



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**  
**LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**“ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD FÍSICA Y CALIDAD DE  
MICROCAPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA (*Averrhoa  
carambola*)”**

**TESIS**

**Que para obtener el título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Presenta:**

**DULCE KAREN BAHENA HERNÁNDEZ**

**Director:**

**DR. CÉSAR PÉREZ ALONSO**

**Asesor adjunto:**

**DRA. MIRIAM FABIOLA FABELA MORÓN**

**Toluca, México, abril 2025**



## **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 GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTOS.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
RESUMEN.....	7
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES .....	10
1.1 COLORANTES.....	11
1.2 CARAMBOLA .....	18
1.3 MICROENCAPSULACIÓN .....	23
1.4 MÉTOS DE MICROENCAPSULACIÓN.....	26
1.5 MATERIALES DE PARED .....	32
1.6 ESTABILIDAD EN SISTEMAS MICROENCAPSULANTES.....	37
1.7 PROPIEDADES TERMODINAMICAS .....	45
1.8 ANÁLISIS SENSORIAL.....	45
CAPÍTULO 2 JUSTIFICACIÓN, PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS	53
2. 1 JUSTIFICACIÓN.....	54
2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	56
2.3 OBJETIVOS.....	57
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	58
3.1 MATERIALES .....	59
3.2 EXTRACCIÓN Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL JUGO NATURAL DE CARAMBOLA.....	59
3.3 PRODUCCIÓN DE MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA MEDIANTE LA TÉCNICA DEL SECADO POR ASPERSIÓN .....	60
3.4 CONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE AGUA EN LAS MICROCÁPSULAS .....	61
3.5 CONDICIONES DE ESTABILIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA .....	62
3.6 MORFOLOGÍA DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA .....	62
3.7 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS MICROCÁPSULAS Y PROPIEDADES DE CALIDAD DE LOS ENCAPSULADOS.....	63
3.8 HIGROSCOPICIDAD .....	63
3.9 DISPERSABILIDAD.....	63
3.10 TIEMPO DE REDISPERSIÓN DE LAS MICROCÁPSULAS .....	64



3.11 RETENCIÓN DE VITAMINA C EN LAS MICROCÁPSULAS REHIDRATADAS .....	64
3.12 CAMBIO DE COLOR TOTAL DE LAS MICROCÁPSULAS REHIDRATADAS .....	64
3.13 ANÁLISIS SENSORIAL DE PRODUCTOS FUNCIONALES CONTENIENDO MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA .....	65
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	67
4.1 PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL JUGO DE CARAMBOLA.....	68
4.2 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LAS MICROCÁPSULAS DEL JUGO DE CARAMBOLA .....	69
4.3 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA.....	73
4.4 MORFOLOGÍA DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA .....	79
4.5 PROPIEDADES FÍSICAS, FÍSICOQUÍMICAS Y DE CALIDAD DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA REHIDRATADAS. ....	81
4.6 CINÉTICAS DE CAMBIO DE COLOR.....	84
4.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PARTE SENSORIAL.....	86
CONCLUSIONES.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
BIBLIOGRAFÍA .....	98



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Fruta de mesa Carambola</i>	19
<i>Figura 2. Posibles estructuras químicas de la Carambola</i>	19
<i>Figura 3. Diagrama esquemático del material encapsulado</i>	23
<i>Figura 4. Clasificación de las microcápsulas según su morfología</i>	25
<i>Figura 5. Proceso de extrucción</i>	26
<i>Figura 6. Proceso de Coacervación</i>	26
<i>Figura 7. Proceso de secado por asperción</i>	31
<i>Figura 8. Estructura química de la maltodextrina.</i>	35
<i>Figura 9. Estructura química de la goma arábiga</i>	36
<i>Figura 10. Relación del contenido de humedad de total con la actividad del agua</i>	40
<i>Figura 11. Diferentes comportamientos de las isotermas</i>	41
<i>Figura 12. Esquema del proceso de la percepción sensorial.</i>	45
<i>Figura 13. Áreas para realizar un análisis sensorial</i>	50
<i>Figura 14. Secador por aspersion marca Nichols/Niro</i>	56
<i>Figura 15. Isotermas de adsorción de las microcápsulas del jugo de carambola con GA</i>	65
<i>Figura 16. Isotermas de adsorción de las microcápsulas del jugo de carambola con MD</i>	65
<i>Figura 17. Entalpía diferencial de microcápsulas de jugo de carambola: (a) GA</i>	68
<i>Figura 18. Entalpía diferencial de microcápsulas de jugo de carambola: (b) MD</i>	69
<i>Figura 19. Energía libre de Gibbs diferencial de microcápsulas de jugo de carambola: (a) GA</i>	70
<i>Figura 20. Energía libre de Gibbs diferencial de microcápsulas de jugo de carambola: (b) MD.</i>	71
<i>Figura 21. Entropía integral de microcápsulas de jugo de carambola: (a) GA</i>	72
<i>Figura 22. Entropía integral de microcápsulas de jugo de carambola: (b) MD.</i>	73
<i>Figura 23. Micrografías de microcápsulas de jugo de carambola con GA como material de pared</i>	75
<i>Figura 24. Micrografías de microcápsulas de jugo de carambola con MD como material de pared</i>	76
<i>Figura 25. Jugo con MD, Jugo natural y Jugo con GA, respectivamente</i>	76
<i>Figura 26. Cinéticas de cambio de color total de las microcápsulas de JC para GA</i>	80
<i>Figura 27. Cinéticas de cambio de color total de las microcápsulas de JC para MD</i>	80
<i>Figura 28. Perfil sensorial descriptivo (QDA) de atributos sensoriales de encapsulados de jugo de Carambola con yogurt con mayor nivel de aceptación.</i>	82
<i>Figura 29. Perfil sensorial descriptivo (QDA) de atributos sensoriales de encapsulados de jugo de Carambola con gelatina con mayor nivel de aceptación</i>	83



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Colorantes naturales de acuerdo con el CI</i>	14
<i>Tabla 2. Clasificación de colorantes naturales de acuerdo a su origen.</i>	15
<i>Tabla 3. Clasificación de los colorantes naturales de acuerdo a su estructura química.</i>	16
<i>Tabla 4. Usos de frutas tropicales menores</i>	17
<i>Tabla 5. Propiedades de la carambola en %</i>	20
<i>Tabla 6. Minerales de la Carambola</i>	20
<i>Tabla 7. Desglose de producción por años y monto en pesos mexicanos</i>	21
<i>Tabla 8. Desglose de producción en toneladas por estado en los últimos años</i>	21
<i>Tabla 9. Desglose de producción en pesos mexicanos por estado en los últimos años</i>	22
<i>Tabla 10. Agentes encapsulantes por grupos</i>	33
<i>Tabla 11. Ventajas, desventajas y propiedades que posee cada uno de los grupos</i>	33
<i>Tabla 12. Modelos de isoterma de adsorción</i>	42
<i>Tabla 13. Escala sensorial hedónica de 7 puntos para evaluar atributos sensoriales</i>	61
<i>Tabla 14. Escala sensorial hedónica de 5 puntos para evaluar nivel de consumo.</i>	62
<i>Tabla 15. Escala sensorial JAR para evaluar intensidad del sabor</i>	62
<i>Tabla 16. Escala sensorial para evaluar el punto perfecto de sabor.</i>	62
<i>Tabla 17. Propiedades fisicoquímicas del jugo natural de carambola</i>	64
<i>Tabla 18. Parámetros de color iniciales del jugo de carambola</i>	64
<i>Tabla 19. Parámetros de GAB de microcápsulas del jugo de carambola con GA.</i>	67
<i>Tabla 20. Parámetros de GAB de microcápsulas del jugo de carambola con MD</i>	67
<i>Tabla 21. Condiciones de estabilidad de las microcápsulas con GA</i>	73
<i>Tabla 22. Condiciones de estabilidad de las microcápsulas con MD</i>	74
<i>Tabla 23. Propiedades físicas de las microcápsulas de jugo de carambola.</i>	78
<i>Tabla 24. Propiedades de calidad de las microcápsulas de jugo de carambola.</i>	79
<i>Tabla 25. Parámetros cinéticos del cambio de color de las microcápsulas de JC.</i>	81



## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo consistió en analizar el proceso de adsorción de humedad en microcápsulas de jugo de carambola (JC) para establecer condiciones de estabilidad que permitieran producir alimentos funcionales mínimamente procesados con atributos sensoriales de calidad. Las microcápsulas fueron elaboradas mediante la técnica del secado por aspersión empleando goma Arábica (GA) y maltodextrina DE-10 (MD) como agentes encapsulantes. En primera instancia se obtuvieron experimentalmente isotermas de adsorción de los encapsulados a 25,35 y 40 °C, se ajustaron al modelo cinético de GAB y posteriormente se determinaron las propiedades termodinámicas (diferenciales e integrales) para establecer condiciones de estabilidad física de las microcápsulas. Así mismo, se determinaron las propiedades tecno funcionales de las microcápsulas (propiedades físicas, fisicoquímicas y de calidad). Finalmente se manufacturaron dos tipos de alimentos funcionales (yogurt y gelatina) incorporando las cápsulas de jugo al producto y se llevó a cabo un análisis sensorial. Los resultados más relevantes desde un punto de vista termodinámico es que los microencapsulados de jugo con GA son estables en un intervalo de humedad entre 5 y 10 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s. y una actividad de agua entre 0.092 y 0.453 a las temperaturas de estudio; mientras que las condiciones de estabilidad para las microcápsulas con MD se encontraron entre 5 y 10 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s. para el contenido de humedad y entre 0.085 y 0.303 para la actividad de agua, por lo que no hay una diferencia importante entre los resultados para estos dos tipos de microcápsulas. Desde un punto de vista tecno funcional, los encapsulados con GA presentaron mayor resistencia a cambios físicos y fisicoquímicos como lo es la estructura externa de las matrices encapsuladas y el cambio de color. Sensorialmente, el producto que recibió mayor nivel de aceptación fue la gelatina cuando se le adiciono las microcápsulas de JC-MD, mientras que, para el caso del yogurt, el nivel de aceptación fue cuando se emplearon las microcápsulas de JC-GA, lo cual representa una potencial aplicación del jugo de carambola encapsulado para generar un producto con un nivel de aceptación y consumo importante para el consumidor.



## **INTRODUCCIÓN**

La industria de los alimentos se encuentra en constante cambio, siempre buscando opciones óptimas para el desarrollo de los productos, en estos se encuentran los alimentos funcionales, que son aquellos que proporcionan beneficios adicionales a la salud. La incorporación de dichos alimentos al consumo diario del ser humano ha impulsado la investigación en el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías que permitan incorporar todos los nutrientes sin que se pierda el sabor característico de los mismos.

La carambola (*Averrhoa carambola*), es una fruta que ha despertado el interés para convertirse en un colorante y/o saborizante para los alimentos funcionales, esto se debe a múltiples factores entre los que destacan su sabor, contenido en vitamina C, polifenoles y otros compuestos bioactivos.

Sin embargo, la utilización del jugo de carambola ha sido limitada por la sensibilidad que posee ante factores externos como lo son la luz, el oxígeno y el calor, la exposición a estos componentes que están en el día a día genera la degradación de sus nutrientes y a la pérdida de sus propiedades funcionales.

Una solución que se ha ocupado por bastante tiempo para solucionar este tipo de retos es la encapsulación, ya que es una tecnología que permite proteger componentes, características de distintos agentes activos (en este caso el jugo de carambola). Además de proporcionar prolongación de la vida del producto, estabilidad y facilidad de incorporación en diferentes alimentos, por ejemplo, la gelatina y el yogurt.

La elección de la técnica de encapsulación y los agentes encapsulantes va a depender ampliamente del agente activo (el encapsulado), la utilización final de las microcápsulas, la liberación del agente activo y los costos. De las técnicas más utilizadas en la industria alimenticia es la del secado por aspersión.

Una vez encapsulado el jugo, es indispensable conocer a qué condiciones de almacenamiento se debe tener para poder prolongar por más tiempo su vida útil y que de esta manera se conserven las propiedades encapsuladas, como último punto es importante



identificar que se pueden llevar a cabo productos funcionales con estas microcápsulas y que serán aceptadas por los consumidores, para esto existen distintos tipos de análisis sensoriales.

La presente tesis aborda todo lo mencionando anteriormente y se irá desarrollando en las posteriores páginas, donde en primera instancia se iniciara con los antecedentes, en este apartado se conocerá más acerca de las propiedades de la carambola, siguiendo de la encapsulación (métodos y agentes encapsulantes), para terminar con la estabilidad y análisis sensorial, como siguiente parte se presenta la pregunta de investigación, la justificación y los objetivos, para poder entrar en la metodología que se llevó a cabo, después de expondrán y discutirán los resultados obtenidos y finalmente se termina el trabajo con las conclusiones y referencias.



# CAPÍTULO 1

# ANTECEDENTES



## **1.1 COLORANTES**

El mercado y la industria de los alimentos, tiene como principales atributos sensoriales al color, sabor, aroma y textura, los cuales son considerados como parte primordial para su aceptación. El color es considerado como el atributo más importante, debido a que es percibido al instante, además de estar relacionado a la frescura y calidad de los productos. (Prajapati & Jadeja, 2022).

Los alimentos son una fuente alta de nutrientes que mejoran la salud del ser humano; sin embargo, estos dependen de que los atributos anteriormente citados cumplan las expectativas del consumidor para que este los adquiera y de esta manera se alcance el volumen de ventas esperado (Ghosh et al., 2021).

En los últimos años, los estilos de vida de cada ser humano han cambiado, hasta llegar al punto donde los alimentos que se consumen son producidos en regiones lejanas; lo cual ha llevado a tener especial cuidado en el procesamiento, almacenamiento y transportación, desde la manufactura hasta el momento del consumo; debido a que en estos momentos se corre el riesgo de perder algunos atributos sensoriales, destacando el color y sabor (Delgado-Vargas y Paredes-López, 2003; Gawalek, 2021; Santos et al., 2021; Vinha et al., 2018).

