiCl	0.115	0.108	0.105
KC ₂ H ₃ O ₂	0.237	0.215	0.206
MgCl ₂	0.329	0.318	0.313
K ₂ CO ₃	0.443	0.436	0.433
MgNO ₃	0.536	0.515	0.506
NaNO ₂	0.654	0.628	0.614
NaCl	0.765	0.743	0.734
KCl	0.846	0.821	0.806

Posteriormente, se pesaron 2.0 g de cada tipo de hidrogel y se colocaron en portamuestras de plástico perforados para permitir la transferencia de humedad, los cuales fueron introducidos en los desecadores, los cuales fueron cerrados y sellados para que solamente exista transferencia de humedad del medio a los hidrogeles.

Una vez adaptados los desecadores, estos fueron colocados dentro de estufas bacteriológicas (marca Felisa) a las temperaturas de 25, 35 y 45 °C. Las muestras

se pesaron cada 8 días hasta alcanzar el estado de equilibrio, es decir, cuando el peso de cada tipo de hidrogel se mantuviera constante y se determinó el contenido de humedad en el equilibrio de cada muestra. La actividad de agua se midió usando un medidor de actividad acuosa (mod. Series 3TE con compensador de temperatura, Decagon, Wilmington, EUA) (Velázquez-Gutiérrez et al., 2021).

5.2.5 Modelos matemáticos empleados para ajustar los datos de las isothermas de adsorción

Los datos experimentales de los isothermas fueron ajustados por tres conjuntos de modelos matemáticos divididos en tres categorías: modelos teóricos, semiempíricos y empíricos. A continuación se expresan y se describen dichos modelos.

Modelos teóricos

Modelo de Stephen Brunauer, Paul Emmet y Edward Teller (B.E.T.)

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

M : Contenido de humedad en el equilibrio

M_0 : Contenido de humedad en la monocapa

C_B : Parámetro de energía

a_w : actividad acuosa

Modelo de Guggenheim, Anderson & De Boer (G.A.B.)

$$M = \frac{M_0 \cdot C_G \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C_G \cdot RTK \cdot a_w)} \quad (2)$$

M : Contenido de humedad en el equilibrio

M_0 : Contenido de humedad en la monocapa

C_B : Constante de Guggenheim

M : Parámetro de corrección para las propiedades de las moléculas

a_w : actividad acuosa

Modelos semiempíricos:

Modelo de Lewicki

$$M = A \left(\frac{1}{a_w} - 1 \right)^{B-1} \quad (3)$$

M : Contenido de humedad en el equilibrio

A y B : Parámetros matemáticos

a_w : Actividad acuosa

Modelo de Halsey

$$M = \left(-\frac{A}{\ln(a_w)} - 1 \right)^{\frac{1}{B}} \quad (4)$$

M : Contenido de humedad en el equilibrio

A y B : Parámetros matemáticos

M : Actividad acuosa

Modelos empíricos

Modelo de Oswin

$$M = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B \quad (5)$$

M : Contenido de humedad en el equilibrio

A y B : Parámetros matemáticos

a_w : Actividad acuosa

Modelo de Henderson-Thompson

$$M = \left(\frac{-\ln(1 - a_w)}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (6)$$

M : Contenido de humedad en el equilibrio

A y B : Parámetros matemáticos

a_w : Actividad acuosa

Los parámetros de ajuste de cada modelo matemático se determinaron mediante un análisis de regresión no lineal utilizando el software Polymath 6.10., y se tomó el factor de correlación r^2 y el módulo de desviación relativa media (E) (Ec.5.1) como criterios para considerar un buen ajuste, que en general se considera adecuado cuando $E \leq 5\%$ (Pérez-Alonso et al., 2006):

$$E = \frac{100}{N} \sum \frac{|M_i - M_{Ei}|}{M_i} \quad (7)$$

Aquí:

M_i : contenido de humedad en la observación i

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

N : es el número de observaciones



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelos Teóricos

Modelo de B.E.T.

Las isothermas de adsorción de vapor de agua en los hidrogeles AS-MN con aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para las diferentes relaciones AS-NM (1:0), AS-NM (1:1), AS-NM (1:1.5), se ajustaron en primer lugar al modelo cinético de B.E.T. y se presentan en las figuras 13, 14 y 15, respectivamente.

Para comenzar, se describen las isothermas experimentales para los tres sistemas estudiados. En primera instancia, se puede apreciar que el agente encapsulante no influye en el tipo de isoterma que se conformó, lo mismo ocurre para la temperatura y la actividad de agua, es decir, todas las isothermas presentaron una forma sigmoidal, que de acuerdo a la clasificación de Brunauer estas caen dentro del tipo II (Brunauer et al., 1938).

Estas isothermas tipo II muestran tres regiones distintas bien definidas. Una primera región, donde se produce una adsorción monomolecular a bajas actividades de agua ($a_w < 0,4$), la cual representa moléculas de agua fuertemente unidas al material de adsorción (hidrogel), con una entalpía de vaporización superior a la del agua pura. La adsorción de vapor de agua en superficies de materiales que contienen biopolímeros altamente hidrofílicos (p. ej., proteínas y polisacáridos) es un ejemplo característico de este comportamiento. En tal caso, el contenido de humedad refleja la adsorción de la primera capa (Al-Muhtaseb et al., 2002). Una segunda región se asocia a un comportamiento semilineal observado en el intervalo $0.4 < a_w < 0.65$, característico de la adsorción multicapa. En este caso, los azúcares contenidos en el mucílago del nopal retienen la mayor fracción de moléculas de agua, pero las moléculas que conforman las perlas de hidrogel AS-MN contienen suficientes moléculas de agua para reducir la rigidez inicial (Tsami et al., 1992). Se

observó una tercera región donde se registró un marcado aumento en el contenido de humedad en el equilibrio en el intervalo de a_w de 0.65 a 0.85 debido a la condensación capilar del agua (Ciurzyńska et al., 2019; Tsami et al., 1992). Por lo tanto, se puede afirmar que las isotermas de estas perlas de hidrogel presentan un comportamiento de isotermas de Tipo II (forma sigmoidal) (Blahovec & Yanniotis, 2009; Al-Muhtaseb et al., 2002; Brunauer et al., 1938).

Por otra parte, las figuras anteriormente mencionadas muestran el efecto de la temperatura en el intervalo estudiado (25-45 °C) sobre el contenido de humedad en el equilibrio. La capacidad de adsorción (sorptividad) de las perlas de hidrogel disminuyó al aumentar la temperatura. Si bien las diferencias en el contenido de humedad son pequeñas entre las perlas de hidrogel AS-MN (1:1) y AS-MN (1:1,5), en el caso de las perlas AS-MN (1:0) la diferencia es más marcada. Estos cambios concuerdan con la termodinámica de adsorción, ya que la cantidad de agua adsorbida disminuye con la temperatura (Adamiec, 2009). Por otro lado, el contenido de humedad en equilibrio de las perlas de hidrogel aumentó a la misma temperatura de adsorción al incrementarse la cantidad de mucílago de nopal. Este comportamiento podría atribuirse a la compleja estructura de los biopolímeros que constituyen la matriz de las perlas de hidrogel. El ácido D-galacturónico y los monosacáridos (p. ej., D-xilosa, D-galactosa, L-ramnosa y L-arabinosa) presentes en el mucílago del nopal tienen gran afinidad y capacidad para unirse fácilmente a las moléculas de agua (Cortés-Camargo et al., 2017). El alginato de sodio está compuesto principalmente por ácidos glucurónico y manurónico que forman bloques con secuencias alternadas, lo que también le confiere alta solubilidad y afinidad por el agua (Benavides et al., 2016; Galus & Lenart, 2013).

También las figuras muestran un claro efecto del contenido de aceite de sésamo en los diferentes sistemas de perlas de hidrogel sobre la sorptividad de las perlas secas. Las curvas de equilibrio de las perlas de hidrogel con las mezclas SA-NM se sitúan muy por encima de las curvas de los hidrogeles formulados únicamente con alginato de sodio con el mismo contenido de aceite. Esto significa que los hidrogeles

con alginato de sodio son menos sensibles al vapor de agua ambiental y, por lo tanto, más estables frente a la actividad del agua, lo que se manifiesta en una menor capacidad de adsorción de moléculas de agua debido al efecto de bloqueo de las microgotas de aceite, que impiden que las moléculas de vapor de agua accedan a la superficie de sorción del alginato de sodio. En el caso de los hidrogeles formulados con mezclas AS-MN, la cantidad de mucílago de nopal presente en estos sistemas y su alta higroscopicidad favorecen que las estructuras de los geles sean más plastificantes (Medina-Torres et al., 2013), lo que impide que las moléculas de aceite bloqueen u obstruyan los poros superficiales de los hidrogeles, promoviendo así una mayor adsorción de humedad.

Como se mencionó anteriormente, estas isotermas se ajustaron al modelo de B.E.T. (ecuación 1). Las dos constantes obtenidas del modelo teórico B.E.T. son el contenido de humedad de Monocapa (M_0) y la constante de energía (C_B), las cuales se muestran en la tabla 2. Estos dos parámetros cinéticos poseen un significado físico dentro del proceso de adsorción de humedad. M_0 se refiere a la cantidad de agua fuertemente unida en la monocapa del adsorbente (hidrogel) y es considerada como el valor óptimo donde un alimento es más estable fisoquimicamente. Se puede apreciar para el caso de los sistemas (1:0 y 1:1) que a medida se incrementa la temperatura, M_0 disminuye, no así fue el caso para el sistema (1:1.5) donde a 35 °C el valor de la monocapa aumenta y posteriormente vuelve a subir a 45 °C. Lo que es claro es que los hidrogeles que contienen mayor cantidad de MN presentaron los valores más altos de M_0 , lo anterior se debe a que el MN posee una alta capacidad de absorción de agua.

Por otro lado, los valores del parámetro C_B muestran una tendencia clara, a medida que se incrementa la temperatura, los valores de C_B disminuyen, sin importar el tipo de agente encapsulante. Teóricamente, este parámetro se encuentra relacionado con el calor de adsorción en la monocapa del alimento, y se asume que la fuerza de interacción agua-hidrogel se favorece a bajas temperaturas (Pascual-Pineda et al., 2017).

Estadísticamente, no existió una correlación adecuada entre los datos experimentales y el modelo de B.E.T., los valores del factor de correlación cuadrático no fue del todo satisfactorio y los porcentajes de error resultaron ser muy altos (por arriba del 5%).

Tabla 2. Parámetros del modelo B.E.T. para las isotermas de adsorción AS-MN.