Si en algún momento los alimentos sufren algún tipo de degradación importante, una posible solución es añadir colorantes y/o saborizantes para que el producto al llegar al consumidor cuente con:

- 1.- Una apariencia de acuerdo al alimento.
- 2.- Un color uniforme.
- 3.- Colores más intensos y llamativos.
- 4.- Aspecto con calidad para el consumidor.

La industria de los alimentos está dominada por los colorantes sintéticos por su obtención más accesible y rápida, como lo son; el hidróxido de aluminio, sulfato de cobre y derivados de petróleo (Delgado-Vargas y Paredes-López, 2003). Sin embargo, en las



últimas décadas, se ha empezado a utilizar colorantes naturales, que provienen de animales, vegetales, y minerales, como lo pueden ser las algas, zanahorias, frutas o verduras con clorofila, naranjas, chiles, semillas, pescados insectos, entre otros. (Newsome, 1990).

En el contexto actual, el sector de los colorantes alimenticios está teniendo un crecimiento del 4.6% en su tasa anual y se prevé que alcance un valor de 2.3 millones de dólares en el mercado global Art 33., su importancia radica en la relación con la percepción de los alimentos en estado óptimo, con calidad y fresca para el consumo (Santos et al., 2021).

Al día de hoy, el mercado de los colorantes está teniendo una inquietud por la calidad que puede proporcionar está característica a los alimentos, generando así el interés de la industria alimenticia en obtener productos que no contengan o estén en menor medida elementos considerados dañinos para la salud, por ejemplo, la sal y azúcar. Por otra parte, se busca que estos sean benéficos para el consumidor, con elementos como vitaminas, compuestos bioactivos, antioxidantes, entre otros (Santos et al., 2021).

Identificar la nueva tendencia que se espera de los colorantes provoca que se pongan atención en lo colorantes de origen natural, que tienen elementos como antocianinas, carotenoides y betacianinas; considerados como no nocivos o perjudiciales para la salud (Prajapati & Jadeja, 2022).

Los colorantes naturales están teniendo una creciente aceptación por parte de los consumidores, debido que los colorantes sintéticos o artificiales están relacionados con efectos perjudiciales a la salud humana, un ejemplo son los alimentos de baja calidad, contienen exceso de colorantes artificiales que son relacionados con la carcinogenicidad. Por otra parte, los colorantes naturales se les relaciona con alimentos mínimamente procesados, y beneficios para la salud humana, fundamento que tiene lugar por las investigaciones de los colorantes para la prevención de diversas enfermedades, como pueden ser del corazón, cáncer, pulmonares, envejecimiento prematuro, entre otras (Knert et al., 1999; Nishino et al., 1999, Delgado-Vargas et al., 2003; Gawalek, 2021; Omae et al., 2017; Vinha et al., 2018).



Conocer la importancia de los colorantes naturales, no es suficiente, hace falta identificar de donde se están obteniendo y cómo son almacenados para su posterior uso. La obtención de esos ingredientes naturales ha guiado a la comunidad científica a prestar atención en diferentes frutos, plantas, raíces, y vegetales por mencionar algunos como fuentes de obtención, destacando el betabel, lavanda, cúrcuma, zanahoria, canela entre otros, hasta los menos conocidos y más exóticos como lo son la remolacha, pitahaya, mangostán, azafrán, carambola, por mencionar algunos (Domínguez et al., 2020).

### **1.1.1 COLORANTES NATURALES.**

El uso de colorantes naturales ha existido desde hace miles de años, su uso ha disminuido por la introducción de los colorantes sintéticos, sin embargo, actualmente se presta atención al daño ocasionado por estos en la salud humana y en el medio ambiente (contaminación ambiental y daños en el ecosistema acuático), en consecuencia, se está regresando a la utilización de los colorantes naturales (Uddin et al., 2022).

Los colorantes, como se ha mencionado anteriormente, se pueden obtener de manera sintética y natural, para el segundo caso, los frutos, semillas, vegetales, plantas entre otros, deben de contar con determinadas características que brinden la obtención y utilización de los mismos en la producción de alimentos.

En este contexto es importante destacar que unos de los principales desafíos de los colorantes naturales son mejorar su baja estabilidad, poca disponibilidad, obtención y conservación compleja. Para el caso de la inestabilidad, la propiedad característica está relacionada con el tiempo y tipo de almacenamiento, es decir con su conservación y las condiciones de almacenamiento (Zielinski et al., 2021; Omae et al., 2017; Manzoora et al., 2021). Por otra parte, se deben de considerar las condiciones de pH, contenido de humedad, luz, oxígeno, calor temperatura y tiempo en el almacenamiento ya que estos son factores que propician la degradación de los colorantes naturales, creando dificultades para su aplicación en la generación de los alimentos procesados (Prajapati & Jadeja, 2022; Santos et al., 2021).



### 1.1.2 CLASIFICACIONES DE LOS COLORANTES NATURALES

La obtención de los colorantes naturales es muy variada, estos se pueden obtener a partir de seres vivos por ejemplo de animales, plantas, hongos y procariotas, mientras que en los seres no vivos encontramos aquellos que se pueden obtener a partir de minerales. Actualmente la obtención de los colorantes naturales es del reino vegetal, animal y de los minerales (Uddin et al., 2022).

En los colorantes naturales hay clasificaciones y subclasificaciones que pueden ser por diferentes características, unos ejemplos serían; aplicaciones, estructuras químicas, fuente y tonos (Uddin et al., 2022). A continuación, se describen brevemente algunas clasificaciones.

1. Clasificación de acuerdo con el tono. Se da mediante la clasificación del índice de Color (CI), además de sus diferentes aplicaciones, y estructuras químicas, la clasificación está determinada por Society of Dyers and Colourists (SDC) y la American Association of Textile Chemists and Colorists (AATCC).

**Tabla 1.** Colorantes naturales de acuerdo con el CI

Color	Número de Colorantes	%	Ejemplos
Amarillo	29	30.4	Barberry ( <i>Berberis aristata</i> ), flores de tesu ( <i>Butea monosperma</i> ), amarillo de cártamo ( <i>Carthamus tinctorius</i> L.), kamala ( <i>Mallotus philippensis</i> ), manzanilla de tintorero ( <i>Anthemis tinctoria</i> ), cúrcuma ( <i>Curcuma longa</i> )
Naranja	6	6.5	Achiote ( <i>Bixa Orellana</i> )
Rojo	32	34.8	Rubia ( <i>Rubia tinctorum</i> ), manjistha ( <i>Rubia cordifolia</i> ), palo de Brasil/sappanwood ( <i>Caesalpineae sappan</i> ), morinda ( <i>Morinda citrifolia</i> ), cochinilla ( <i>Dactylopius coccus</i> ) y laca ( <i>Coccus laccae</i> )



Azul	4	3.3	Índigo natural (especies de Indigofera), Kumbh (Manipur) y flores de 'Tsuykusa' japonés
Verde	5	5.5	Generalmente muy raro, aparte de una combinación de woad/índigo con tintes de índigo
Marrón	12	13	Fuente prácticamente ilimitada. Cutch es un tinte marrón antiguo obtenido de la madera de árboles de acacia. Mantilla de dama ( <i>Alchemilla vulgaris</i> L.), Milenrama ( <i>Achillea millefolium</i> L.), Mejorana silvestre ( <i>Origanum vulgare</i> L.)
Negro	6	6.5	Raíces de la planta de iris, laca, carbón y caramelo

Referencia: (Uddin et al., 2022)

2. Clasificación basada en su lugar de encuentro. Los principales lugares donde se encuentran los colorantes naturales son: en las plantas, en los animales, minerales, hongos y distintos microbios, a continuación, se presentan algunos ejemplos de las principales fuentes de obtención.

**Tabla 2.** Clasificación de colorantes naturales de acuerdo a su origen.

Fuente	Ejemplos
Plantas	Cúrcuma, cebollas, remolacha, henna, eucalipto, cardamomo, jazmín coral, hierba, limón, corteza púrpura, madera de sapan, shillicorai, khair, sándalo, caléndula, dalia, granada, nuez de betel, <b>carambola</b>
Animales	Gusano de la laca, cochinillas, kermes
Minerales	Amarillo Cromo, Buff de Hierro, Amarillo Narkin, Azul Prusia y Marrón Manganeseo

Referencia: (Uddin et al., 2022)

3. Clasificación basada en su estructura química. La distribución se hace de acuerdo con la agrupación de los diferentes principios funcionales de la molécula. Los grupos que actualmente existen son: Indigoides, quinonoides, flavonoides, carotenoides. A continuación, se presenta una tabla con ejemplos.



**Tabla 3.** Clasificación de los colorantes naturales de acuerdo a su estructura química.

Estructura	Ejemplo
Indigoides	Indigo, woad, púrpura de Tiro
Flavonoides	Weld, cebollas
Quinonoides	<b>Antraquinona:</b> rubia, ruibarbo de Turquía <b>Naftoquinona:</b> henna, árboles de nuez <b>Benzoquinona:</b> cártamo, hongos
Carotenoides	Pluma de flamenco, algas
Basados en Taninos	Roble, corteza de sauce

*Referencia:* (Uddin et al., 2022)

Específicamente para los colorantes naturales del reino animal vegetal, encontramos los que pueden ser extraídos por frutos, estos pueden ser “cotidianos” o exóticos, la diferencia de estos radica en que los exóticos sólo se pueden encontrar en zonas o temporadas específicas, es decir, su obtención se vuelve más complicada.

### 1.1.3 COLORANTES NATURALES DE FRUTOS TROPICALES EXÓTICOS.

Entre los colorantes naturales provenientes de vegetales se encuentran los frutos exóticos tropicales, se definen de tal manera porque son cosechados en regiones tropicales del mundo, es decir, zonas cálidas y húmedas presentes dentro de los trópicos de capricornio y cáncer (Sarkar et al., 2022).

En los últimos años, el consumo de frutas tropicales ha aumentado en un 3.8%, sin embargo, aún existe desconocimiento de las propiedades, usos y aplicaciones de distintas frutas tropicales, esto se debe principalmente a su falta de popularidad. Las frutas tropicales, se pueden colocar en dos grandes clasificaciones, las cuales son “frutas tropicales mayores” y “frutas tropicales menores”, dicha clasificación se realiza en base a su valor económico, popularidad y área de cultivo (Sarkar et al., 2022).

En las frutas tropicales mayores se encuentran aquellas que su valor económico es alto, es decir están presentes en muchos lugares del mundo, creciendo así su popularidad y sus áreas de cultivo, unos ejemplos de estas frutas pueden ser: el plátano, mango, piñas, diferentes cítricos entre otros.



Las frutas tropicales menores son aquellas que principalmente tiene un impacto menor, y por ende su comercialización disminuye y se ve delimitada, aumentando sus precios, bajando su popularidad y áreas de cultivo, unos ejemplos de estas se encuentra el kiwi, lychee, maracuyá, guayaba, pitahaya, rambután, mangostán y la *carambola* por mencionar algunos con sus nombres comunes. El atractivo de este tipo de frutas, son sus composiciones ricas en nutrientes como (antioxidantes, vitaminas y minerales).

Otro punto importante a considerar es la inclinación de la población por los frutos con una popularidad menor, por los datos que se han obtenido de los últimos datos realizados a este tipo de frutos, dado que se pueden ocupar para diferentes procesos, como es el caso para la fabricación de colorantes y saborizantes naturales, en adición, su demanda está creciendo por los beneficios que pueden aportar al consumidor, se pueden encontrar en diferentes presentaciones como lo son las frutas secas, aromatizantes, tónicos, entre otros, de tal manera que sus usos pueden variar, unos ejemplos son para usos tradicionales, alimentos, cosméticos y farmacéuticos . A continuación, se presenta en la tabla 4 con algunas frutas tropicales menores y sus aplicaciones.

**Tabla 4. Usos de frutas tropicales menores**

<b>Fruta</b>	<b>Usos</b>
Lychee	Desarrollo de productos alimenticios Usos medicinales
Kiwi	Producción de alimentos Usos medicinales
Pitaya	Desarrollo de productos alimenticio Uso medicina Suplemento alimenticio
Carambola	Usos medicinales Desarrollo de colorantes y saborizantes
Elephant Apple	Procesamiento de alimentos Uso medicinal
Lutqua	Suplemento alimenticio Desarrollo de nuevos alimentos

*Referencia: (Sarkar et al., 2022)*



De acuerdo con la tabla 4, la carambola es un fruto tropical menor con determinadas propiedades que pueden ser utilizadas para obtener características de color y sabor, para añadirlas a distintos alimentos funcionales que empaten con la composición química de las características, sin embargo, para que esto suceda es importante conocer a detalle las propiedades de la carambola, para hacer una correcta extracción y posterior identificar las condiciones de almacenamiento para identificar si hay variación en cuanto al color y sabor en los alimentos funcionales.

## 1.2 CARAMBOLA

La familia *Oxalidaceae* es una clasificación de plantas que poseen flores o frutos, su nombre se debe a su alto contenido de ácido oxálico, comprende alrededor de 880 especies presentes en zonas tropicales o templadas, como es el sur de África y América, así como lugares específicos de Asia. En sus subclasificaciones se encuentra el género *Averrhoa* compuesta por cinco especies aceptadas, las dos principales son *Averrhoa bilimbi* (*pepino de indias*) y *Averrhoa carambola*. (Huynh & Nguyen, 2017).

La *Averrhoa carambola*, comúnmente conocida como “*fruto estrella*” o “*carambola*” es una fruta tropical comestible originaria de Malasia (Leivas et al., 2015), sin embargo, actualmente es cosecha en regiones tropicales y subtropicales, en el sudeste asiático, Indonesia fue uno de los países con mayor aporte en la producción de carambola en el año 2014 (Prasetijo et al., 2017), China y Brasil son otros países con impacto considerable en su producción alrededor del mundo (Leivas et al., 2015; Lin et al., 2021).

Lakmal et al. (2021) mencionan que la carambola se está convirtiendo en una fruta popular en distintas partes del mundo por su alto contenido de antioxidantes y valores nutricionales, que generan beneficios a la salud humana, llegando a considerarse un “súper alimento” (Huynh & Nguyen, 2017). Sin embargo, la conservación de la fruta o el jugo es complicada por su alto contenido de humedad (aproximadamente un 90%) y la presencia de enzimas, son condiciones que disminuyen fácil y rápidamente la calidad de la fruta (Prasetijo et al., 2017; Tan et al., 2022).

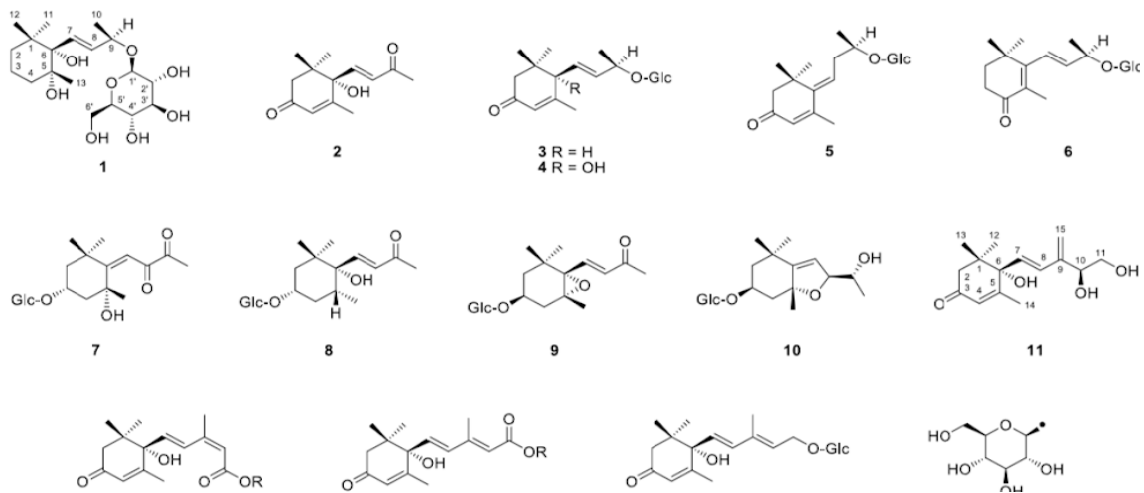
La *Averrhoa Carambola* tiene una forma característica de óvalo con cinco crestas o pliegues longitudinales, que, al cortarse de forma transversal, se puedan apreciar cortes con formas de estrellas, de ahí se llega a conocer como fruta estrella como se muestra en la figura 1 (Leivas et al., 2014; Lu et al., 2018).



**Figura 1.** *Fruta de mesa Carambola*

Su color depende de la etapa que se encuentre, cuando es un fruto maduro el color característico que tiene es un amarillo dorado, sin embargo, cuando el fruto se encuentra en proceso de maduración, su color característico es el verde. Referente a su textura, cuando es maduro se tiene una textura suave, mientras que es joven la textura que predomina es más áspera (Leivas et al., 2015).

La *Carambola* o *fruta estrella* se caracteriza por tener una consistencia crujiente, carnosa y jugosa, en cuanto a sabor; se puede percibir como una mezcla de manzana, pera y diversos cítricos, dando como resultado un sabor dulce ligeramente ácido. El sabor característico se obtiene por medio de la descomposición de sus carotenoides volátiles y de precursores glicosídicos no volátiles (Jia et al., 2019). En el aroma, posee un olor agradable al olfato humano, se reporta que su aroma tiene alrededor de 200 componentes diferentes algunas estructuras químicas de estos precursores de aroma y sabor se presentan en la Figura 2



**Figura 2.** Posibles estructuras químicas de la Carambola  
Referencia: (Jia et al., 2019)

Tradicionalmente, el consumo de la *Carambola*, se puede dar de dos maneras, en jugo o en fruta fresca de mesa, sin embargo, a partir de éstas se pueden tener diferentes presentaciones de consumo o como base para diferentes alimentos, algunos ejemplos son: fruta seca, postres, ensaladas, jaleas, adornos de platillos, dulces, helados y como decorativo de platillos y bebidas (Leivas et al., 2015; Lu et al., 2018; Luan et al., 2021). El jugo, cuando es fresco es de color amarillo, pero al estar expuesto al aire se vuelve de color marrón por la presencia del oxígeno (Tan et al., 2022; Khoo et al., 2022) señala que el jugo almacenado por más de tres horas podría generar efectos tóxicos por el cambio de sus propiedades.

La *Averroha Carambola* está compuesta por alrededor del 77% de ácidos grasos, en frutas maduras, la fructosa está de 38 a 48% y la glucosa de un 21 a 25%, además cuenta con altas cantidades de fibra y agentes antioxidantes (Luan et al., 2021). En la tabla 5 y 6 se presentan el porcentaje de distintos componentes de la carambola, y la cantidad en miligramo de distintos minerales en 100 gramos de fruta.



**Tabla 5. Propiedades de la carambola en %**

Característica.	[%]
Carbohidratos	5.6
Proteína	0.45
Grasa	0.32
Azúcares	5.04
Fibra	0.96
Energía [kcal/100g]	27.08

*Referencia: (Luan et al., 2021)*

**Tabla 6. Minerales de la Carambola**

Mineral	[mg/100g]
Ca	6.37
K	167.13
Na	3.8
P	17.88
Mg	12.05
Zn	0.49
Cu	0.41
Mn	0.51
Fe	0.45

*Referencia: (Luan et al., 2021)*

Los flavonoides, proantocianidinas, vitamina C, fenoles, terpenos, saponinas, alcaloides, ácido málico (encargado de su sabor agrio en el jugo, junto con los demás ácidos), ácido oxálico y el ácido succínico, son otros componentes presentes en la *Carambola* (Tan et al., 2022). Sin embargo, estas propiedades pueden ser afectadas y encontradas en mayor o menor medida dependiendo del tiempo que tenga la fruta, además de ser degradados por factores ambientales (humedad, aire, oxígeno, luz, entre otros), lo cual provoca que su calidad se vea afectada, por ende, es necesario buscar la manera de proteger sus propiedades, una forma de conseguirlo es mediante técnicas de encapsulación (Lu et al., 2018; Saikia et al., 2014).

Las propiedades y amplios usos de la carambola alrededor el mundo, lo han posicionado como un ingrediente potencial (en sus diferentes presentaciones, jugo, cápsulas, bagazo) para la generación de productos funcionales (gelatinas, yogurt, etc.) (Saikia et al., 2014). El aumento en la demanda de la fruta genera que más países lo produzcan, un ejemplo es México el cual en 2016 se recaudó alrededor de 4.0 millones de pesos por este cultivo, en una superficie de 70.5 hectáreas (SIAP “Anuario Estadístico de la Producción Agrícola” link: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>).

Los datos estadísticos, demuestran que su producción promedio en México en siete años es de 580 toneladas, en la tabla 7 se muestra el desglose en producción por año en México,



así como el valor en miles de pesos. Los estados que aportan mayor a la producción son; Colima, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Tabasco, Veracruz y Yucatán, en la tabla 8, se muestran las toneladas producidas en cada estado por año.

Tabla 7. Desglose de producción por años y monto en pesos mexicanos

Año	Producción [ton]	\$ miles de pesos
2015	605,42	4067,66
2016	588,99	3982,91
2017	628,35	4225,88
2018	623,49	4305,99
2019	564,97	3976,8
2022	471,86	3568,55
2023	574,1	4402,95

Referencia: (SIAP “Anuario Estadístico de la Producción Agrícola” link: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>)

Tabla 8. Desglose de producción en toneladas por estado en los últimos años

Estado	2015	2016	2017	2018	2019	2022	2023
Colima	87.00	89.00	89.28	89.57	100.25	103.90	107.39
Jalisco	109.00	114.20	113.30	113.16	69.95	74.65	113.70
Michoacán	181.16	179.02	181.74	182.47	182.77	75.12	75.12
Morelos	123.20	122.40	143.00	144.00	112.00	115.36	131.84
Nayarit	26.76	25.72	28.44	25.84	29.56	30.29	32.92
Tabasco	44.00	38.65	44.59	40.35	40.44	41.64	42.48
Veracruz	5.00		6.00	5.50	6.00	6.18	6.15
Yucatán	29.30	20.00	22.00	22.60	24.00	24.72	64.50

Referencia: (SIAP “Anuario Estadístico de la Producción Agrícola” link: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>)

Se puede apreciar que hasta el año 2019, Michoacán era el estado que aportaba más producción de carambola, sin embargo, en el año 2022 y 2023 el de mayor aportación ha sido el estado de Morelos, con una aportación del 23% en la producción del 2023. El reflejo de esta aportación se ve en el valor obtenido que fue de 985.61 miles de pesos, es decir un 22.4% para el 2023. En la tabla 9 se muestra el desglose por años del valor de la



producción de carambola en miles de pesos mexicanos. Por otra parte, en 2016 Veracruz no tuvo ningún aporte en la producción de Carambola, pero si en años anteriores y posteriores, además de que el Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) no cuenta con información de la producción de carambola para el año 2020 y 2021, recordando que en estos años fue la pandemia COVID-19.

**Tabla 9.** Desglose de producción en pesos mexicanos por estado en los últimos años

Estado	2015	2016	2017	2018	2019	2022	2023
Colima	476.28	500.26	543.37	584.68	654.08	717.41	742.50
Jalisco	676.23	738.15	729.22	774.60	473.91	528.15	885.73
Michoacán	1,329.61	1,224.15	1,270.61	1,267.86	1,244.23	546.50	546.50
Morelos	686.43	723.84	896.60	965.87	840.00	908.46	985.61
Nayarit	120.94	104.21	75.94	80.46	147.62	160.34	202.99
Tabasco	448.53	393.30	455.13	402.07	400.95	435.67	466.68
Veracruz	16.00		24.00	27.50	36.00	38.93	38.62
Yucatán	313.63	299.00	231.00	202.95	180.00	233.08	534.32

**Referencia:** (SIAP “Anuario Estadístico de la Producción Agrícola” link:

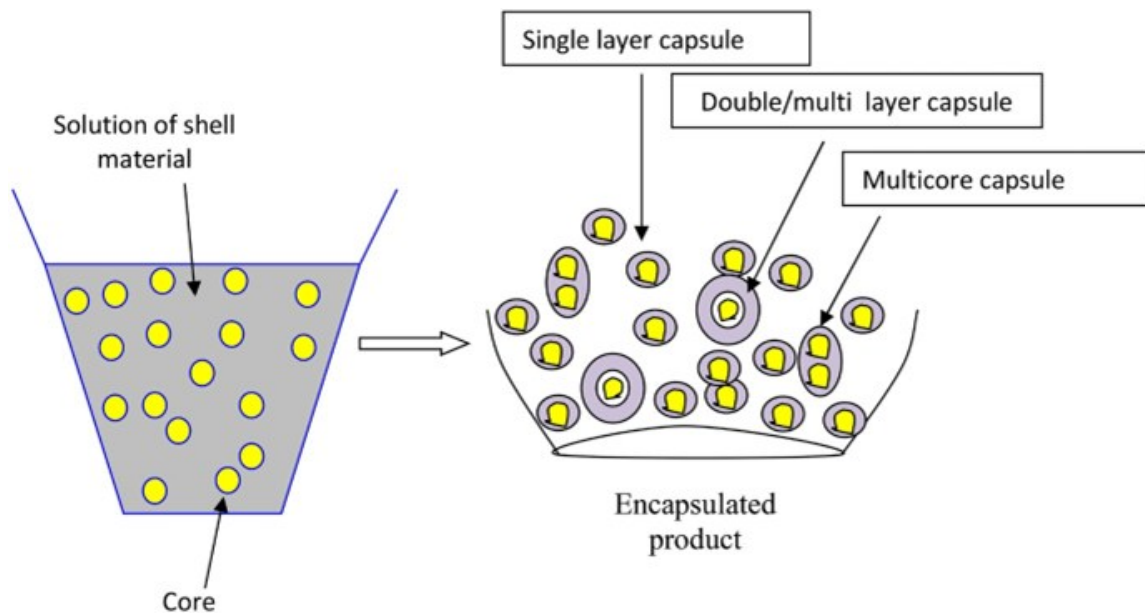
<http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>)

### 1.3 MICROENCAPSULACIÓN

La microencapsulación es una subcategoría de la encapsulación, donde las partículas a encapsular se encuentran en tamaño de micrómetros, es un proceso que ayuda a mejorar la estabilidad de lo que se ha encapsulado. La microencapsulación puede definirse como la técnica para el diseño de productos en los que se genera una barrera o recubrimiento de micropartículas (material/componente) de distintas morfologías y naturalezas, su función es proteger al material de los agentes precursores degradativos (Omae et al., 2017).

El material encapsulado también llamado material núcleo, agente activo, fase interna, carga útil, material activo o relleno, se puede encontrar en estado líquido, sólido o gaseosos (Timilsena et al., 2020). Al material encapsulante se le denomina agente encapsulante, membrana, recubrimiento, concha, material portador, material de pared o portador, cáscara, fase externa o matriz, es el encargado de proteger al material

encapsulado de diversas condiciones ambientales como la luz, la humedad, el oxígeno y el calor (Omae et al., 2017; Timilsena et al., 2020; Zuidam & Shimoni, 2010).



**Figura 3.** Diagrama esquemático del material encapsulado  
*Referencia:* (Timilsena et al., 2020)

La microencapsulación permite alargar la vida útil del material encapsulado y sus propiedades, de igual manera, facilita el control de la liberación del agente activo y las reacciones químicas entre el núcleo y el ambiente. Asimismo, genera una mayor estabilidad física, química, oxidativa y térmica, previene la degradación de sus propiedades biológicas, funcionales y fisicoquímicas, unos ejemplos de estas propiedades son la solubilidad, el pH, la humedad y la presión. Su utilización debe considerar el costo de producción, la complejidad del proceso, y los posibles contratiempos que se presenten en la estabilidad sino se lleva a cabo el proceso y almacenamiento adecuado (Bakry et al., 2016; Omae et al., 2017; Timilsena et al., 2020).