	<i>1:0</i>			<i>1:1</i>			<i>1:1.5</i>		
	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
M_0	2.135	2.134	1.872	3.514	3.650	3.046	3.793	4.043	3.507
C_B	30.041	14.072	8.293	16.773	9.432	6.825	20.790	11.134	7.648
r^2	0.941	0.964	0.973	0.940	0.964	0.971	0.943	0.967	0.978
Varianza	1.128	0.525	0.273	3.211	1.586	0.766	3.495	1.756	0.788
Error	17.189	14.495	16.837	22.577	18.425	19.007	20.084	15.999	14.818

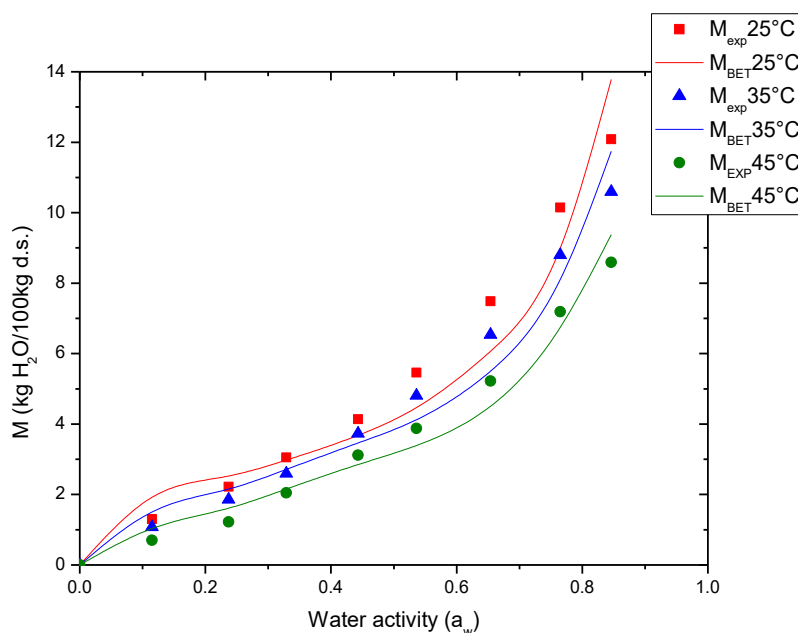


Figura 13. Isoterma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de B.E.T.

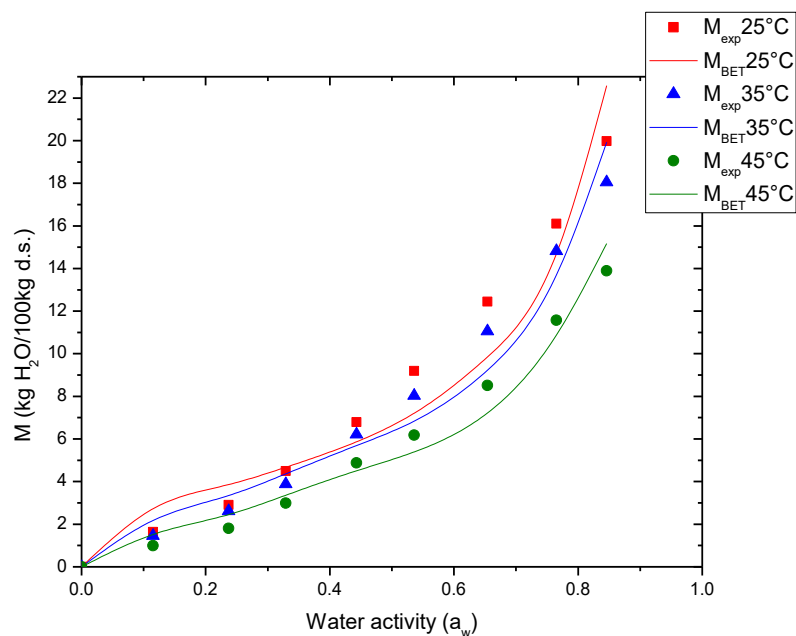


Figura 14. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 oC para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de B.E.T.

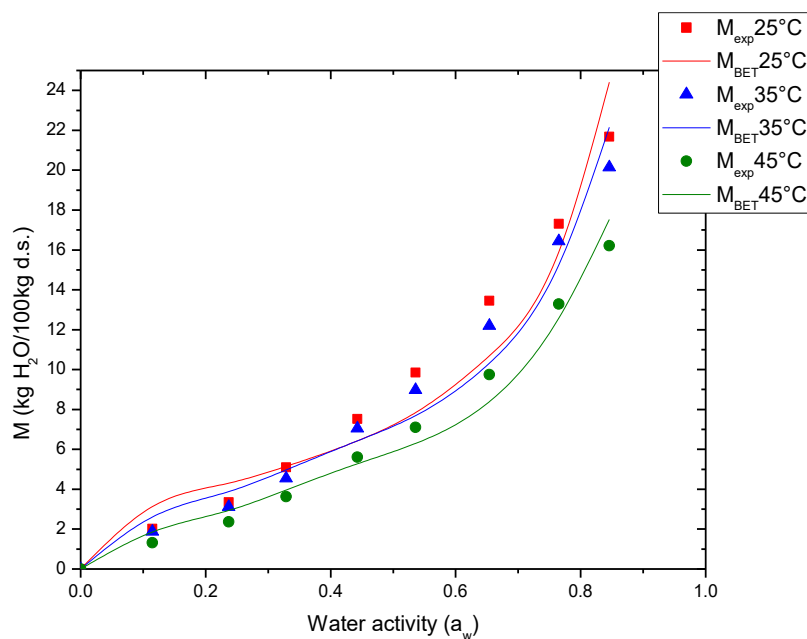


Figura 15. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de B.E.T.

Modelo de G.A.B.

La Tabla 3 presenta los parámetros estimados M_0 , C_G y K , obtenidos mediante el ajuste por mínimos cuadrados de los datos experimentales de adsorción del modelo G.A.B. Se obtuvo una descripción precisa de los datos experimentales con el modelo G.A.B., con valores medios del módulo relativo (E) inferiores al 5 % y valores de r^2 superiores a 0.998 para todos los casos y tipos de perlas de hidrogel (Monte et al., 2018). El parámetro M_0 se considera comúnmente un valor óptimo en el que un producto alimenticio es más estable. Este parámetro refleja la fracción de moléculas de agua fuertemente unidas a sitios específicos (Hoyos-Leyva et al., 2018). Los valores de M_0 presentan una tendencia negativa con la temperatura, lo que puede atribuirse a cambios estructurales en la matriz de biopolímeros. De hecho, el aumento de la temperatura de adsorción reduce el número de sitios activos donde se puede adsorber agua. El nivel de energía de activación aumenta con la temperatura, volviéndose relativamente inestable y rompiéndose los enlaces entre los sitios de adsorción y las moléculas de agua (Lago & Noreña, 2015).

Los valores de la monocapa (M_0) de las perlas de hidrogel fueron significativamente menores para las perlas AS-MN (1:0) (4.61-3.61 kg H₂O/100 kg de materia seca) que para las perlas de hidrogel AS-MN (1:1 y 1:1.5) (12.57-10.09 kg H₂O/100 kg de materia seca), lo que indica que el mucílago de nopal proporcionó un mayor número de sitios disponibles para la unión del agua en las perlas de hidrogel. Además, la variación entre los valores de la monocapa puede atribuirse a cambios estructurales y topológicos en la superficie de adsorción que experimentan los diferentes tipos de perlas de hidrogel al deshidratarse mediante convección de aire forzado durante su elaboración.

Tabla 3. Parámetros del modelo G.A.B. para las isotermas de adsorción AS-MN.

	1:0			1:1			1:1.5		
	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
M_0	4.608	4.129	3.607	12.496	11.492	10.090	12.574	11.643	10.417
C_G	2.799	2.762	2.292	1.371	1.333	1.173	1.551	1.540	1.319
K	0.803	0.820	0.820	0.689	0.710	0.696	0.704	0.729	0.724
r^2	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000

<i>Varianza</i>	0.050	0.029	0.015	0.086	0.061	0.034	0.050	0.042	0.015
<i>Error</i>	3.92	3.660	3.204	4.236	3.756	3.593	3.918	3.914	3.215

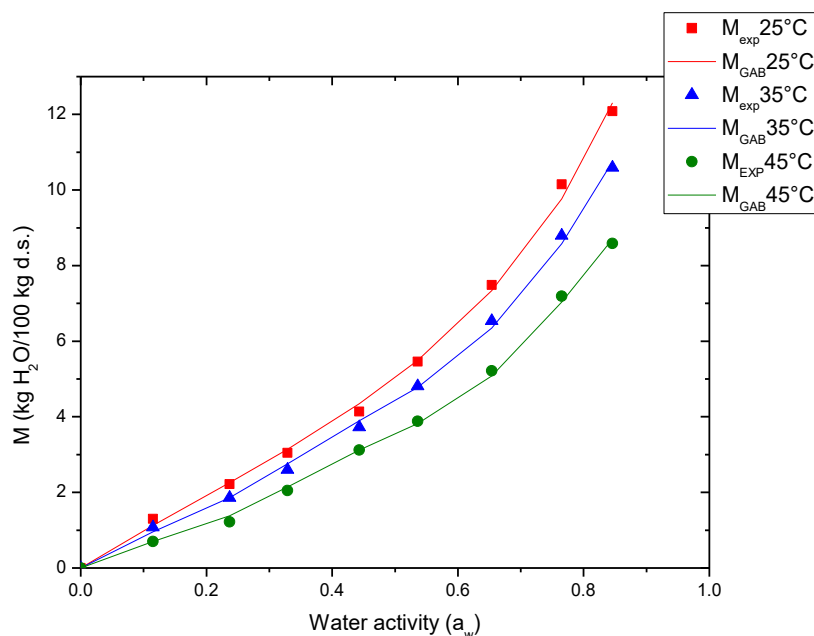


Figura 16. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0). Modelo de G.A.B.