Se ha aplicado la tecnología de encapsulación a nivel industrial desde la década de 1950 Al-Hamayda et al. (2023). Con la creación del papel auto copiante sin carbón, se logra un revestimiento sensible a la presión con microcápsulas de tintas o colorantes. Actualmente la encapsulación es ampliamente ocupada en distintos sectores industriales como lo son el farmacéutico y alimentario por su capacidad de proteger a los componentes y alargar su vida útil (Timilsena et al., 2020; Al-Hamayda et al., 2023).

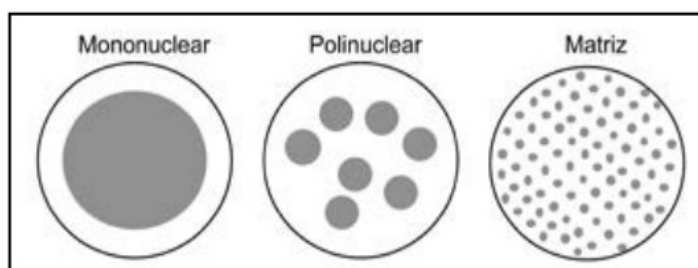
Kaushik et al. (2014) mencionan que una buena tecnología de encapsulación depende del uso final del producto, en adición a esto se deben tomar en cuenta diversos enfoques, a continuación, se presenta una lista de estos:

- 1- Sensibilidad de los ingredientes a factores físicos, químicos y ambientales.
- 2- Pérdida de la funcionalidad biológica
- 3- Liberación prematura o incompleta
- 4- La distribución espacial del agente activo (está relacionado con la estabilidad y liberación del núcleo)
- 5- Compresión fisicoquímica de los mecanismos
- 6- Interacción del núcleo con la membrana
- 7- Naturaleza y propiedades del núcleo y agente encapsulante
- 8- Aplicación de la microcápsula
- 9- Tamaño de cápsula requerido
- 10- Costo
- 11- Forma de almacenamiento (esferas, películas, partículas irregulares, estructuras porosas, compactas, amorfas o cristalinas)

#### Morfología de las microcápsulas

De acuerdo con la morfología (estructura o forma) de la microcápsula, (Ghosh, 2006; Nava-Reyna et al., 2015) menciona que se pueden clasificar en tres principales grupos:

- Mononucleares: Posee una cubierta alrededor de su núcleo
- Polinucleares: La membrana cuenta con más de un núcleo presente
- tipo matriz: La pared cuenta con un material activo distribuido de manera homogénea en la membrana.



**Figura 4.** Clasificación de las microcápsulas según su morfología

**Referencia:** (Nava Reyna, et al., 2015).

#### **1.4. MÉTODOS DE MICROENCAPSULACIÓN**

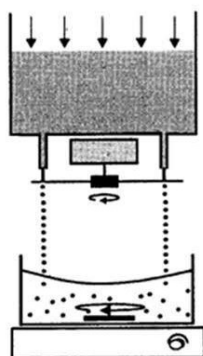
La elección del método de encapsulación va a depender de la naturaleza y propiedades de los agentes (activo y encapsulante), así como los costos y tiempos de producción, para lograrlo existen diferentes técnicas de encapsulación, las cuales se pueden dividir en tres grupos (Gharsallaoui et al., 2007; Shahidi & Han, 2009):

- Procesos químicos: Inclusión molecular, polimerización interfacial
- Procesos físicos: Secado por aspersión, enfriamiento por aspersión, recubrimiento de lecho fluidizado, secado en frío
- Procesos fisicoquímicos: Coacervación, separación de fases orgánicas, atrapamiento de liposomas

A continuación, se explican más a profundidad ciertos métodos de encapsulación utilizados en la industria.

##### **1.4.1 Extrusión**

La técnica de encapsulación por extracción se utiliza principalmente para agentes activos densos. Los procesos consisten en el bombeo por separado de los agentes encapsulante y activo, es decir, el agente encapsulante fluye a través de un tubo y el agente activo pasa por otro, y pasan por un orificio concéntrico ubicado en la circunferencia exterior de un cilindro giratorio, mientras las gotas caen son depositadas en una solución de endurecimiento figura 5. La fuerza centrífuga genera el rompimiento de las partículas mientras el agente encapsulante se encuentra moviéndose rápidamente hasta rodear completamente al agente activo (Timilsena et al., 2020).



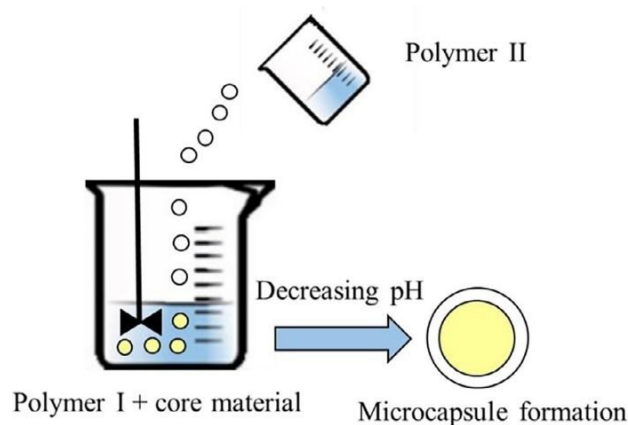
**Figura 5.** *Proceso de extrucción*

*Referencia: (Timilsena et al., 2020)*

Esta técnica se ha ocupado para encapsular saborizantes y condimentos con los materiales de pared más comunes para esta técnica que son la gelatina, alginato de sodio, carragenina, almidones, goma Arábica, grasas, ceras, ácidos grasos entre otros. Entre sus mayores ventajas se encuentra el tamaño de partículas, que se encuentra entre los 0.1 y 5 mm (Timilsena et al., 2020).

### 1.4.2 Coacervación

La técnica de coacervación es el primer proceso de encapsulación para la producción industrial de microencapsulaciones (Timilsena et al., 2020). Se puede apreciar una separación de fases líquido-líquido, se puede definir como un fenómeno coloidal, donde ocurre una de solvatación parcial de una solución polimérica, la cual está fases de polímeros, a primera siendo rica en polímeros (coacervado) y la segunda siendo carente de estos (fase de equilibrio) (Timilsena et al., 2020; Ozkan et al., 2019).



**Figura 6.** Proceso de Coacervación

*Referencia:* (Ozkan et al., 2019).

Existen dos tipos de coacervación, la simple y la compleja. El primero usa un agente de solvatación que logra la separación de fases, por otra parte, la coacervación compleja se da con la interacción de dos o más polímeros con cargas opuestas. Comúnmente ocupan como agente encapsulante a la gelatina y la goma arábica (Turchiuli et al., 2013; Ozkan et al., 2019).

Algunas ventajas y desventajas de esta técnica de encapsulación se mencionan a continuación (Timilsena et al., 2020; Ozkan et al., 2019):

- Ventajas:



- Baja temperatura de proceso
- Reducción de pérdidas por evaporación o degradación térmica
- Facilidad para controlar la liberación de materiales activos
- Desventajas:
  - Estabilidad limitada a un rango estrecho de pH y fuerza iónica
  - Complejidad del proceso
  - Altos costo de procesamiento

### *1.4.3 Liposomas*

La técnica de encapsulación por liposomas se obtiene por dispersión de fosfolípidos en agua. Los liposomas están formados por una o varias capas de fosfolípidos, su forma típica es la esférica y se obtiene mediante energía suministrada por; evaporación de solventes, electroformación, deshidratación/rehidratación de una película delgada, extrusión de membrana, entre otras (Ozkan et al., 2019).

Se utiliza principalmente en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria, por su alta biodisponibilidad, biocompatibilidad, biodegradabilidad y permeabilidad. Sin embargo, se encuentra limitada por la baja y difícil estabilidad física y química, su distribución de tamaño y complejidad (Ozkan et al., 2019).

### *1.4.4 Polimerización interfacial*

La técnica de polimerización interfacial se lleva a cabo cuando monómeros hidrófilos y lipofílicos están en una emulsión de aceite y agua, en la que reaccionan para formar una membrana polimérica en la superficie de las gotas. Los principales polímeros utilizados son poliamidas, poliuretanos, poliureas y poliéster. En el proceso se puede controlar; las concentraciones de los monómeros, temperatura, velocidad y tiempo de la mezcla (Ozkan et al., 2019).

El control correcto de elementos en la técnica permite que se tenga como ventaja el control de tamaño, grosor de la partícula y propiedades de la membrana, además de tener un bajo costo y facilidad de escalamiento. Sin embargo, presenta desafíos en las



condiciones iniciales y en el control de los procesos, además de inactivar las proteínas (Timilsena et al., 2020).

#### *1.4.5 Gelificación iónica*

La gelificación iónica es una técnica de encapsulación, se basa en la capacidad de retener polielectrolitos en presencia de iones covalentes por ejemplo el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , y  $\text{Al}^{3+}$ . Existen dos tipos, la externa y la interna. En la externa, los iones covalentes desde una fuente externa a la solución polimérica, en la interna se va agregando gota a gota la solución polimérica creando un núcleo acuoso (Turchiuli et al., 2013; Ozkan et al., 2019).

El polímero más utilizado en esta técnica es el alginato, esto por sus propiedades no tóxicas, biodegradables y biocompatibles. Por otra parte, la gelificación interna se establece como una mejor alternativa por la alta eficiencia de atrapamiento que posee y la calidad con la que las microesferas quedan (Turchiuli et al., 2013; Ozkan et al., 2019).

#### *1.4.6 Secado por aspersion*

La operación unitaria del secado sirve para remover líquidos presentes en un material, estos pueden ser agua, benceno, solventes orgánicos, es decir todos los secadores son usados para la obtención de sólidos secos a partir de una alimentación líquida o húmeda. (Treybal, 1980; Perry & Green, 2020). Es utilizado en la industria alimenticia para prolongar la vida útil de las frutas, disminuyendo su deterioro y contaminación en el almacenamiento (Monte et al., 2018)

(Perry & Green, 2020) mencionan que tiene dos procesos fundamentales y simultáneos los cuales son:

- 1) Transmisión de calor para eliminar el líquido.
- 2) Transmisión de masa en forma de líquido a vapor dentro del sólido y como vapor desde la superficie.

Además, menciona la siguiente clasificación para los secadores:

- Secadores directos:
  - Continuos: Secadores continuos de bandejas, de material dosificado en una capa, transportador neumático, rotatorios, por aspersion, de circulación directa, de túnel, lechos fluidos.



- Discontinuos: Secadores discontinuos de circulación directa, de bandejas y compartimentos, lechos fluidos.
- Secadores indirectos:
  - Continuos: Secadores de cilindro, tambor, transportador de tornillo, rotativos de tubería de vapor, bandeja vibratorios
  - Discontinuos: Secadores con agitación, por congelación, rotatorios al vacío, de bandejas al vacío
- Secadores infrarrojos o de calor radiante, secadores de calor dieléctrico

El secado por aspersión es una operación unitaria, donde una mezcla homogénea entre el agente encapsulante y el material activo, que se rocían/atomizan en un equipo donde existe una corriente de gas caliente, para obtener partículas sólidas del material activo rodeado por el agente encapsulante como se observa en la figura 6. El objetivo de la atomización es obtener gotas pequeñas en las que la evaporación del agua ocurre de manera rápida (Geankoplis, 1998).

(Perry & Green, 2020) comentan que las siguientes variables se deben de considerar para la elección y diseño de un secador por aspersión:

- Forma y tamaño del sólido final
- Propiedades físicas de alimentación; humedad, densidad, viscosidad, entre otras
- Temperaturas del gas y sólido

La aplicación principal del secado por aspersión es en materiales sensibles al calor, esto se debe por el corto tiempo de contacto de la mezcla con la zona caliente del secador (Perry & Green, 2020). Por dicha característica es ampliamente utilizado en la industria alimentaria y farmacéutica, además de la ventaja que tiene en costo, rendimiento, tasa de producción, facilidad de escalamiento y disponibilidad del equipo con respecto a otros métodos encapsulante en dichas industrias, por ejemplo; en comparación con el método de liofilización el secado por aspersión es de 30 a 50 veces más rentable (Timilsena et al., 2020; Esquivel-González et al., 2015).

Una de sus características principales es su capacidad de procesamiento de distintos materiales para generar un producto con propiedades pre especificadas. Generalmente en



este tipo de encapsulación, se tiene como agente encapsulante a un polisacárido, por ejemplo; una goma o un almidón (goma arábica y maltodextrina respectivamente). El resultado final del secado por aspersión es la obtención de un sólido seco, donde se encuentra encapsulado un agente activo con un agente encapsulante, para mantener la estabilidad del material y evitando su degradación por el contacto con la humedad, el oxígeno, la luz u otros factores ambientales, esto principalmente para alargar la vida útil del material activo (Timilsena et al., 2020).