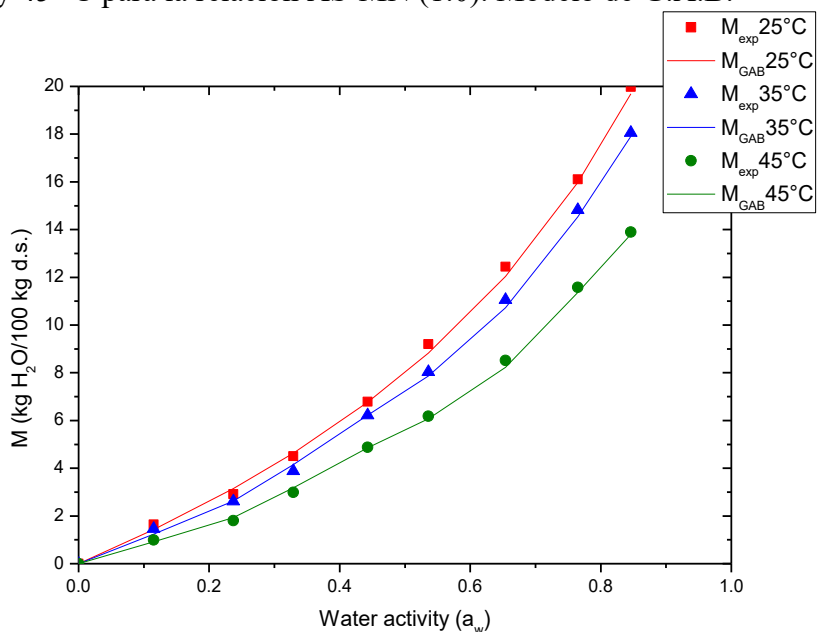


Figura 17. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-NM y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-NM (1:1) . Modelo de G.A.B.

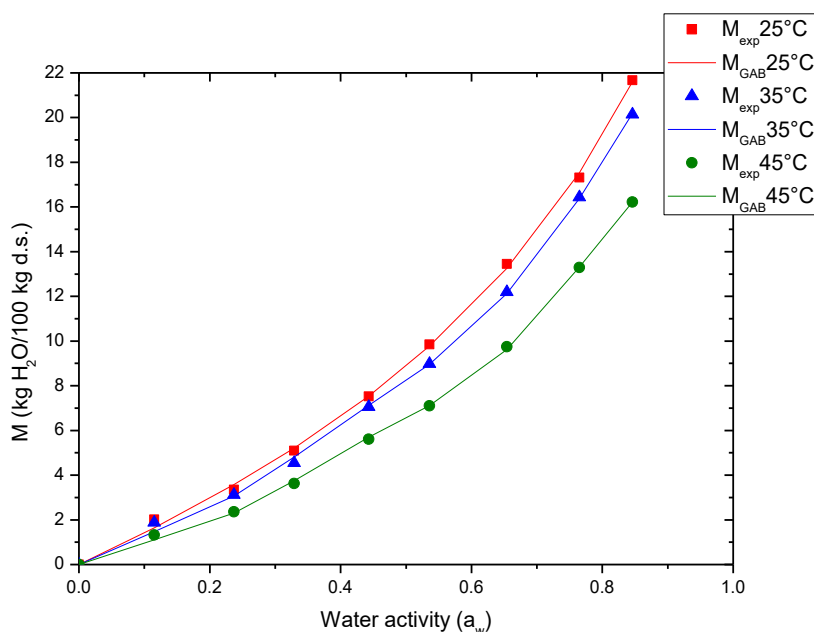


Figura 18. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de G.A.B.

El parámetro C_G de Guggenheim refleja la fuerza de unión de las moléculas de adsorción a los sitios activos primarios. Los resultados de la Tabla 3 mostraron que el parámetro C_G disminuyó con la temperatura, un comportamiento que se explica considerando que las interacciones adsorbente-adsorbato son exotérmicas (Diosady et al., 1996). Estos resultados sugieren que el parámetro C_G puede estar relacionado con el calor de adsorción. En el caso de las perlas de alginato de sodio, los enlaces entre la monocapa de agua y los sitios de unión disponibles de las perlas fueron los más fuertes, lo que a su vez sugiere que la estabilidad de las moléculas de agua adsorbidas en la superficie de las perlas aumentó (Hoyos-Leyva et al., 2018; Timmermann, 2003). Se ha señalado que el parámetro C_G podría carecer de interpretación física y es solo un parámetro de ajuste que desempeña el papel de un efecto compensatorio para los diferentes parámetros en el ajuste (Alpizar-Reyes et al., 2017).

El parámetro ***K*** de Guggenheim representa las interacciones multicapa-adsorbente y sus valores se encuentran entre las energías de la monocapa y del agua líquida (Pérez-Alonso et al., 2006). La teoría subyacente al modelo GAB indica que la monocapa de agua está fuertemente unida a la superficie, mientras que las multicapas son atraídas débilmente por el sólido. Las moléculas que no están directamente unidas a la superficie sólida presentan propiedades físicas similares a las del agua pura (Liébanes et al., 2006). En este estudio, todos los valores del parámetro ***K*** para los tres tipos de perlas de hidrogel AS-MN fueron inferiores a uno y oscilaron entre 0.69 y 0.82, lo que implica un estado mejor estructurado de las moléculas de agua en la capa adyacente a la monocapa de las perlas. Este efecto involucra moléculas de agua altamente ordenadas, de modo que su movilidad se ve fuertemente restringida. Por tanto, la disponibilidad de moléculas de agua para el deterioro y la descomposición de las perlas de hidrogel está limitada (Hoyos-Leyva et al., 2018).

Modelos semiempíricos

Modelo de Lewicki

Aunque no se pueden atribuir significados físicos a los parámetros de la ecuación de Lewicki, en contraste con el modelo de G.A.B. que predicen una adsorción finita cuando la actividad acuosa es igual a la unidad aun cuando no hay indicios de que el contenido de humedad adsorbido se estabilice en actividades acuosas muy altas, la ecuación de Lewicki se puede utilizar para describir isothermas de adsorción en actividades acuosas cercanas a 1 (Lewicki, 1998).

En la tabla 4 se aprecia que ambos parámetros de ajuste (***A*** y ***B***) tienen una tendencia decreciente al incrementarse la temperatura de adsorción y los valores más altos del parámetro ***A*** se encuentran para el sistema AS-MN (1:1.5), por lo que

al parecer el mucílago de nopal contribuye a que este parámetro sea más grande en magnitud, y además guarda una relación inversamente proporcional con la a_w .

Por el contrario, el parámetro **B** presenta los valores más grandes en magnitud en los hidrogeles formulados únicamente con AS y a su vez guarda una relación matemática tipo ley de potencia con respecto a la a_w .

Al observar los parámetros estadísticos de este modelo, el factor de correlación cuadrático presenta valores por debajo de 1, y el porcentaje de error valores significativamente muy altos respecto al 5% que se consideró como criterio de un adecuado ajuste matemático, por lo tanto, el modelo de Lewicki nos es pertinente para modelar el proceso de adsorción de este tipo de hidrogeles.

Tabla 4. Parámetros del modelo Lewicki para las isotermas de adsorción AS-MN.

	1:0			1:1			1:1.5		
	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
<i>A</i>	4.138	3.763	3.052	6.583	6.149	4.816	7.201	6.927	5.600
<i>B</i>	0.339	0.292	0.244	0.318	0.261	0.223	0.326	0.271	0.227
<i>r</i> ²	0.838	0.828	0.832	0.848	0.843	0.841	0.845	0.839	0.840
<i>Varianza</i>	3.108	2.529	1.679	8.125	6.939	4.273	9.487	8.628	5.626
<i>Error</i>	13.704	15.154	13.887	10.304	12.724	12.389	11.599	14.363	14.882

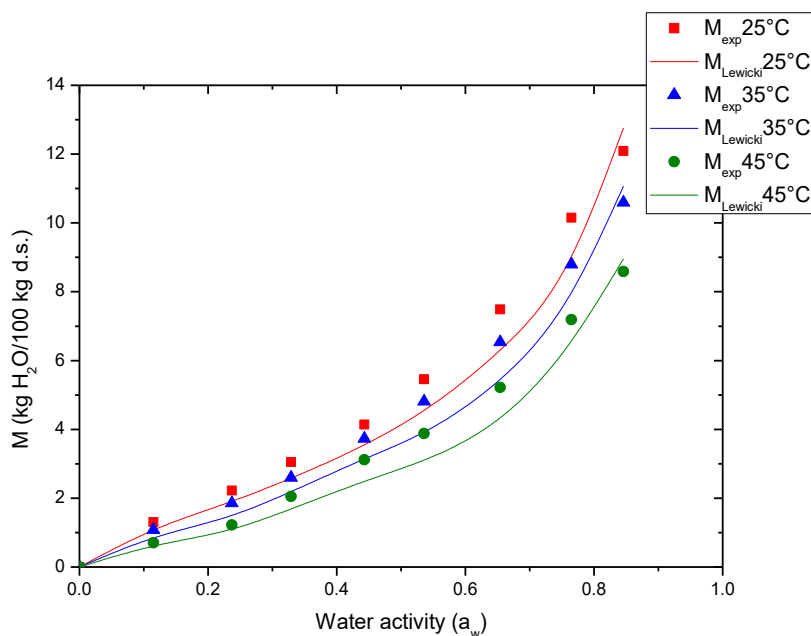


Figura 19. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de Lewicki

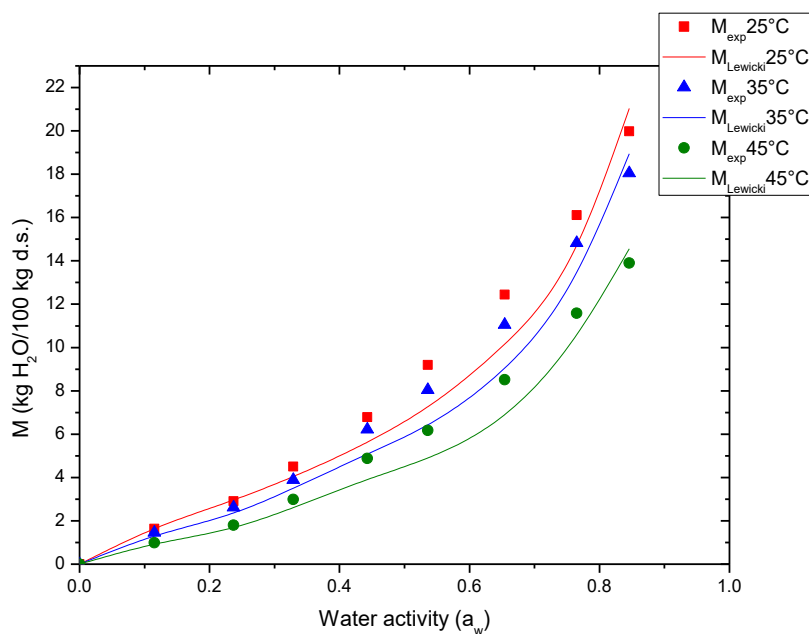


Figura 20. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de Lewicki

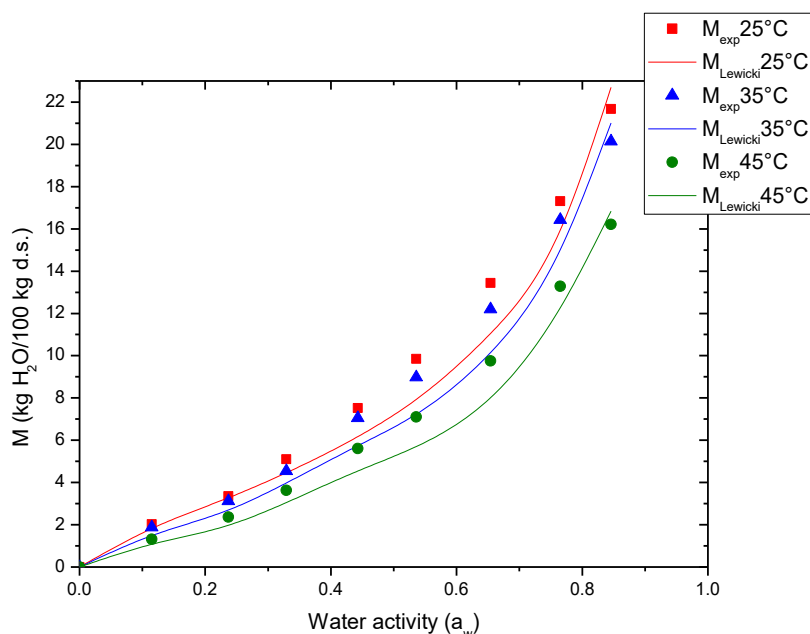


Figura 21. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de Lewicki

Modelo de Halsey

Este modelo fue desarrollado por Halsey para describir el fenómeno de la condensación de agua en las multicapas a una distancia relativamente grande desde la superficie del adsorbente (hidrogel), mediante los valores de los parámetros **A** y **B**, los cuales podemos observar que disminuyen a medida que la temperatura aumenta. Es por ello que de acuerdo a las figuras 22-25, se puede apreciar claramente que el modelo de Halsey ajusta adecuadamente las isothermas de los tres tipos de hidrogeles a altos valores de a_w , no así a valores bajos e intermedios. Esta expresión semiempírica ha sido probada por varios autores como Chirife & Iglesias (1978) quienes encontraron que la ecuación de Halsey podría usarse para describir razonablemente bien el comportamiento de adsorción de doscientos veinte materiales alimenticios diferentes en el intervalo aproximado de actividad de agua 0.10 a 0.80.

Los parámetros estadísticos que validan la correcta correlación de los datos experimentales con los valores teóricos que arroja el modelo de Halsey evidencian que los factores de correlación cuadrático fueron relativamente altos (> 0.95), pero el % de desviación relativa resultó ser muy alto ($>> 5\%$), por lo que se puede concluir que este modelo no describe adecuadamente el proceso de adsorción de vapor de agua en los hidrogeles en todo el intervalo de a_w estudiado.

Tabla 5. Parámetros del modelo Halsey para las isotermas de adsorción AS-MN.

	1:0			1:1			1:1.5		
	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
<i>A</i>	6.346	4.743	3.212	11.059	8.072	5.300	13.047	9.794	6.474
<i>B</i>	1.423	1.316	1.224	1.372	1.257	1.190	1.391	1.277	1.199
<i>r</i> ²	0.968	0.973	0.971	0.959	0.966	0.966	0.965	0.972	0.975
<i>Varianza</i>	0.567	0.363	0.273	2.056	1.397	0.857	1.991	1.386	0.830
<i>Error</i>	17.271	16.971	22.981	26.271	23.945	27.272	22.153	19.682	20.845

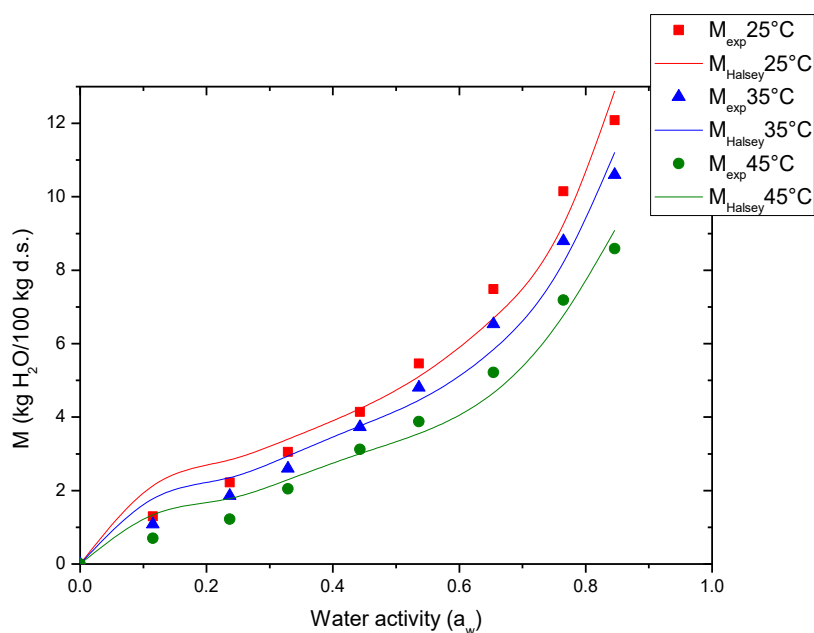


Figura 22. Isoterma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de Halsey

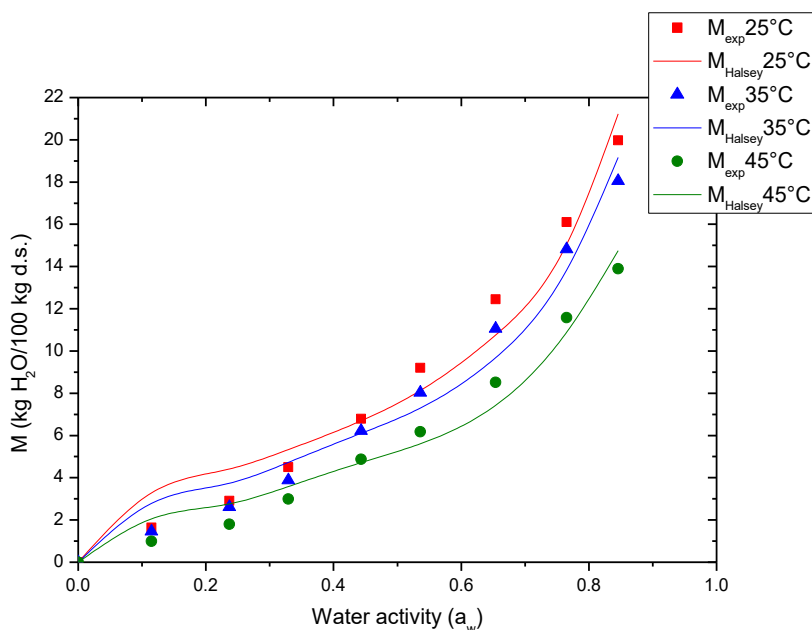


Figura 23. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de Halsey

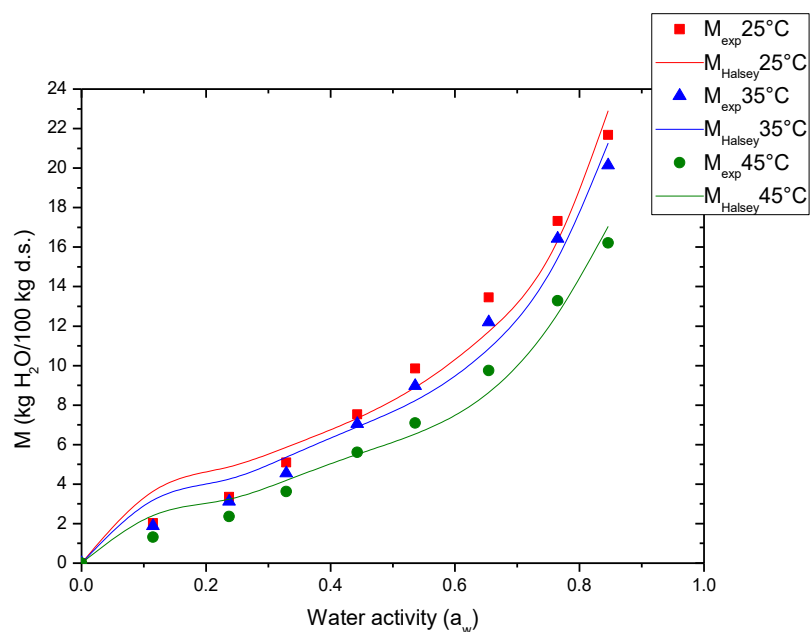


Figura 24. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de Halsey

Modelos empíricos

Modelo Oswin

El modelo de Oswin es simplemente una relación empírica que no considera el efecto de la temperatura. Aunque a pesar de su simplicidad, este modelo arrojó en su correlación con los datos experimentales aceptables porcentajes de desviación cercanos al 5% y factores de correlación cuadráticos relativamente altos ($r^2 > 0.985$). Este modelo ha sido considerado una buena opción para describir isothermas de alimentos con almidón, cárnicos y vegetales (McMinn & Al-Muhtaseb, 2002).

La tabla 6 muestra la tendencia que presentan los parámetros de ajuste del modelo de Oswin. El parámetro **A** fue disminuyendo su valor a medida que la adsorción se llevaba a cabo a mayor temperatura y para el sistema AS-MN (1:1.5) sus valores fueron más altos respecto a los otros sistemas de hidrogeles. Por otra parte, el parámetro **B** tuvo una tendencia contraria a su contraparte, el parámetro **A**, es decir, a medida que se incrementó la temperatura de adsorción, este parámetro disminuyó en su valor, por lo que se puede inferir que hubo una compensación entre ambos parámetros de ajuste que conllevaron a tener un aceptable ajuste sobretodo en valores intermedios de a_w en el intervalo estudiado. Se podría concluir que este modelo a pesar de su simplicidad correlaciono favorablemente los datos experimentales de adsorción.

Tabla 6. Parámetros del modelo Oswin para las isothermas de adsorción AS-MN.