La calidad de los sólidos secos depende de varios factores, características y parámetros, que pueden dar como producto final partículas muy finas (10-50 $\mu$ m) o más grandes (2-3mm). Esquivel-González et al. (2015) menciona algunos de ellos:

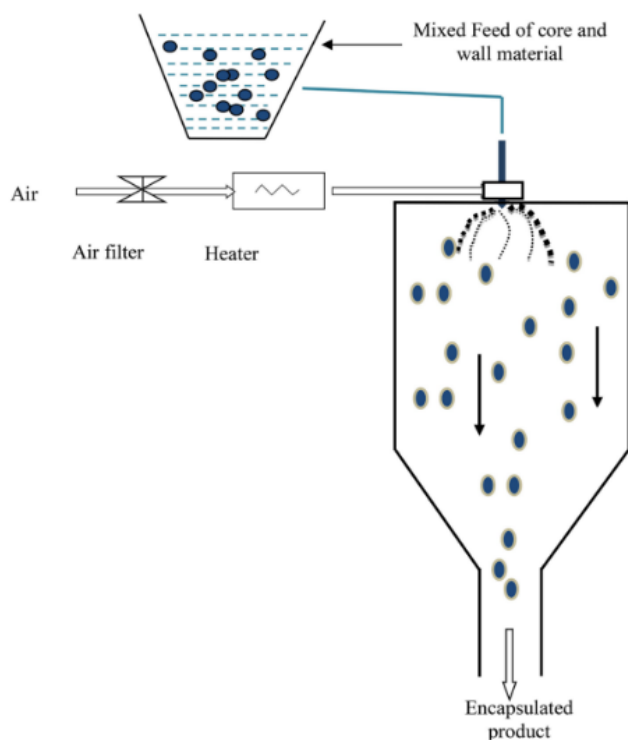
- Características de las mezclas de alimentación: viscosidad, velocidad de flujo, densidad, propiedades fisicoquímicas en general
- Parámetros del aire y la alimentación (temperatura, presión, flujo), son las variables del proceso
- Contacto entre la zona caliente y las gotas de atomización (flujo de corrientes, pueden ser paralelas o a contracorriente)
- Tipo de atomizador

La identificación de una eficiencia elevada con esta técnica para la microencapsulación se observa con buena estabilidad, poca pérdida de compuestos, mayor tiempo de vida útil del material activo y máxima encapsulación del agente activo.

(Esquivel-González et al. 2015) mencionan que las etapas del secado por aspersión son:

- Atomización: Es el rocío o lluvia de gotas de la mezcla, se puede llevar a cabo por presión o energía centrífuga. Su objetivo es crear mayor superficie de transferencia entre el aire y el líquido, esto con la finalidad de tener una mayor eficiencia en la transferencia de calor y masa.
- Contacto de gota-aire caliente: Es el paso donde inicia el secado y empieza a ocurrir la transferencia de masa y calor.
- Evaporación de agua: Es el proceso en el que se absorbe la mayor cantidad de agua en el proceso y ocurre en tres procesos sucesivos:

- Contacto del gas con el líquido que genera el aumento de temperatura en las gotas.
- Evaporación de las gotas a temperatura constante y a la presión parcial del vapor de agua
- Formación de una corteza seca en la superficie de la gota
- Separación del producto seco y aire húmedo: Se genera por medio de un ciclón, eso para los polvos más finos, para los más densos se recuperan en al final de la cámara de aspersión



**Figura 7.** *Proceso de secado por aspersión*

*Referencia: (Timilsena et al., 2020).*

### 1.5 MATERIALES DE PARED

La encapsulación y microencapsulación, ocupa diferentes procesos para proteger un compuesto activo (agente activo) (Madene et al., 2006), es posible la protección por la creación de capas o barreras entre el agente activo y encapsulante. La elección del agente encapsulante es importante porque influye directamente en la eficiencia de la



encapsulación, protección del agente activo y su estabilidad, dado que con cada tipo de agente encapsulante se tienen distintas variaciones.

(Al-Hamayda et al., 2023) mencionan que se debe tener en consideración los siguientes puntos para tener una encapsulación con una eficiencia superior:

- Uso final de la cápsula
- Propiedades fisicoquímicas del agente activo: No debe existir reacción con el agente encapsulante en el proceso o almacenamiento
- Técnica de encapsulación (condiciones de procesamiento)
- Adherencia al sustrato
- Costo y volumen de producción
- Propiedades deseadas de la microcápsula:
  - Condiciones de almacenamiento
  - Estabilidad
  - Liberación del agente activo

Los agentes encapsulantes o materiales de pared comúnmente provienen de sustancias biopoliméricas se dividen en tres, las cuales son proteínas, carbohidratos y lípidos (Timilsena et al., 2020). Para poder ser considerados en operaciones unitarias de la industria alimentaria (Özkan y Bilek 2014) mencionan que deben cumplir con las siguientes propiedades:

- Propiedades formadoras de películas
- Emulsionantes
- Biodegradables
- Propiedades para resistir el contacto con el tracto gastrointestinal
- Viscosidad baja
- Alto contenido de sólidos
- Baja higroscopicidad

Dado que no todos los agentes encapsulantes tienen las mismas propiedades funcionales, se han creado combinaciones de distintos materiales de pared, sin embargo, para la industria alimentaria el número de agentes encapsulantes aceptados es limitado



(Timilsena et al., 2020). En la tabla 10 se muestran los agentes encapsulantes por grupos utilizados en la industria alimentaria, en la tabla 11 se muestra una comparación de las ventajas, desventajas y propiedades que posee cada uno de los tres grupos de sustancias biopoliméricas.

**Tabla 10.** Agentes encapsulantes por grupos

Carbohidratos	Proteínas	Lípidos
Almidón y sus derivados		
Celulosa y sus derivados	Gluten (maíz)	
Exudados de plantas: Goma arábiga, Goma Karaya, Goma de semillas de lino, Gomas de semillas de chíá, Goma de algarrobo	Aislantes de (guisantes, soya, semilla de chíá, trigo)	Ácidos grasos/alcoholes
Extractos de plantas: Galactomananos, Soja soluble, Polisacáridos, Carragenina, Alginato, Xantano, Gelán, Dextranas (maltodextrinas), Quitosano	Coseínas Proteínas de suero Gelatina	Glicéridos Ceras Fosfolípidos

*Referencia: (Timilsena et al., 2020).*

**Tabla 11.** Ventajas, desventajas y propiedades que posee cada uno de los grupos

Grupo biopolímero	Propiedades	Ventajas	Desventajas
Carbohidratos	-Suave sabor	-Buenas propiedades de encapsulación para aceites, PUFA, vitaminas, proteínas, enzimas y sabores	-Mayor costo y disponibilidad de determinados
	-Excelente capacidad de protección al núcleo	-Producción de productos hipoalergénicos	materiales de pared
	-Resistencia a la digestión gastrointestinal	- Fuente de fibra soluble y prebiótico para el microbioma intestinal	-Funcionalidad limitada en comparación con otros materiales encapsulantes
		- Estabilidad en emulsión (almidones modificados)	



---

Proteínas	-Alta capacidad emulsionante	-Alta eficiencia de encapsulación para aceites ricos en PUFA y sabores	- Alergenicidad para algunas personas (p.ej., soja, trigo, cacahuete)
	-Fácil formación de geles y películas	- Buena estabilidad de las microcápsulas	- Sensibilidad a pH, fuerza iónica y temperatura
Lípidos	-Materiales hidrofílicos	-Excelente protección para ingredientes hidrofílicos	-Más costosos
	-Alta estabilidad	-Alta estabilidad y propiedades de barrera excepcionales	-Menos versátiles en términos de aplicaciones
	-Capacidad para formar estructuras estables	-Aplicaciones en nanoemulsiones, nanoliposomas, nanopartículas de lípidos sólidos, portadores de lípidos	

---

*Referencia: (Timilsena et al., 2020).*

De acuerdo con la tabla presentada, se observa que el grupo recomendado a utilizar en esta investigación es el grupo de los carbohidratos, específicamente se tocarán en mayor profundidad, la maltodextrina y la goma arábiga como agentes encapsulantes.

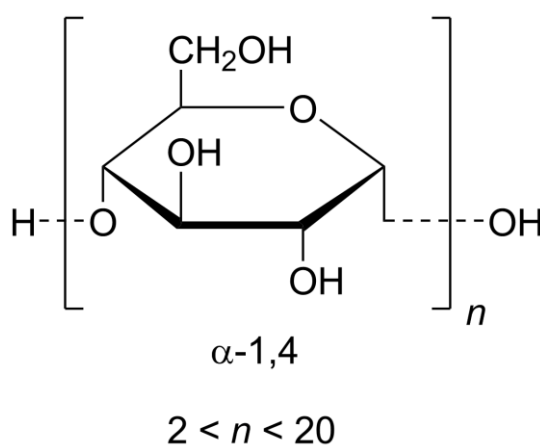
### 1.5.1 Maltodextrina

La maltodextrina abreviada comúnmente como (MD) es un agente encapsulante a base de carbohidratos derivada del almidón (Timilsena et al., 2020). Es un polisacárido nutritivo no dulce, su estructura química se observa en la figura 8. La maltodextrina se obtiene del maíz, papa u otros almidones por medio de una hidrólisis ácida parcial. (Özkan y Bilek, 2014) menciona que se caracterizan por:

- Alta solubilidad en el agua
- Baja viscosidad

- Sabor insípido
- Formación de soluciones incoloras
- Disponibilidad en diferentes pesos moleculares (se pueden llegar a tener diferentes densidades)

El uso de la maltodextrina en las encapsulaciones se da comúnmente para antocianinas y ácidos fenólicos. Puede ser un excelente agente encapsulante para la protección de la oxidación de los agentes activos cuando se tiene un equivalente de dextrosa (DE) (Özkan y Ersus Bilek, 2014).



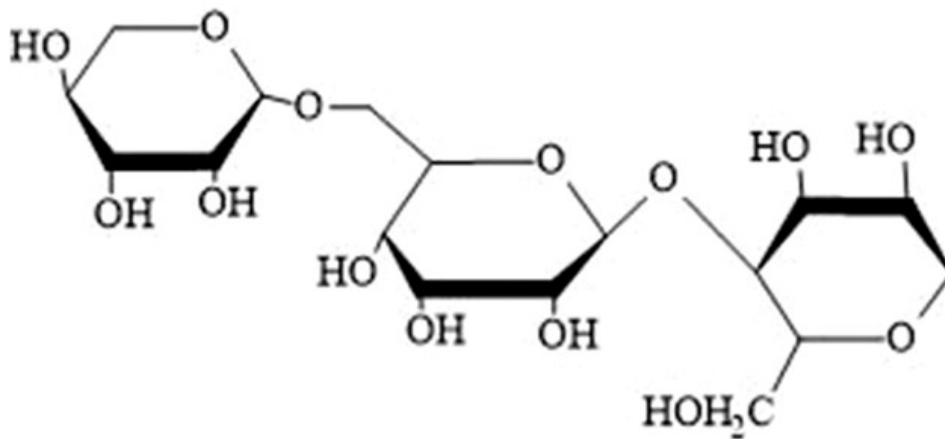
*Figura 8. Estructura química de la maltodextrina.*

### 1.5.2 Goma Arábica

La goma Arábica (GA) es el polisacárido natural más antiguo y se ocupa en diferentes industrias como la farmacéutica y alimentaria alrededor del mundo (Al-Hamayda et al., 2023; Prajapati et al., 2004). Se compone principalmente por polisacáridos y glicoproteínas, se obtiene por la fermentación de ácidos grasos. Su composición química puede tener ligeras diferencias o variaciones dependiendo de su origen, edad del árbol, temporada de cosecha y las condiciones de procesamiento utilizadas (Al-Hamayda et al., 2023).

La goma Arábica tiene diferentes cualidades que van desde ser un aglutinante y pegamento comestible hasta tener la capacidad de mejorar la textura y cuerpo de productos alimenticios, además de tener efectos terapéuticos por sus propiedades antidiabéticas, antioxidantes y antiulcerosas (Al-Hamayda et al., 2023).

Es conocida como un compuesto heteropolimolecular de moléculas que tienen diferentes composiciones de azúcares y masas moleculares. Su estructura se divide en tres; 1) arabinogalactano, 2) complejo de proteínas, 3) glicoproteínas. En la figura 9 se observa su estructura química. Se caracteriza por ser neutra o ligeramente ácida, su componente principal es un polisacárido ramificado que está compuesto por distintos minerales como sales de potasio, magnesio y calcio.



*Figura 9. Estructura química de la goma arábiga*

## 1.6 ESTABILIDAD EN SISTEMAS MICROENCAPSULANTES

El objetivo principal de encapsular es la protección y conservación de los agentes activos, para preservar sus propiedades, por ejemplo, el color, sabor, vitaminas, minerales; durante determinado tiempo para después ser liberadas de manera controlada. Sin embargo, en lo que se espera la liberación, es necesario mantener las propiedades, es decir, conservar la estabilidad en el almacenamiento.

Para conservar dicha estabilidad, es necesario proteger a la microcápsula en el almacenamiento de agentes ambientales, principalmente, la temperatura, humedad, oxígeno y otros agentes que generan una degradación más rápida de la cápsula. La predicción de la estabilidad de las cápsulas se puede dar por medio de la comprensión de las isothermas de sorción de humedad, así como sus propiedades termodinámicas de la sorción de vapor de agua en función de la temperatura (Alpizar-Reyes et al., 2016), (calor



total de sorción, calor diferencial de sorción, entalpía, entropía, entre otras) (Hidar et al., 2018). Sin embargo, para tener la comprensión de estos primero es necesario conocer acerca de la propiedad *actividad del agua*, ya que las isothermas se modelan en base a dicha propiedad.

(Hidar et al. 2018) mencionan que la comprensión de los temas mencionados tiene impacto en:

- Selección, modelación, diseño y optimización del proceso de encapsulación.
- Seguridad microbiológica.
- El comportamiento de humedad en la cápsula.
- Condiciones de empaque y almacenamiento (las condiciones ambientales pueden generar cambios significativos en el rendimiento de los envases) (Jebitta et al., 2022)
- Comparación y selección del mejor agente encapsulante.
- Cuantificación en los requisitos de energía necesarios en la transferencia de masa y calor.
- Predecir parámetros cinéticos en la sorción

La relación existente entre mecanismos entrópicos y entálpicos, así como la de poro-agua, son bases para explicar interacciones hidrofóbicas e hidrofílicas del agua con otras moléculas. Por otra parte, el estudio de las propiedades físicas de hidrocoloides secos, dan información acerca de su estabilidad frente a la actividad del agua (Alpizar-Reyes et al., 2016).