	<i>1:0</i>			<i>1:1</i>			<i>1:1.5</i>		
	<i>25 °C</i>	<i>35 °C</i>	<i>45 °C</i>	<i>25 °C</i>	<i>35 °C</i>	<i>45 °C</i>	<i>25 °C</i>	<i>35 °C</i>	<i>45 °C</i>
<i>A</i>	4.920	4.496	3.658	7.817	7.349	5.776	8.559	8.286	6.730
<i>B</i>	0.555	0.588	0.626	0.577	0.618	0.646	0.568	0.607	0.640
<i>r²</i>	0.987	0.991	0.990	0.982	0.987	0.987	0.986	0.990	0.992
<i>Varianza</i>	0.225	0.122	0.092	0.886	0.545	0.334	0.775	0.472	0.260
<i>Error</i>	8.909	8.165	11.736	15.685	12.909	14.861	12.277	9.615	9.961

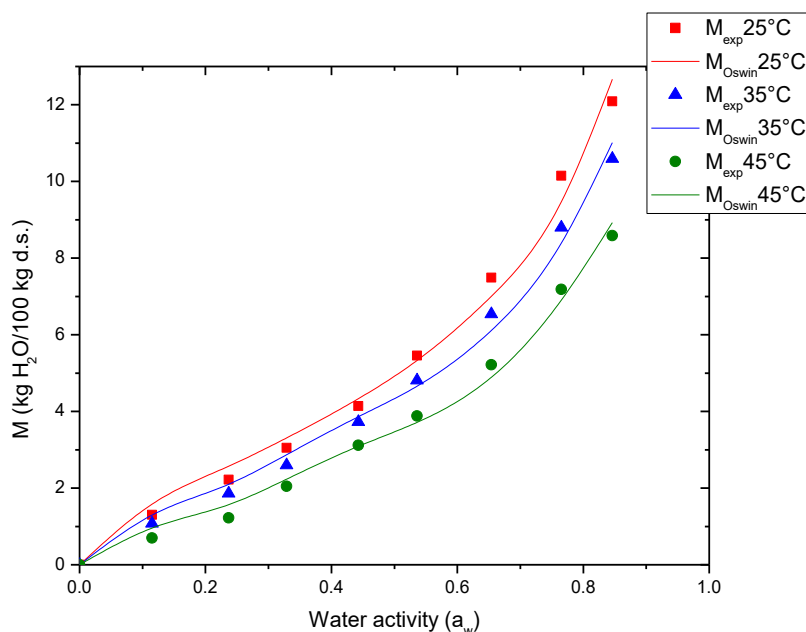


Figura 25. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de Oswin

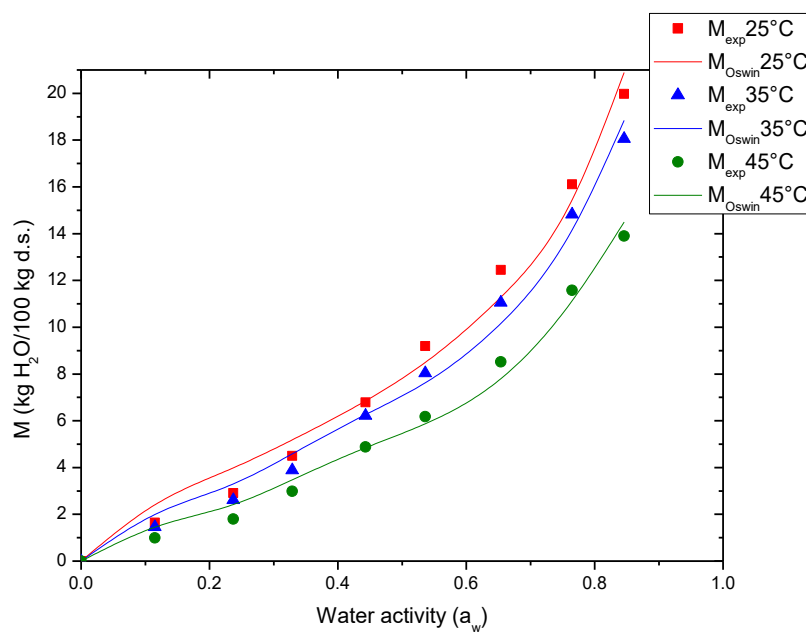


Figura 26. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de Oswin

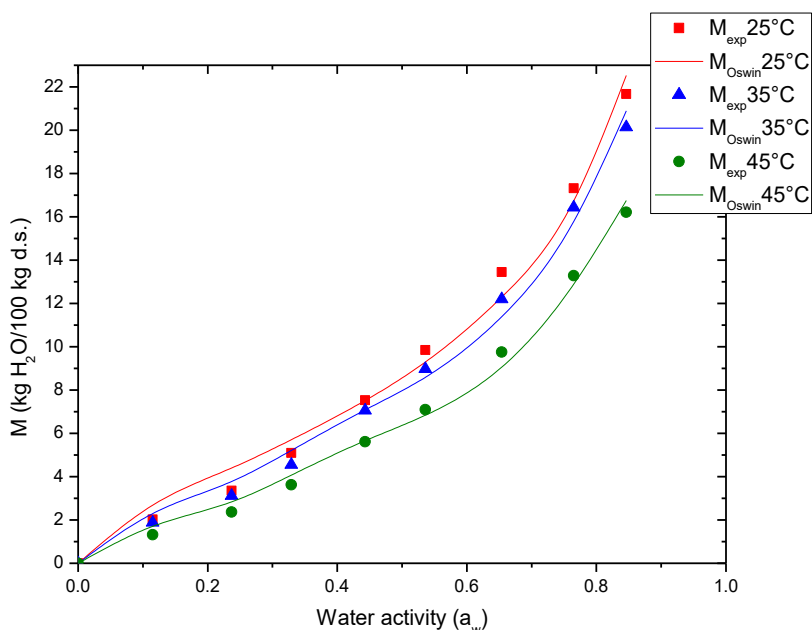


Figura 27. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de Oswin

Modelo Henderson-Thompson

El modelo de Henderson-Thompson es otra expresión empírica ampliamente utilizada para describir los procesos de adsorción – desorción de alimentos. Nuevamente, aunque esta expresión no contempla una descripción fenomenológica de este proceso fisicoquímico y no toma en cuenta la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso de sorción; sus resultados son competitivos con modelos que contemplan los fundamentos teóricos de la adsorción.

En este sentido, el comportamiento de ambos parámetros de ajuste de este modelo presentó la misma tendencia que el modelo de Oswin, es decir, los valores del parámetro **A** aumentaron a medida que la temperatura de adsorción se incrementa sin importar el tipo de hidrogel. Mientras que el parámetro **B** sus valores fueron disminuyendo conforme la temperatura se incrementaba (tabla 7).

El factor de correlación cuadrático resultó ser alto para todos los casos estudiados ($r^2 > 0.998$) y el porcentaje de error menor al 5%, por lo que desde un punto de vista

empírico este modelo describe adecuadamente el proceso de adsorción de los tres tipos de hidrogeles producidos en el intervalo de temperatura estudiado. Lo anterior se valida al observar las figuras 28-30 donde se aprecia que el modelo describe satisfactoriamente los datos experimentales de la misma manera que lo hizo el modelo de G.A.B.

Tabla 7. Parámetros del modelo Henderson-Thompson para las isothermas de adsorción AS-MN.

	<i>1:0</i>			<i>1:1</i>			<i>1:1.5</i>		
	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C	25 °C	35 °C	45 °C
<i>A</i>	0.112	0.129	0.173	0.073	0.085	0.115	0.064	0.072	0.097
<i>B</i>	1.123	1.093	1.040	1.077	1.033	1.003	1.097	1.055	1.014
<i>r</i> ²	0.998	0.999	0.999	0.998	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999
<i>Varianza</i>	0.042	0.019	0.006	0.109	0.065	0.041	0.069	0.047	0.019
<i>Error</i>	4.151	4.438	2.827	4.503	4.135	3.876	4.100	3.951	2.960

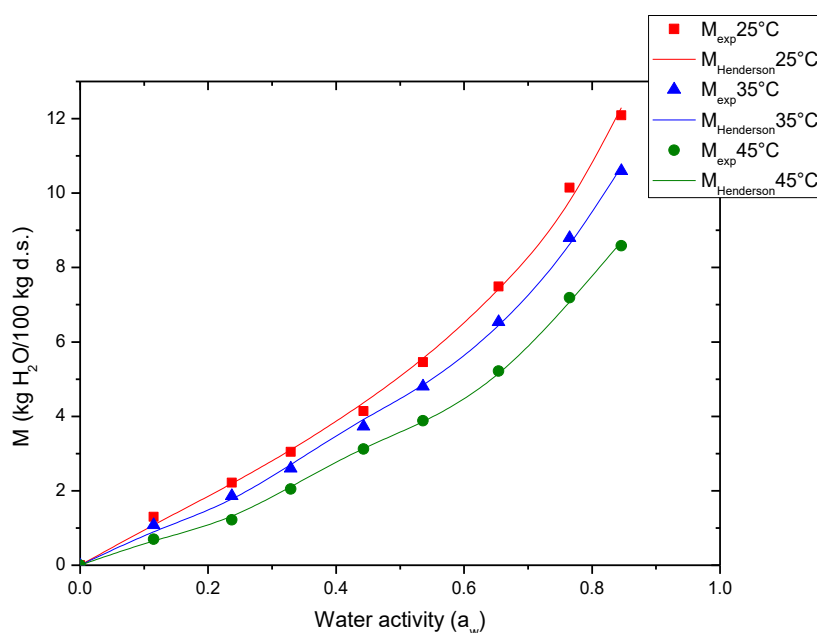


Figura 28. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:0) . Modelo de Henderson-Thompson

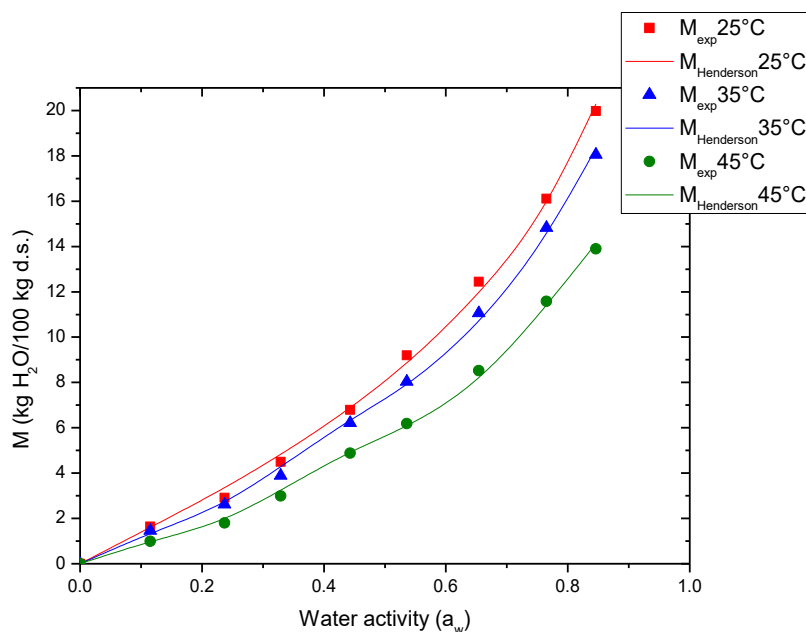


Figura 29. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí a 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1) . Modelo de Henderson-Thompson

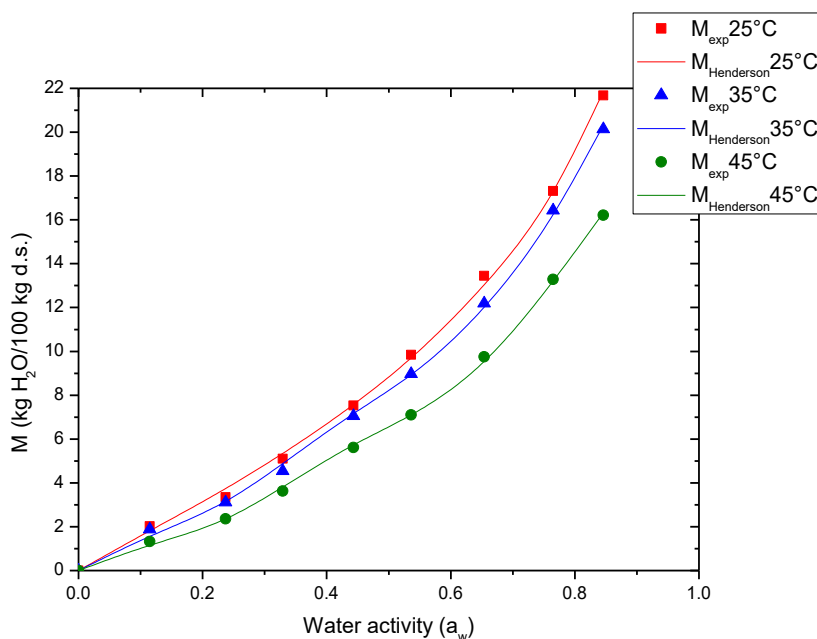


Figura 30. Isotherma de adsorción de agua del hidrogel AS-MN y aceite de ajonjolí 25, 35 y 45 °C para la relación AS-MN (1:1.5) . Modelo de Henderson-Thompson



CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- Las isotermas de adsorción de las microesferas de hidrogel presentaron una forma sigmoideal tipo II, característica de materiales porosos donde la adsorción se da en la monocapa y multicapas.
- El contenido de humedad en equilibrio mostró una marcada reducción al aumentar la temperatura de adsorción en todo el intervalo de actividad de agua estudiado. Mientras que el mucilago de nopal contribuyo de manera significativa a incrementar la capacidad de adsorción de humedad debido a sus propiedades intrínsecas de este hidrocoloide.
- La conocida ecuación de G.A.B. mostró una satisfactoria precisión para modelar la adsorción de humedad de las microesferas de hidrogel en todo el intervalo de actividad de agua de 0.11 a 0.85 y temperaturas de 25, 35 y 45 °C.
- El modelo empírico de Henderson-Thompson describió adecuadamente y de manera competitiva con el modelo de G.A.B. el proceso de adsorción de vapor de agua en los tres tipos de hidrogeles producidos, donde se aprecia una compensación entre los valores de los parámetros **A** y **B** de acuerdo a la tendencia que presentaron.



REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Abou-Gharbia, H. A., Adel, A. Y., & Shahidi, F. (2000). Effect of processing on oxidative stability and lipid classes of sesame oil. ***Food Research International***, 33(5), 331–340.
- Adamiec, J. (2009). Moisture sorption characteristics of peppermint oil microencapsulated by spray drying. ***Drying Technology***, 27(12), 1363–1369.
- Alkhatib, H., Doolaanea, A. A., Assadpour, E., Sabere, A. S. M., Mohamed, F., & Jafari, S. M. (2022). Optimizing the encapsulation of black seed oil into alginate beads by ionic gelation. ***Journal of Food Engineering***, 328, 111065.
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. ***Food and Bioprocess Processing***, 80(2), 118-128.
- Alpaslan, D., Erşen Dudu, T., & Aktas, N. (2022). Agar and sesame oil based organo-hydrogels as a pharmaceutical excipient in paracetamol/carboplatin release systems. ***Indian Journal of Pharmaceutical Sciences***, 84(2), 358–368.
- Alpizar-Reyes, E., Carrillo-Navas, H., Romero-Romero, R., Varela-Guerrero, V., Alvarez-Ramírez, J., & Pérez-Alonso, C. (2017). Thermodynamic sorption properties and glass transition temperature of tamarind seed mucilage (*Tamarindus indica* L.). ***Food and Bioprocess Processing***, 101, 166–176.
- Aluganti Narasimhulu, C., Burge, K. Y., Doomra, M., Riad, A., & Parthasarathy, S. (2018). Primary prevention of atherosclerosis by pretreatment of low-density lipoprotein

receptor knockout mice with sesame oil and its aqueous components. **Scientific Reports**, 8, 12270.

Alvarenga, E. S. de. (2011). *Characterization and properties of chitosan* (Cap. 5). En M. Elnashar (Ed.), **Biotechnology of biopolymers** (pp. 91–108).

Amiri, M. S., Mohammadzadeh, V., Taghavizadeh Yazdi, M. E., Barani, M., Rahdar, A., & Kyzas, G. Z. (2021). Plant-based gums and mucilages applications in pharmacology and nanomedicine: A review. **Molecules**, 26(6), 1770.

Aslam, M., Shabbir, M. A., Pasha, I., Shukat, R., Siddique, U., Manzoor, M. F., & Ayub, S. (2020). Protective effect of sesame (*sesamum indicum*) seed oil against hypercholesterolemic in sprague-dawley male rats. **Food Science and Technology**, 1, 1-5.

Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). *Biological effects of essential oils – A review*. **Food and Chemical Toxicology**, 46(2), 446-475.

Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M., Mousa, A., & Liang, L. (2016). Microencapsulation of Oils: A Comprehensive Review of Benefits, Techniques, and Applications. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 15(1), 143–182.

Benavides, S., Cortés, P., Parada, J., & Franco, W. (2016). Development of alginate microspheres containing thyme essential oil using ionic gelation. **Food Chemistry**, 204, 77–83

Bhatia, S. (2016). *Natural polymer drug delivery systems: Nanoparticles, plants, and algae*. **Springer International Publishing**.

- Bińkowska, W., Szpicer, A., Wojtasik-Kalinowska, I., & Półtorak, A. (2024). Innovative methods of encapsulation and enrichment of cereal-based pasta products with biofunctional compounds. ***Applied Sciences***, 14(4), 1442-1452.
- Blahovec, J., & Yanniotis, S. (2009). Modified classification of sorption isotherms. ***Journal of Food Engineering***, 91(1), 72–77
- Brunauer, S., Emmett, P.H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. ***Journal of the American Chemical Society***, 60, 309-319.
- Cabané, P., Alvo, A., Neira-Carrillo, A., Caviedes, P., & Gac, P. (2011). Microencapsulación de células y tejido para terapia celular. ***Revista de la Sociedad Química de Chile***, 56(2), 779–786.
- Chirife, J., & Iglesias, H. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 - review. ***Journal of Food Technology***, 13, 159-174.
- Choudhury, N., Meghwal, M., & Das, K. (2021). *Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods*. ***Food Frontiers***, 2(94), 1–10.
- Choudhury, N., Meghwal, M., & Das, K. (2021). *Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods*. ***Food Frontiers***, 2(4), 426–442.
- Ciurzynska, A., Jasiorowska, A., Ostrowska-Ligęza, E., & Lenart, A. (2019). The influence of the structure on the sorption properties and phase transition temperatures of freeze-dried gels. ***Journal of Food Engineering***, 252, 18–27
- Cortés-Camargo, S., Acuña-Avila, P.E., Rodríguez-Huezo, M.E., Román-Guerrero, A., Varela-Guerrero, V., & Pérez-Alonso, C. (2019). Effect of chia mucilage addition on oxidation and release kinetics of lemon essential oil microencapsulated using

mesquite gum – chia mucilage mixtures. ***Food Research International*** 116, 1010-1019.

Cortés-Camargo, S., Cruz-Olivares, J., Barragán-Huerta, B. E., Dublán-García, O., Román-Guerrero, A., & Pérez-Alonso, C. (2017). Microencapsulation by spray drying of lemon essential oil: Evaluation of mixtures of mesquite gum–nopal mucilage as new wall materials. ***Journal of Microencapsulation***, 34(4), 395–407.

Desai, K. G., & Park, H. J. (2005). Current advances in microencapsulation of bioactive compounds for food applications. ***Preparative Biochemistry & Biotechnology***, 35(2), 169–195.

Desai, K. G., & Park, H. J. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. ***Drying Technology***, 23(7), 1361-1394.

Dhifi, W., Bellili, S., Jazi, S., Bahloul, N., & Mnif, W. (2016). *Essential Oils' Chemical Characterization and Investigation of Some Biological Activities: A Critical Review. Medicines*, 3(4), 25.

Diosady, L. L., Rizvi, S. S. H., Cai, W., & Jagdeo, D. J. (1996). Moisture sorption isotherms of canola meals, and applications to packaging. ***Journal of Food Science***, 61(1), 204–208.

Draget, K. I., & Taylor, C. (2011). Chemical modification and physicochemical ordering of alginate. ***Food Hydrocolloids***, 25(2), 297–304.

El Hariri El, M. C., Maizi, J., Alghoraibi, I., Siah, A., Khelissa, O., & El Gueddari, N. E. (2022). Valorization of the olive pomace extract by encapsulation in alginate-based hydrogels: Synthesis, characterization and in vitro release. ***Food Chemistry***, 373, 131349.