### *1.6.1 Actividad de agua*

El agua, es uno de los elementos más abundante en los alimentos naturales, por ejemplo; las frutas, a pesar de que su estructura química es simple, tiene un gran impacto en la calidad de los alimentos. Existen muchos alimentos que son propensos a la humedad (Chuacharoen et al., 2021), debido a su participación en el crecimiento microbiano. Para tener una estandarización de la cantidad de agua que deben de tener los alimentos, en la década de 1930 Scott y Salwin introducen el concepto de “actividad del agua” (Al-Muhtaseb et al., 2002)



Actualmente, es considerado como un parámetro de control importante en la industria alimentaria, debido a que, en el almacenamiento, la calidad de un producto depende de la cantidad de agua que pueda ser ocupada para generar microorganismo, además con un aumento de actividad del agua, se puede tener un cambio de estado en los alimentos (Mallek-Ayadi et al., 2020; Cieurzyńska et al., 2019).

El término “*actividad de agua*” indica la “cantidad” de agua en los alimentos y describe el grado de “limitación” del agua, es decir, indica la disponibilidad para ser partícipe en reacciones o procesos físicos, químicos o microbiológicos (Al-Muhtaseb et al., 2002). Se define como *actividad de agua* ( $a_w$ ) al vapor parcial del agua por la presión parcial del agua a la misma temperatura (Chuacharoen et al., 2021; Al-Muhtaseb et al., 2002) indica la siguiente fórmula para determinar la actividad del agua en los alimentos:

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{\text{humedad relativa}}{100} \quad [1]$$

Donde  $p$  es la presión parcial del agua en el alimento y  $p_0$  se refiere a la presión de vapor del agua a la misma temperatura. Sus valores pueden ir de 0 a 1, donde 0 indica que no hay agua libre disponible y 1 representa el agua pura, donde toda se encuentra disponible para reacciones. (Al-Muhtaseb et al., 2002) indican que las principales propiedades del agua en relación con un sistema biológico se pueden clasificar en tres:

- Aspectos estructurales
- Aspectos dinámicos
- Aspectos termodinámicos



### *1.6.2 Isotermas de adsorción de humedad*

Las isotermas de adsorción de humedad dan información sobre el cambio de productos secos (microcápsulas) al estar en contacto con la humedad relativa de la atmósfera, esto se puede generar en su almacenamiento (Cieurzyńska et al., 2019).

Las isotermas de adsorción son una herramienta muy útil de la termodinámica por su uso en la comprensión de la humedad en un sistema, es decir, la interacción que existe entre el agua y un componente, así como las características de unión de un hidrocoloide, esto se debe a la descripción que se tiene en la relación de la *actividad del agua* ( $a_w$ ) con el contenido de humedad en equilibrio a temperatura constante. El estudio de la relación entre la humedad relativa y la humedad en equilibrio a temperatura constante (Alpizar-Reyes et al., 2016; Monte et al., 2018).

(Collazos-Escobar et al. 2022) y (Jebitta et al. 2022) mencionan que de las isotermas se puede determinar:

- Propiedades estructurales de los hidrocoloides
- Propiedades termodinámicas (entalpía, entropía y energía libre)
- Área superficial específica
- Propiedades de sorción
- Contenido óptimo de humedad residual y en el equilibrio
- Número de sitios de unión superficial de los materiales
- Estabilidad física (porosidad, microestructura)

De igual manera, mencionan que conociendo dichas propiedades se puede tener información específica de:

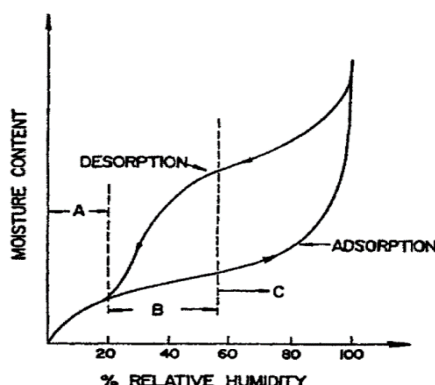
- Vida útil de un hidrocoloide
- Pasos y monitoreo en el proceso de encapsulación
- Cálculo del tiempo del proceso de encapsulación
- Optimización del proceso de encapsulación
- Condiciones de empaquetado o almacenamiento (humedad)
- Cantidad de agua que puede conservar un material si está en contacto con el aire a una humedad relativa particular

- Predecir las variaciones de humedad en el almacenamiento
- Selección del material de embalaje
- Predicción del contenido de humedad en el equilibrio a diferentes niveles de actividad de agua y temperatura

El uso de las isothermas sirve para identificar el rendimiento de secado en caso de ocupar ese método de encapsulación, además las propiedades obtenidas de las isothermas pueden ser afectadas pueden tener variaciones por la actividad del agua o la temperatura (Mallek-Ayadi et al., 2020).

En la figura 10 se observa una gráfica que relaciona el contenido de humedad de total con la actividad del agua de un sistema (alimento), los valores obtenidos para las curvas observadas (absorción y desorción) se obtiene a temperaturas constantes (Al-Muhtaseb et al., 2002).

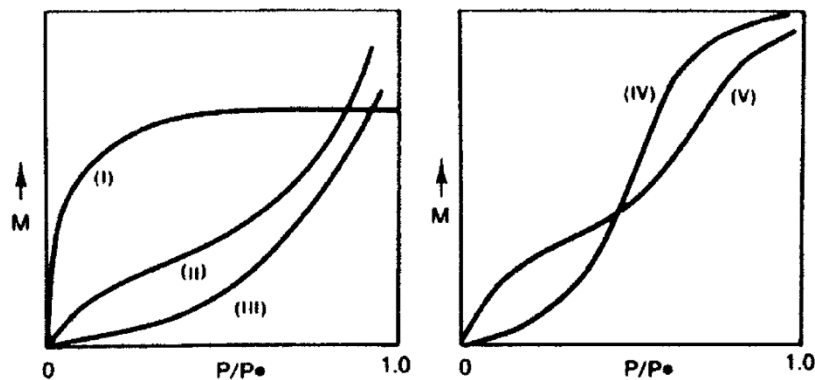
La curva de adsorción describe a un material que inicialmente se encuentra en estado seco en una atmósfera con humedad relativa creciente, de tal manera que se va midiendo el aumento del peso del material debido a la sorción del agua (Jebitta et al., 2022). Por otra parte, la isoterma de desorción describe a un material que inicialmente se encuentra húmedo bajo las mismas condiciones de humedad, pero en este caso se va observando y midiendo la pérdida de peso por la disminución de agua en el sistema (alimento) (Jebitta et al., 2022).



**Figura 10.** Relación del contenido de humedad de total con la actividad del agua

*Referencia: (Al-Muhtaseb et al., 2002).*

Brunauer basándose en la adsorción de gases de Van Der Waals, ha identificado cinco tipos generales de isothermas de sorción de acuerdo con su forma y proceso. El Tipo I: Langmuir, Tipo II: Sigmoidea, los siguientes tipos no tienen nombres específicos, sólo son conocidas como Tipo III, Tipo IV y Tipo V. La diferencia de cada tipo se basa en si la humedad está aumentando (humectación) o disminuyendo (secado). En los alimentos, la isoterma de tipo dos es la más predominante (Al-Muhtaseb et al., 2002), en la figura 11 se muestran los diferentes tipos y a continuación se describen según (Al-Muhtaseb et al., 2002).



*Figura 11. Diferentes comportamientos de las isothermas*

*Referencia: (Al-Muhtaseb et al., 2002).*

**Tipo I:** Conocidas como isothermas de Langmuir, se obtienen principalmente de procesos de sorción física, donde el adsorbato cubre al adsorbente para formar una monocapa.

**Tipo II:** Conocidas como isothermas de forma sigmoidea, es característica por la generación de múltiples capas inicialmente, los alimentos frescos mantienen una presión de vapor cercana a la del agua pura hasta que el contenido de humedad desciende a alrededor del 22%. Después de este punto, la presión de vapor disminuye, lo que provoca la forma sigmoidea de las isothermas. Se pueden obtener con el modelo BET o GAB.

**Tipo III:** Los alimentos ricos en componentes solubles, como los azúcares, presentan este comportamiento. Su característica principal es que, con el aumento en el contenido de humedad, aumenta el contenido de la actividad del agua. Este tipo de isothermas relaciona a las isothermas del tipo IV y V.

**Tipo IV y V:** Son características porque la adsorción máxima ocurre a una presión inferior a la presión de vapor del gas. Estos tipos se obtienen cuando el sólido es poroso

y el grosor de la capa adsorbida en las paredes de los poros está limitado por el ancho de los mismos.

(Al-Muhtaseb et al., 2002) mencionan que las isothermas de sorción pueden ser divididas en tres regiones o etapas que se muestran en la figura 9:

- **Región A:** Representa una unión fuerte entre el material y el agua, tiene una entalpía de vaporización alta, en este punto el agua presente no está disponible para reacciones químicas o microbiológicas.
- **Región B:** Es la segunda etapa de la sorción o desorción, la unión no es fuerte y hay presencia de agua para llevar a cabo reacciones químicas
- **Región C:** En esta etapa, existe un exceso de agua, la cual puede actuar como un solvente y participar en su totalidad en reacciones químicas y microbianas, lo que aumenta el deterioro del material (alimentos)

La obtención de las isothermas de sorción se puede generar por medio de ecuaciones empíricas, semi-empíricas o teóricas, sin embargo, no existe ningún modelo único y universal que se pueda acoplar para todos los sistemas, por eso se debe probar la capacidad de cada modelo para tener una mejor descripción de lo que está ocurriendo y así generar un mejor análisis (Collazos-Escobar et al, 2022; Esquerdo et al., 2018). A continuación, se presentan algunos modelos de isothermas de adsorción:

*Tabla 12. Modelos de isothermas de adsorción*

MODELO	ECUACIÓN	#
Empírica Henderson	$M = \left[ \frac{-\ln(1 - a_w)}{A} \right]^{\frac{1}{B}}$	[2]
Semi-Empírica Oswin	$M = A \cdot \left[ \frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B$	[3]
Semi-Empírica Lewiki (dos parámetros)	$M = A \left( \frac{1}{a_w} - 1 \right)^{B-1}$	[4]

---

$$\text{Halsey} \quad M = \left[ -\frac{A}{T \cdot \ln a_w} \right]^{1/B} \quad [5]$$

$$\text{GAB} \quad M = \frac{M_0 \cdot C_G \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C_G \cdot K \cdot a_w)} \quad [6]$$

Teórica

$$\text{BET} \quad M = \frac{M_0 \cdot C_B \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 - a_w + C_B \cdot a_w)} \quad [7]$$

---

donde:

- A y B son constantes para las ecuaciones de Oswin, Henderson, Lewicki y Hasley.
- M es el contenido de humedad en [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.].
- T es la temperatura en °K.
- M<sub>0</sub> es el contenido de humedad en la monocapa (es el contenido de agua correspondiente a la saturación de todos los sitios primarios, por una molécula de agua).
- C<sub>G</sub>, K y C<sub>B</sub> son constantes para GAB y BET.

Jebitta et al. (2022) indican que una aplicabilidad importante que se le puede dar a las isothermas de sorción es el cálculo de propiedades térmicas, como lo son:

- Energía requerida en el proceso (por la entalpía)
- Estado de excitación (por la entropía)
- Espontaneidad del proceso (energía libre de Gibbs)

En términos generales, las isothermas de sorción, son importantes porque generan la comprensión de la estabilidad de las microcápsulas para su almacenamiento y vida útil (Collazos-Escobar et al., 2022).



## **1.7 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS**

### **1.7.1 Entalpía**

La entalpía diferencial de la adsorción también llamado calor isostérico neto de sorción o calor diferencial, indica el cambio de energía cuando se mezclan moléculas de agua con un sorbente (microcápsula) mientras ocurre el proceso de sorción. Su utilidad radica en la información que proporciona acerca de la disponibilidad de sitios polares para el agua (Hidar et al., 2018). El calor isotérmico de sorción se puede interpretar como la fuerza con la que se une el agua en un material sólido (Jebitta et al., 2022).

### **1.7.2 Entropía**

El punto máximo de estabilidad, donde el agua se encuentra en su disposición mínima y los enlaces creados entre el adsorbato y el absorbente son más fuertes, es considerado como la entropía mínima integral. En este punto es posible que el agua empiece a participar en distintas reacciones químicas y de deterioro (Alpizar-Reyes et al., 2016). La entropía diferencial de la sorción, indica la relación de las fuerzas de unión y repulsión del sistema (Hidar et al., 2018). La entropía diferencial es proporcional al número de sitios de sorción disponibles a un nivel de energía específico (Jebitta et al., 2022)

### **1.7.3 Energía Libre**

Existe la teoría de “compensación entalpía-entropía”, la cual afirma que es necesario disminuir los cambios de energía libre ocasionados por estas propiedades. Es utilizada para valorar distintos fenómenos, tanto físicos como químicos, un ejemplo es la reacción de sorción. La compensación ocurre con la compensación del soluto y solvente que generan las reacciones, además de la relación entre la entalpía y entropía para tener una reacción lineal (Hidar et al., 2018).

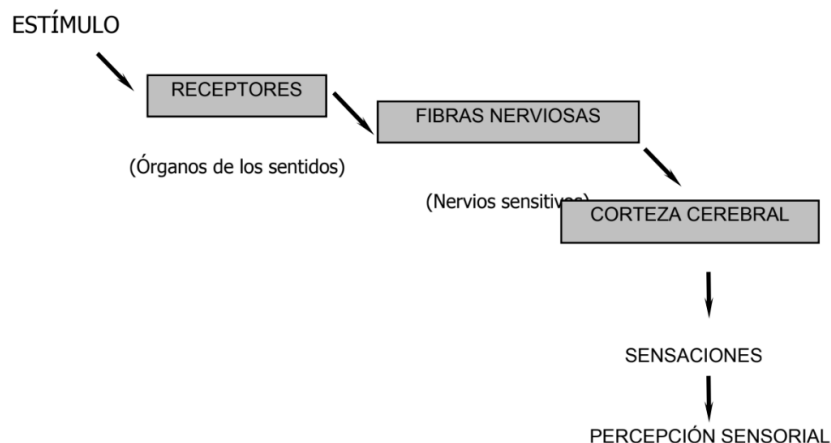
## **1.8 ANÁLISIS SENSORIAL**

La aceptación de los alimentos desde el origen del hombre se ha fundamentado por el criterio personal de “me gusta o no me gusta”, dicho criterio se forja independientemente

de la calidad del alimento, ya que este puede tener una buena cantidad o calidad en cuanto a nutrientes y seguridad sanitaria, sin embargo, puede no tener la aceptación y aprobación del público al que va dirigido (Espinosa-Manfugás, 2007; Domínguez, 2007).

El rechazo o aceptación de los alimentos depende principalmente de la percepción que tiene el consumidor de este, dicha referencia creada es subjetiva debido a que es por medio de los sentidos y va a depender de diversos factores personales como la psicología social y cognitiva, que se va a relacionar al ver diferentes características del alimento, como lo son; el color, sabor, consistencia, olor, textura, presentación entre otros para aceptarlo o rechazarlo (Espinosa-Manfugás, 2007; Domínguez, 2007; Gómez-Corona y Lelièvre-Desmas, 2019).

La percepción de los alimentos, se le conoce como “percepción sensorial”, indica una interpretación o conciencia de las sensaciones obtenidas al recibir un estímulo. La palabra *sensorial* proviene del latín “*sensus*” que significa sentido. (García Barrón, et al., 2021) menciona que obtiene por medio de impulsos eléctricos que se transmiten desde la recepción del estímulo hasta un área central nerviosa para después ser enviado al cerebro y así identificar una sensación definida, en la figura 12 se muestra un esquema del proceso.



**Figura 12.** Esquema del proceso de la percepción sensorial.

**Referencia:** (Espinosa Manfugás, 2007).



El análisis de la aceptación o rechazo, así como la cuantificación de los alimentos por el consumidor, de acuerdo a las sensaciones experimentadas (dependen del tiempo y espacio en el que se realiza el análisis, así como del individuo) en durante su observación y consumo es realizada por medio de un “*análisis sensorial*”.

(Espinosa-Manfugás, 2007), menciona las siguientes definiciones para lo que es un “*análisis sensorial*”:

- Es una disciplina científica que se utiliza para evocar, medir, analizar e interpretar aquellas características de los alimentos al ser percibidas por los sentidos.
- El Instituto de Alimentos de EEUU (IFT) define al *análisis sensorial* como: la disciplina científica utilizada para evocar, medir analizar e interpretar las reacciones a aquellas características de alimentos y otras sustancias, que son percibidas por los sentidos de la vista, olfato, gusto, tacto y oído.
- Es el análisis de los alimentos u otros materiales a través de los sentidos.
- Disciplina científica que evalúa las propiedades organolépticas mediante uno o más sentidos humanos. Sirve para clasificar ingredientes, alimentos, opiniones de los consumidores, nivel de agrado (aceptación o rechazo)

Los sentidos que se ocupan en el análisis sensorial son:

- Olfato: Se percibe por medio de la nariz y se activa ante sustancias volátiles aromáticas. Las personas tienen la capacidad de identificar alrededor de 200 olores diferentes
- Vista: Se percibe por medio de los ojos y se ocupa para ver la apariencia, forma, tamaño densidad o deterioro de los objetos.
- Gusto: Es percibido por la boca específicamente por las papilas gustativas que se encuentran en la lengua y detecta 4 gustos diferentes
- Tacto/textura: Se puede percibir por varias partes del cuerpo, dedos, paladar, en este último se pueden clasificar en dos grupos, las mecánicas que se refieren al esfuerzo que le toma a una persona masticar y la geométricas que se refieren a la forma de alimento, así como su humedad y grasa.
- Oído: Se perciben distintos sonidos que generan los alimentos al ser ingeridos por el ser humano.



La unión de los sentidos del gusto y tacto genera lo que comúnmente se conoce como; “*sabor*”. A la combinación de sabor y olor se le denomina “*flavor*” el British Standard Institution define a el *flavor* como la combinación de sabor y olor, que comúnmente está influenciada por distintas sensaciones (dolor, calor, frío etc.).

Se identifica que el sabor se puede dividir en tres etapas:

- 1) Evaluación del olor: antes del consumo
- 2) Evaluación del sabor en la boca: durante el consumo
- 3) Evaluación del regusto: después del consumo

Los sentidos que se ocupan para generar una percepción sensorial y poder hacer análisis, se dan por medio de estímulos, el cual es medido por medio de percepciones y no de sensaciones, para conseguir dicha medición. Espinosa Manfugás (2007) menciona que se realiza por medio de analizadores del umbral, sin embargo, estos no son absolutos y tienen diferentes variaciones que dependen de distintos factores como, por ejemplo; sustancia usada, método ocupado y características del individuo (edad, país, estado de salud, hábitos, costumbres, religiones entre otras), es ocupado porque con umbral se puede conocer la contribución de los constituyentes activos, se establecen cuatro para los “análisis sensoriales”:

- 1) Umbral de detección: Es estímulo apenas es capaz de generar una sensación
- 2) Umbral de reconocimiento: Se puede identificar o percibir una sensación.
- 3) Umbral diferencial: La identificación de la sensación es mayor y más fácil de percibir
- 4) Umbral terminal: Se percibe una intensa sensación del estímulo

(Espinosa-Manfugás, 2007), menciona que las sensaciones solo se pueden medir con métodos psicológicos, y los estímulos por métodos físicos o químicos. La medición de los estímulos la clasifica en la siguiente lista de acuerdo con característica a medir:

- Mecánicos
- Luminosos.
- Químicos.
- Térmicos.
- Acústicos.
- Eléctricos



En la parte de los alimentos, (Domínguez, 2007) menciona que se pueden tener los siguientes estímulos, están relacionados directamente con los sentidos del cuerpo humano:

- Táctiles: Son percibidos por las superficies del cuerpo y el epitelio bucal
- Visuales: Son percibidos por los ojos y se destacan por identificar el color y forma de los alimentos
- Olorosos: Son identificados por el epitelio olfativo
- Gustativos: Se presentan al contacto con las papilas gustativas
- Auditivos: Se identifican en el aparato auditivo, y pueden darse al momento de ser procesados o comidos

Para poder llevar a cabo un análisis sensorial es necesario involucrar diferentes disciplinas, por ejemplo; las matemáticas, la química, filosófica, psicológica, por mencionar algunas. Cada enfoque sirve para hacer distintos tipos de pruebas que dan información sobre la percepción de los individuos ante el producto. Se pueden definir dos tipos principales de pruebas: las hedónicas y analíticas. En las primeras se evalúan la aceptación y preferencia y en la segunda se evalúan las diferencias o similitudes, así como las cantidades. Sin embargo, (Domínguez, 2007) las vuelve a subdividir en:

- Discriminatoria: Pertenece a las pruebas analíticas. Tiene como objetivo identificar si dos o más productos son percibidos de diferente manera por el consumidor, para esto tienen como pregunta de interés “¿Existen diferencias entre los alimentos?”. Los jueces deben tener una agudeza sensorial, deben ser entrenados y conocer el método usado.
- Descriptiva: Pertenece a una prueba analítica, se ocupa para determinar la naturaleza de las diferencias sensoriales, su pregunta de interés es “¿En qué tipos de características específicas difieren los productos?, los jueces deben ser altamente entrenados, tener una gran agudeza sensorial y tener motivación.
- Afectiva: Es un tipo de prueba hedónica, donde el objetivo es determinar la aceptación o rechazo del producto por parte del consumidor, su pregunta de interés es “¿Cuáles son los productos preferidos y los menos aceptados por las personas?”, en este tipo de pruebas, los jueces no deben de ser entrenados, pero deben consumir o estar interesados en el consumo del producto



A partir de esas tres clasificaciones de los tipos de análisis sensoriales (Hernández, 2005) menciona distintos métodos y técnicas para llevarlas a cabo, a continuación, se mencionan algunas:

- Discriminatoria
  - Prueba de diferenciación
  - Prueba de comparación de pares
  - Prueba de dúo trío
  - Prueba de triángulo
  - Prueba de ordenamiento
- Descriptiva
  - Escala de atributos
  - Escala de categorías
  - Escala de estimación de la magnitud
  - Análisis descriptivo
  - Perfil de sabor
  - Perfil de textura
  - Análisis cuantitativo
- Afectiva
  - Pruebas de preferencia,
  - Pruebas de preferencia pareada
  - Prueba de ordenamiento
  - Pruebas de satisfacción
  - Escala de hedónica verbal
  - Escala de hedónica facial

Estas son solo algunas, pero existen otras que pueden ser acopladas de acuerdo a las necesidades del producto y el análisis.

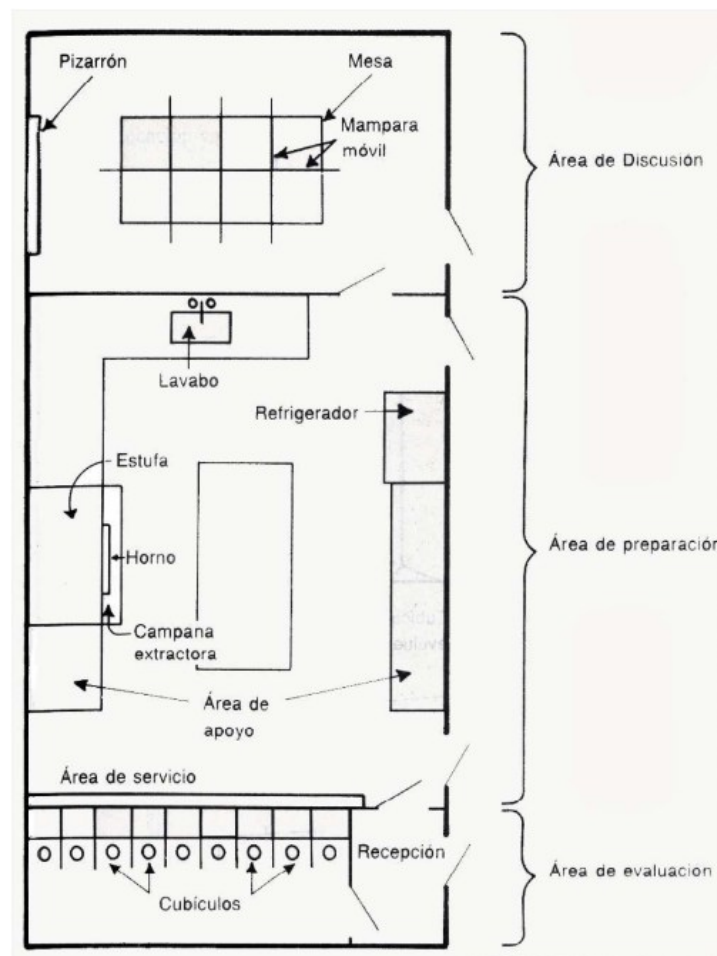
(Domínguez, 2007) menciona que con cualquier método, prueba o técnica ocupada es necesario considerar:

- **Instalaciones adecuadas** que deben contar con tres diferentes áreas que son de; discusión, preparación y evaluación figura 13, esto es para tener un mejor control

y ejecución de la evaluación por parte de los jueces o penalistas. Para obtener información más confiable por parte de los penalistas, es necesario que el lugar en el que se realizan las pruebas sensoriales se parezca al lugar donde va a ser su consumo diario o convencional (Gómez-Corona & Lelièvre-Desmas, 2019).

- **Muestras o alimentos** preparados para probar.
- **Los panelistas o jueces.** Es un grupo selecto de personas, que son entrenadas o poseen características similares para poder evaluar los productos (alimentos, bebidas, cuidado personal entre otros) (Gómez-Corona & Lelièvre-Desmas, 2019).

De igual manera (Gómez-Corona & Lelièvre-Desmas, 2019) indica que, para las pruebas analíticas, los procesos están estandarizados por la norma ISO 8589: 1988 y el manual MNL60-2ND ASTM



**Figura 13.** Áreas para realizar un análisis sensorial  
*Referencia: (Liria Domínguez, 2007).*



El análisis o evaluación sensorial tiene como propósito, entender las propiedades percibidas por los sentidos, es fundamental para garantizar la calidad y competitividad de un producto en el mercado, esto se debe de realizar cuando es introducido o modificado un alimento o bebida, para tener la aceptación del público objetivo



# CAPÍTULO 2

*Justificación*

*Pregunta de  
investigación*

*Objetivos*



## 2. 1 JUSTIFICACIÓN

La industria de colorantes y saborizantes de fuentes naturales representa sólo una pequeña parte, pero muy representativa dentro de la alimentaria, debido a que el color y sabor de un producto son los factores más importantes y determinantes para que el consumidor adquiera un producto nuevamente.

Científicos e ingenieros se han enfocado en desarrollar productos de consumo humano económicos, benéficos a la salud, que presentan colores atractivos y sabores de frescura y que además tenga una vida de anaquel prolongada, por lo que se continúa trabajando en la generación de nuevos conocimientos para la generación de colorantes y saborizantes de fuentes naturales (Prajapati & Jadeja, 2022; Premjit et al., 2022). En el caso particular del jugo de *Averrhoa carambola* (fruto de carambola o estrella), este contiene vitamina C, compuestos fenólicos, antioxidantes, los cuales aportan propiedades nutricionales al ser humano. Además, el jugo contiene betacarotenos, los cuales son responsables de la tonalidad amarillo intenso que lo caracteriza. Sin embargo, estos componentes son susceptibles a deteriorarse al ponerse en contacto con factores ambientales como la luz, temperatura u oxígeno.