- Espinosa Andrews, H., Yunuen García Carvajal, Z., & García Márquez, E. (Eds.). (2017). *Avances en la seguridad y actividad biológica de sustancias bioactivas y probióticos. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ)*. ISBN 978-607-97548-6-0
- Ezhilarasi, P. N., Dasappa, I., Jena, B. S., & Chinnaswamy, A. (2013). Freeze drying technique for microencapsulation of Garcinia fruit extract and its effect on bread quality. *Journal of Food Engineering*, 117, 513–520.
- Fang, Z., & Bhandari, B. (2010). Encapsulation of polyphenols – a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(10), 510–523.
- Fikry, M., Benjakul, S., Al-Ghamdi, S., Mittal, A., Nilsuwan, K., Fulleros, R., & Dabbour, M. (2023). Sorption isotherms and thermodynamic characteristics of gelatin powder extracted from whitefish skin: Mathematical modeling approach. *Foods*, 13, 92.
- Fuentes-Ortega, T., Martínez-Vargas, S.L., Cortés-Camargo, S., Guadarrama-Lezama, A.Y., Gallardo-Rivera, R., Baeza-Jiménez, R., & Pérez-Alonso, C. (2017). Efectos de las variables de proceso en la microencapsulación del aceite de ajonjolí (*Sesamum indica* L.) mediante secado por aspersión. [Effects of the process variables of microencapsulation sesame oil (*Sesamum indica* L.) by spray drying]. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 16(2), 477-490.
- Galus, S., & Lenart, A. (2013). Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin. *Journal of Food Engineering*, 115(4), 459–465
- García, C., Martínez, A., Ortega, J., & Castro, F. (2010). *Componentes químicos y su relación con las actividades biológicas de algunos extractos vegetales. Química Viva*, 9(2), 86–96.

- García, S. R., Calva, V. J. S., & Sánchez, R. L. R. (2004). Uso de la maltodextrina como agente encapsulante en el secado por aspersión. ***Revista de la Sociedad Química de México***, 48(3), 229–236.
- George, A., Shah, P. A., & Shrivastav, P. S. (2019). Natural biodegradable polymers based nano-formulations for drug delivery: A review. ***International Journal of Pharmaceutics***, 561, 244–264.
- George, M., & Abraham, T. E. (2006). Polyionically cross-linked alginate–chitosan microcapsules for encapsulation of yeast cells. ***Journal of Bioactive and Compatible Polymers***, 21(4), 384–398.
- González-Rodríguez, A. M., Vargas-Pérez, J., & Torres-Peña, A. (2024). *Importancia de la encapsulación de probióticos: gelificación iónica y coacervación compleja como técnicas prometedoras para uso alimentario. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 22(1), e18684.
- Gouin, S. (2004). Microencapsulation: Industrial appraisal of existing technologies and trends. ***Trends in Food Science & Technology***, 15(7–8), 330–347.
- Gouveia, L. de A. V., Zago, L., & Moreira, A. S. B. (2017). Physical-chemical characterization and nutritional quality of sesame oil (*Sesamum indicum* L.). ***Journal of Nutritional Health & Food Science***, 5(3), 1–6
- Gu, X. L., Zhu, X., Kong, X. Z., & Tan, Y. (2010). Comparisons of simple and complex coacervations for preparation of sprayable insect sex pheromone microcapsules and release control of the encapsulated pheromone molecule. ***Journal of Microencapsulation***, 27(4), 355–364.

Hashempour-Baltork, F., Torbati, M., Azadmard-Damirchi, S., & Savage, G. P. (2018). Chemical, rheological and nutritional characteristics of sesame and olive oils blended with linseed oil. **Advanced Pharmaceutical Bulletin**, 8(1), 107–113.

Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., & Alvarez-Ramirez, J. (2018). Thermodynamic criteria analysis for the use of taro starch spherical aggregates as microencapsulant matrix. **Food Chemistry**, 259, 175–180

Hwang, L. S. (2020). Sesame oil. En S. Agarwal (Ed.), **Bailey's industrial oil and fat products** (Vol. 2, pp. 1–39). Wiley-Interscience.

Imran, M, Khan, MK, Ali, M, Nadeem, M, Mushtaq, Z, Ahmad, MH, et al. *Cold pressed sesame (Sesamum indicum) oil*. **Cold Press Oils**. (2020) 2020:105–11.

Instituto Nacional del Cáncer (NCI). (s.f.). *Aceite esencial*. En *Diccionario de cáncer del NCI*. Recuperado el 20 de agosto de 2025, de <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/aceite-esencial>

Jain, A., Gupta, A., Jain, U., Khan, Z., & Ali, I. (2016). Fabrication, characterization and cytotoxicity studies of ionically cross-linked docetaxel loaded chitosan nanoparticles. **Carbohydrate Polymers**, 137, 65-74.

Jiang, Q., Christen, S., Shigenaga, M.K., & Ames, B.N. (2001). *γ-tocopherol the major form of vitamin E in the US diet deserves more attention*. **American Journal of Clinical Nutrition**, 74, 714–22.

Joshi, N., Rawat, K., & Bohidar, H. B. (2018). pH and ionic strength induced complex coacervation of pectin and gelatin A. **Food Hydrocolloids**, 71, 246–254.

- Katayama, S., Sugiyama, H., Kushimoto, S., Uchiyama, Y., Hirano, M., & Nakamura, S. (2016). Effects of sesaminol feeding on brain A β accumulation in a senescence-accelerated mouse-prone 8. ***Journal of Agricultural and Food Chemistry***, 64(24), 4908–4913.
- Korać, R. R., & Khambholja, K. M. (2011). Potential of herbs in skin protection from ultraviolet radiation. ***Pharmacognosy Reviews***, 5(10), 164–173.
- Kuklinski, C. (2000) *Farmacognosia: estudio de las drogas y sustancias medicamentosas de origen natural*. Barcelona: **Ediciones Omega**.
- Lago, C. C., & Noreña, C. P. Z. (2015). Thermodynamic analysis of sorption isotherms of dehydrated yacon (*Smallanthus sonchifolius*) bagasse. ***Food Bioscience***, 12, 26–33.
- Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. ***Progress in Polymer Science***, 37(1), 106–126.
- Li, J., Feng, S., Zhang, W., & Ma, F. (2009). Study of pH-sensitive alginate-chitosan microcapsules for oral delivery of vitamin E. ***Journal of Agricultural and Food Chemistry***, 57(9), 3749–3754.
- Liébanes, M. D., Aragón, J. M., Palancar, M. C., Arévalo, G., & Jiménez, D. (2006). Equilibrium moisture isotherms of two-phase solid olive oil by-products: Adsorption process thermodynamics. ***Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects***, 282–283, 298–306.
- Liu, H., Zhao, G., Wu, K., Li, D., & Wang, L. (2025). Unraveling the biochemical composition and potential applications of sesame seed and its oilseed cake. ***Food Chemistry: X***, 25, 101019.

- Liu, Y.-X ., Jiang , R.-Y., Hu, B.-B., Wang, D.-M., & Liu, H.-M. (2025). A novel method for rapid refining of fragrant sesame oil via electrolyte-assisted natural sedimentation. **LWT - Food Science and Technology** 219, 117546.
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release – a review. **International Journal of Food Science and Technology**, 41(1), 1–21.
- Martínez, A. M. (2003, febrero). Aceites esenciales. Universidad de Antioquia, **Facultad de Química Farmacéutica**. Recuperado de https://www.med-informatica.com/OBSERVAMED/Descripciones/AceitesEsencialesUdeA_esencias_2001b.pdf
- Martins, E., Poncelet, D., Rodrigues, R. C., & Renard, D. (2017). Oil encapsulation techniques using alginate as encapsulating agent: *Applications and drawbacks*. **Journal of Microencapsulation**, 34(8), 754–771.
- Matos, M., Luque, S., & Gutiérrez, G. (2020). Formulación y estabilidad de emulsiones para encapsulación de biocompuestos. **Anales de Química**, 116(2), 69–80.
- McMinn, W.A.M., & Al-Muhtaseb, A.H., (2002), Moisture sorption isotherms characteristics of food products: a review. **Trans IChemE Part C**, 8, 118-128.
- Medina-Torres, L., García de la Cruz, E. E., Calderas, F., González Laredo, R. F., Sánchez- Olivares, G., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., & Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus indica*). **Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie-Food Science and Technology**, 50(2), 642–650

- Menin, A., Facca, S., Calligaris, S., & Confalonieri, D. (2018). Effects of microencapsulation by ionic gelation on the oxidative stability of flaxseed oil. ***Food Chemistry***, 240, 33–39.
- Mohamed, E. A., Ahmed, H. I., Zaky, H. S., & Badr, A. M. (2021). *Sesame oil mitigates memory impairment, oxidative stress, and neurodegeneration in a rat model of Alzheimer’s disease: A pivotal role of NF-κB/p38MAPK/BDNF/PPAR-γ pathways. Journal of Ethnopharmacology*, 267, 113468.
- Mokh, A.A.A., Abdelhady, D.H., Ghazy, E.W., Aboumosalem, H., & Goda, W.M. (2019). *Sesame oil mitigates initiation stage of diethylnitrosamine hepatocarcinogenesis in rats. Slovenian Veterinary Research*, 56, 487–98.
- Monte, M. L., Moreno, M. L., Senna, J., Arrieche, L. S., & Pinto, L. A. A. (2018). Moisture sorption isotherms of chitosan-glycerol films: Thermodynamic properties and microstructure. ***Food Bioscience***, 22, 170–177
- Monteiro, É. M. H., Chibli, L. A., Yamamoto, C. H., Pereira, M. C. S., Vilela, F. M. P., Rodarte, M. P., De Oliveira Pinto, M. A., Da Penha Henriques do Amaral, M., Silvério, M. S., De Matos Araújo, A. L. S., Da Luz André de Araújo, A., Del-Vechio-Vieira, G., & De Sousa, O. V. (2014). *Antinociceptive and Anti-Inflammatory Activities of the Sesame Oil and Sesamin. Nutrients*, 6(5), 1931-1944.
- Muangrat, R., & Lertbuaban, P. (2025). Comparison of roasting and vacuum microwave drying treatments on physicochemical properties of supercritical CO₂-extracted oil from black sesame seeds. ***Journal of Agriculture and Food Research***, 19, 101583.
- Muchiutti, G. S., López Novello, L. H., Córscico, F. A., & Larrosa, V. J. (2019). Cápsulas de alginato para la protección de polifenoles presentes en el aceite esencial de orégano. ***Ciencia, Docencia y Tecnología***, 30(59), 297–309.

- Murúa-Pagola, B., Beristain, C. I., & Martínez-Bustos, F. (2009). Microencapsulación de alimentos. **Ciencia y Tecnología Alimentaria**, 7(1), 59–67.
- Nader, M. A., & Baraka, H. N. (2012). Effect of betulinic acid on neutrophil recruitment and inflammatory mediator expression in lipopolysaccharide-induced lung inflammation in rats. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**, 46(1–2), 106–113.
- Napiórkowska, A., & Kurek, M. (2022). Coacervation as a Novel Method of Microencapsulation of Essential Oils-A Review. **Molecules**, 27(16), 5142.
- Nedović, V., Kalusević, A., Manojlović, V., Lević, S., & Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. **Procedia Food Science**, 1, 1806–1815.
- Nejatian, M., Yazdi, A.P.G., Fattahi, R., Saberian, H., Bazsefidpar, N., Assadpour, E., & Jafari, S.M.. (2024). Improving the storage and oxidative stability of essential fatty acids by different encapsulation methods; a review. **International Journal of Biological Macromolecules** 260, 29548.
- Nguyễn Thị Thanh Uyên, Z. A. A. Hamid, N. X. T. Trâm, & N. Ahmad. (2020). Synthesis and characterization of curcumin loaded alginate microspheres for drug delivery. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, 58, 101796.
- Nirmala, D., Mandip, S., Bably, K., & Tarun, K.M. (2017). Encapsulation of active ingredients in polysaccharide–protein complex coacervates. **Advances in Colloid and Interface Science**, 239, 136-145.
- Oboulbiga, E. B., Douamba, Z., Compaoré-Séréomé, D., Semporé, J. N., Dabo, R., Semde, Z., Tapsoba, F. W., Hama-Ba, F., Songré-Ouattara, L. T., Parkouda, C., & Dicko, M. H. (2023). Physicochemical, potential nutritional, antioxidant and health properties of sesame seed oil: a review. **Frontiers in Nutrition**, 10, 1127926.

- Omer, N., Choo, Y.-M., Ahmad, N., & Mohd Yusof, N. S. (2021). Ultrasound-assisted encapsulation of Pandan (*Pandanus amaryllifolius*) extract. **Ultrasonics Sonochemistry**, 79, 105793.
- Onsaard, E., Putthanimon, J., Singthong, J. & Thammarutwasik, P. (2018). Oxidation stability of sesame oil encapsulated by spray drying. **International Food Research Journal**, 25(2), 784-792.
- Ortiz-Romero, N., Ochoa-Martínez, L. A., González-Herrera, S. M., Rutiaga-Quiñones, O. M., & Gallegos-Infante, J. A. (2021, agosto). Avances en las investigaciones sobre la encapsulación mediante gelación iónica: una revisión sistemática. **TecnoLógicas**, 24(52), 1962.
- Özbek, Z. A. (2017). A review on encapsulation of oils. **CBU Journal of Science**, 13(2), 293-309.
- Paniwnyk, L., & Herceg, Z. (2014). Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins. **Journal of Food Engineering**, 121, 15–23.
- Pascual-Pineda, L. A., Alamilla-Beltrán, L., Gutiérrez-López, G. F., Azuara, E., & Flores-Andrade, E. (2017). Predicción de condiciones de almacenamiento de alimentos deshidratados a partir de una isoterma de adsorción de vapor de agua. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, 16(1), 207-220.
- Pérez-Alonso, C., Beristain, C.I., Lobato-Calleros, C., Rodríguez-Huezo, M.E., & Vernon-Carter, E.J. (2006). Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. **Journal of Food Engineering**, 77(4), 753-760.
- Pérez-Alonso, C., Fabela-Morón, M. F., Guadarrama-Lezama, A. Y., Barrera-Pichardo, J. F., Alamilla-Beltrán, L., & Rodríguez-Huezo, M. E. (2009). Interrelationship between

the structural features and rehydration properties of spray dried Manzano chilli sauce microcapsules. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, 8(2), 187–196.

Pérez-Alonso, L. E., Velezmoro, M. A., Torres-Juárez, V. M. G., & Beristain, C. I. (2009). Microencapsulation of lime essential oil by spray drying. **Journal of Food Engineering**, 91(3), 380–386.

Poshadri, A., & Kuna, A. (2010). Microencapsulation technology: A review. **Journal of Research ANGRAU**, 38(1), 86–102.

Pudziuvelyte, L., Marksa, M., Sosnowska, K., Winnicka, K., Morkuniene, R., & Bernatoniene, J. (2020). Freeze-Drying Technique for Microencapsulation of Elsholtzia ciliata Ethanolic Extract Using Different Coating Materials. **Molecules**, 25(9), 2237.

Ruiz Mora, F. E., Córdova Suárez, M. A., Silva Ordóñez, M. P., & Álvarez Núñez, M. F. (2023). Estudio de la estabilidad del aceite de ajonjolí (*Sesamum Indicum* L.) empleando antioxidantes. **Revista de Investigación TALENTOS**, 10(2), 29–40.

s J., He, Y., Sun, Y., Huang, J., Sun, Q., & Deng, Z. (2025). Roasting increases the oil yield of sesame seeds by altering the amino acid composition and secondary structure of the sesame protein. **Food Bioscience** 68, 106491.

Sandoval Aldana, A., Rodríguez Sandoval, E., & Ayala Aponte, A. (2004). Encapsulación de aditivos para la industria de alimentos. **Ingeniería y Competitividad**, 5(2), 73–88.

Sandoval-Torres, S., Sandoval-Torres, P. J., & Torres-Zepeda, M. G. (2004). Microencapsulación de saborizantes por secado por aspersión. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, 3(2), 173–181.

- Santosa, T. P., Michelon, M., & colaboradores. (2021). *Microfluidics for assessing the formation and stability of oil-in-water emulsions based on components of bioprocesses. Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP).*
- Saqib, M.N., Khaled, B.M., Liu, F., & Zhong, F. (2022). Hydrogel beads for designing future foods: Structures, mechanisms, applications, and challenges. ***Food Hydrocolloids for Health***, 2, 100073.
- Schrooyen, P. M. M., Meer, R. V. D., & De Kruif, C. G. (2001). Microencapsulation: Its application in nutrition. ***Proceedings of the Nutrition Society***, 60(4), 475–479.
- Shukla, P. S., Borza, T., Critchley, A. T., & Prithiviraj, B. (2016). Carrageenans from red seaweeds as promoters of growth and elicitors of defense response in plants. ***Frontiers in Marine Science***, 3, 81-90.
- Song, G., Wang, J., He, Y., Sun, Y., Huang, J., Sun, Q., & Deng, Z. (2025). Roasting increases the oil yield of sesame seeds by altering the amino acid composition and secondary structure of the sesame protein. ***Food Bioscience*** 68, 106491.
- Taheri, A., & Jafari, S. M. (2019). Nanostructures of gums for encapsulation of food ingredients. En J. M. Lagaron (Ed.), ***Biopolymer nanostructures for food encapsulation purposes***, 1, 521–578.
- Timilsena, Y. P., Akanbi, T. O., Khalid, N., Adhikari, B., & Barrow, C. J. (2019). Complex coacervation: Principles, mechanisms and applications in microencapsulation. ***International Journal of Biological Macromolecules***, 121, 1276–1286.
- Timmermann, E. O. (2003). Multilayer sorption parameters: BET or GAB values? ***Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects***, 220(1–3), 235–260

- Tong, X., Jiang, D., Chang, H., & Zheng, Y. (2020). Recent advances in natural polymer-based drug delivery systems: *A review of encapsulation and controlled release. International Journal of Biological Macromolecules*, 158, 1-20.
- Traffano-Schiffo, M. V., Castro Giráldez, M., Fito, P. J., Perullini, A. M., & Santagapita, P. R. (2018). Gums induced microstructure stability in Ca(II)-alginate beads containing lactase analyzed by SAXS. *Carbohydrate Polymers*, 179, 402-407.
- Tsami, E., Vagenas, G. K., & Marinos-Kouris, D. (1992). Moisture sorption isotherms of pectins. *Journal of Food Processing and Preservation*, 16(3), 151–161.
- Tsitlakidou, P., Tasopoulos, N., Chatzopoulou, P., & Mourtzinou, I. (2023). Current status, technology, regulation and future perspectives of essential oils usage in the food and drink industry. *Journal of The Science of Food and Agriculture* 103(14), 6727-6751.
- Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K., & Akiyama, T. (2011). Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: *A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1373–1391.
- U.S. Food and Drug Administration (FDA).** (n.d.). *Water activity (aw) in foods*. U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.fda.gov/inspections-compliance-enforcement-and-criminal-investigations/inspection-technical-guides/water-activity-aw-foods>
- Velázquez-Gutiérrez, S.K., Alpizar-Reyes, E., Guadarrama-Lezama A.Y., Báez-González, J.G., Alvarez-Ramirez, J., & Pérez-Alonso, C. (2021). Influence of the wall material on the moisture sorption properties and conditions of stability of sesame oil hydrogel beads by ionic gelation. *LWT-Food Science and Technology* 140, 110695.

- Velázquez-Gutiérrez, S.K., Román-Guerrero, A., Cortés-Camargo, S., Cruz-Olivares, J., Fabela-Morón, M.F., & Pérez-Alonso, C. (2024). Moisture sorption isotherms, thermodynamic properties and sorption properties of walnut flavor microcapsules. **Revista Mexicana de Ingeniería Química** 23(3), eAlim24307.
- Vergara, L. P., Ruiz de Velasco, G., Aguilera-Carreidurán, H., Tovar-Gómez, N., & Morales-Hernández, B. (2023). Encapsulation of phenolic compounds through the formation of an O/W emulsion system and coacervation for application in food products. **Food Hydrocolloids for Health**, 3, 100232.
- Vergara, N., Carrillo, C., Montano, I., Rodríguez, Z. J., & Guedes, D. (2023, diciembre 18). *Employement of supplement bioestimulin in oncohematologic patients*. **Ciencia y Tecnología de Alimentos**, 23(3), 52–57.
- Wei, Y., Huang, Y.-H., Cheng, K.-C., & Song, Y.-L. (2020). Investigations of the influences of processing conditions on the properties of spray-dried chitosan-tripolyphosphate particles loaded with theophylline. **Scientific Reports**, 10, 1155.
- Wu, M.-S., Aquino, L. B. B., Barbaza, M. Y. U., Hsieh, C.-L., De Castro-Cruz, K. A., Yang, L.-L., & Tsai, P.-W. (2019). *Anti-Inflammatory and Anticancer Properties of Bioactive Compounds from Sesamum indicum L.—A Review*. **Molecules**, 24(24), 4426.
- Yakindra, P. H., Subrahmanyam, V. M., & Sreeramulu, J. (2019). Microencapsulation by complex coacervation—a review. **Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences**, 9(3), 133–146.
- Yanniotis, S., & Blahovec, J. (2009). Model analysis of sorption isotherms. **LWT – Food Science and Technology**, 42(10), 1688–1695.

Yáñez-Fernández, J. (2002). Microencapsulación: una alternativa para el control y la liberación de ingredientes alimentarios. ***Ciencia y Tecnología Alimentaria***, 3(4), 184–192.