La tecnología de encapsulación es una alternativa que generalmente se emplea para contrarrestar dichos efectos deteriorativos, pues se emplea en primera instancia para recubrir, proteger y prolongar la vida de anaquel de compuestos activos, y también, para producir alimentos mínimamente procesados con atributos sensoriales (color y sabor) agradables al consumidor. Existe una gran variedad de tecnologías para llevar a cabo la encapsulación de principios activos, entre las más importantes destacan el secado por aspersión, gelificación iónica, liofilización, lecho fluidizado, emulsificación, extrusión, fluidos supercríticos, entre otras (Timilsena et al., 2020).

En México prácticamente toda la infraestructura de microencapsulación está basada en la técnica de secado por aspersión, la cual es un proceso continuo y que sigue dominando a nivel comercial que involucra una combinación de varias etapas como son la atomización,



el proceso de mezclado entre el material disperso y el medio desecante (aire), evaporación y separación del producto (Osorio-Téllez et al., 2021).

Por otra parte, el concepto más utilizado para relacionar el contenido de agua y las propiedades de un alimento es la actividad acuosa. Se ha demostrado que es un factor clave para el crecimiento microbiano, producción de toxinas y resistencia al calor, también juega un papel importante en la estabilidad física y química en la calidad de los alimentos.

La relación entre la actividad acuosa y el contenido de humedad en equilibrio a una temperatura constante es llamada isoterma de adsorción y/o desorción de humedad, la cual, hace referencia a procesos de adsorción (hidratación) o desorción (deshidratación). La información obtenida es valiosa en el caso de estudios de almacenamiento de productos secos, para determinar y establecer condiciones óptimas de almacenamiento, predicción de vida útil y selección del material de empaque adecuado (Ramírez et al., 2014).

El interés de este trabajo es estudiar el fenómeno de adsorción de humedad en microcápsulas de jugo de carambola empleando goma Arábica (GA) y maltodextrina DE-10 (MD) como agentes encapsulantes a partir de la obtención de isotermas experimentales, y establecer condiciones de estabilidad física mediante un análisis termodinámico de adsorción para producir alimentos mínimamente procesados con características sensoriales aprobadas por el potencial consumidor.



## 2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible establecer condiciones de estabilidad de microcápsulas de jugo de carambola para producir alimentos funcionales mínimamente procesados que sensorialmente sean aprobados por el consumidor?



## 2.3 OBJETIVOS

### 2.3.1 Objetivo general

Analizar el proceso de adsorción de humedad en microcápsulas de jugo de carambola para establecer condiciones de estabilidad que permitan producir alimentos funcionales con atributos sensoriales de calidad.

### 2.3.2 Objetivos específicos

- Extraer jugo de carambola (*Averrhoa carambola*).
- Preparar dispersiones de jugo de carambola con maltodextrina DE-10 (MD), y goma Arábica (GA) con un contenido de sólidos del 20% en peso.
- Obtener microcápsulas de jugo de carambola mediante secado por aspersión
- Obtener isotermas de adsorción experimentalmente mediante el método gravimétrico de celdas en equilibrio.
- Ajustar los datos experimentales obtenidos mediante diferentes modelos cinéticos de adsorción.
- Establecer las condiciones de estabilidad de las microcápsulas de jugo de carambola.
- Elaborar alimentos funcionales (yogurt y gelatina) adicionados con microcápsulas de jugo de carambola.
- Evaluar sensorialmente los alimentos funcionales producidos.



# CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA



### 3.1 MATERIALES

Los frutos de carambola empleados fueron adquiridos de un centro comercial de la ciudad de Toluca. Los materiales encapsulantes utilizados fueron goma Arábica (GA) (*Acacia senegal*) adquirida de Industrias Ragar S.A. de C.V. (Ciudad de México). Maltodextrina con un equivalente de dextrosa DE-10 (MD) se compró de la compañía Complementos Alimenticios S.A. de C.V. (Naucalpan, Estado de México, D.F.). Todos los reactivos y solventes fueron grado analítico (Sigma Aldrich) y el agua empleada fue destilada.

### 3.2 EXTRACCIÓN Y PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL JUGO NATURAL DE CARAMBOLA

Los frutos de carambola se lavaron, se seleccionaron de tal forma que no tuvieran lesiones visuales. Se quitó la cáscara de cada fruto cuidadosamente con un cuchillo y se procedió a cortar por la mitad, conservando únicamente la pulpa del fruto para obtener el jugo de carambola. El jugo fue filtrado empleando una malla Tyler #9 (2000  $\mu\text{m}$ ) para eliminar sólidos en suspensión, con el objeto de facilitar la atomización del jugo durante el secado por aspersión. Finalmente, el jugo filtrado fue almacenado en una cámara de congelamiento, y se descongeló a una temperatura  $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  antes de emplearlo en las diferentes pruebas.

Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del jugo de carambola, las cuales incluyeron la determinación del pH, contenido de sólidos totales solubles, densidad, contenido de vitamina C y parámetros de color.

El pH del jugo se determinó con un electrodo de vidrio conectado a un ThermoOrion pH-metro (modelo 410APlus, EUA) y la cantidad de sólidos solubles ( $^{\circ}$  Brix) con un refractómetro Atago Hand-Held (model ATC-IE, Brix 0-32%, EUA), la densidad del jugo se midió con un picnómetro. Todos los parámetros se determinaron a temperatura ambiente ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ).

El contenido de vitamina *C* se determinó por titulación con 2,6-dicloro-indofenol como se describe en los métodos oficiales de análisis (AOAC, 1980). La vitamina *C* se consideró en este trabajo como criterio para evaluar la retención de la calidad del producto después del proceso de secado por aspersión.

Los parámetros de color del jugo ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , valores de Hunter), se determinaron mediante un colorímetro Hunter Lab (MS-4,500 L. Format 2. ¼ P65/10°, Virginia, EUA). El instrumento fue calibrado con una placa de cerámica blanca ( $L^* = 99.99$ ,  $a^* = 0.00$ ,  $b^* = 1.81$ ). Las mediciones se realizaron directamente en la superficie de las muestras.

### **3.3 PRODUCCIÓN DE MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA MEDIANTE LA TÉCNICA DEL SECADO POR ASPERSIÓN**

Se formularon dos tipos de dispersiones biopoliméricas con el jugo de carambola extraído y empleando a la goma Arábica y maltodextrina como materiales encapsulantes para conformar dispersiones acuosas al 20% de sólidos totales. Posteriormente, las dispersiones fueron homogeneizadas en un homogeneizador Ultra-Turrax T50 (IKA-WERKE Works Inc., Wilmington, NC, EUA) a una velocidad de 6400 rpm por 8 min. Las dispersiones fueron deshidratadas en un secador por aspersión marca Nichols/Niro (NY, EUA).



**Figura 14.** Secador por aspersión marca Nichols/Niro



Las condiciones de operación del equipo fueron las siguientes: Flujo volumétrico de alimentación 40 cm<sup>3</sup>/min, temperatura de entrada del medio desecante 140 ± 5 °C, temperatura de salida del aire de 80 ± 5 °C y una presión de aire comprimido de 4 bar. Finalmente, las microcápsulas obtenidas fueron recolectadas y colocadas en bolsas de plástico marca ziploc selladas y cubiertas con aluminio para evitar la interacción con factores ambientales como la luz y el calor.

### **3.4 CONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE AGUA EN LAS MICROCÁPSULAS**

Las microcápsulas producidas se colocaron en desecadores conteniendo P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por tres semanas a temperatura ambiente con el objetivo de disminuir lo más posible el contenido de humedad de los sólidos. Después muestras de microcápsulas (1 ± 0.001 g) se colocaron en diferentes medios de humedad relativa a 25, 35 y 40°C con el uso de mini secadores conteniendo soluciones saturadas salinas en el intervalo de actividades de agua de 0.11 a 0.85 (Labuza, Kaanane & Chen, 1985). A intervalos de 7 días, la ganancia de humedad de las microcápsulas se determinó por diferencia en peso después de secarlas a 60°C en presencia de perclorato de magnesio como desecante y este proceso se detuvo hasta alcanzar el equilibrio, es decir, hasta que las muestras ya no presentaron un incremento de humedad. La actividad acuosa y el contenido de humedad de las microcápsulas se determinaron con un medidor de actividad de agua Aqualab con compensador de temperatura (modelo series 3 TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA) y con una balanza analítica electrónica (Ohaus AP200).

Las isotermas de adsorción experimentales se ajustaron a la ecuación de Guggenheim-Anderson-De Boer (GAB) ecuación [6], considerado como un modelo teórico robusto donde sus tres parámetros poseen una interpretación física del proceso de adsorción (Rizvi, 1986):

$$M = \frac{M_0 C K a_w}{(1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w)} \quad [6]$$



En esta ecuación,  $M$  es el contenido de humedad en el equilibrio [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.],  $M_0$  es el contenido de humedad en la monocapa [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.],  $C$  es la constante de Guggenheim y  $a_w$  es la actividad de agua.

Los valores de los parámetros de la ecuación de GAB ( $M_0$ ,  $C$ ,  $K$ ) se determinaron por un análisis de regresión no-lineal con el software Polymath versión 6.1. Para asegurar que se realizó un ajuste matemático aceptable, se evaluó el porcentaje de error (módulo de desviación relativo promedio,  $E$ ) entre los datos experimentales y los valores estimados del contenido de humedad mediante la siguiente ecuación (McLaughlin & Magee, 1998):

$$E = \frac{100}{N} \sum \frac{|M_i - M_{Ei}|}{M_i} \quad [8]$$

En la ecuación [8]  $M_i$  representa los valores experimentales del contenido de humedad [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.],  $M_{Ei}$  son los valores de humedad [kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.] estimados por el modelo de GAB y  $N$  es el número de datos experimentales. Se supone como un buen ajuste cuando  $E < 5 \%$ .

### **3.5 CONDICIONES DE ESTABILIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA**

Se determinaron las propiedades termodinámicas diferenciales (entalpía diferencial) e integrales (entropía integral) y las condiciones de actividad de agua-temperatura en el punto o región de mínima entropía integral, considerado como el punto o región óptimo donde las microcápsulas pueden prolongar su vida de anaquel y retardar reacciones deteriorativas. Las propiedades termodinámicas se establecieron de acuerdo a la metodología descrita por Gutiérrez-Velázquez et al. (2024).

### **3.6 MORFOLOGÍA DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA**

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) modelo JSM-6510 (Jeol Co. Ltd., Tokio, Japón) con el modo GB-H para obtener imágenes de



morfología de microcápsulas en condiciones de operación estándar. Como el microscopio electrónico funciona en condiciones de ultra vacío, no fue necesario metalizar las muestras de microcápsulas.

### ***3.7 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS MICROCÁPSULAS Y PROPIEDADES DE CALIDAD DE LOS ENCAPSULADOS***

Muestras de cada tipo de microcápsulas fueron almacenadas a las condiciones óptimas de almacenamiento (25 °C) desde un punto de vista termodinámico, y se procedió a evaluar las propiedades fisicoquímicas de las cápsulas y se determinaron las propiedades de calidad de los microencapsulados.

### ***3.8 HIGROSCOPICIDAD***

La higroscopicidad se expresa como el contenido de humedad final al que se llega después de exponer las microcápsulas a aire húmedo con una humedad relativa del 79.5%, esta humedad relativa se obtuvo con una disolución saturada de sal de nitrato de potasio ( $KNO_3$ ), a 25°C. La disolución formada se transfirió a un desecador y se colocaron 5 muestras de 2 gramos de microcápsulas utilizando pequeños porta muestras de plástico, tanto para colocar cada muestra por encima de la disolución saturada como para permitir la transmisión de humedad. El desecador se colocó en una estufa de convección forzada (marca Riossa, México, D.F.) a 25 °C y a intervalos de 15 min se fue pesando cada muestra hasta que la diferencia entre dos mediciones del peso no excediera 0.5%. Finalmente, la higroscopicidad se calculó mediante la expresión descrita por Martinelli, Gabas & Telis-Romero (2007).

### ***3.9 DISPERSABILIDAD***

15 g de cada tipo de microcápsulas se agitaron con 100 g de agua a 25°C en un vaso de precipitado de 125 ml. La agitación se llevó a cabo empleando un caframo a 200 rpm por 15 s. El polvo que no se dispersó se filtró en un tamiz Tyler #9 (200  $\mu$ m). La cantidad de



materia seca presente en la muestra filtrada fue estimada midiendo el contenido de humedad de está empleando la técnica de termogravimetría de estufa al vacío (Martinelli, Gabas & Telis-Romero, 2007).

### **3.10 TIEMPO DE REDISPERSIÓN DE LAS MICROCÁPSULAS**

Un gramo de muestra de cada microcápsula fue colocado en 40 g de agua destilada, esto fue seguido por una agitación mediante vórtex. Se tomó como tiempo inicial el contacto de las microcápsulas con el agua hasta que no hubo evidencia visual de partículas de polvo y el tiempo se registró usando un cronómetro (Rodríguez-Huezo et al., 2004).

### **3.11 RETENCIÓN DE VITAMINA C EN LAS MICROCÁPSULAS REHIDRATADAS**

10 g de microcápsulas fueron disueltos en una cantidad de agua suficiente para obtener exactamente la misma cantidad de sólidos totales solubles (° Brix) que el jugo natural. Posteriormente se filtró y se centrifugó la muestra a 4000 rpm por 10 minutos con el objetivo de separar el material sólido y obtener un líquido, al cual se le determinó el contenido de vitamina C de acuerdo a la metodología descrita en AOAC (1980).

### **3.12 CAMBIO DE COLOR TOTAL DE LAS MICROCÁPSULAS REHIDRATADAS**

10 g de microcápsulas fueron disueltos en una cantidad de agua suficiente para obtener exactamente la misma cantidad de sólidos solubles (° Brix) que el jugo natural. Los parámetros de color fueron determinados de acuerdo a la metodología descrita previamente. El cambio total de color ( $\Delta E$ ) del jugo natural contenido en las microcápsulas fue determinado utilizando la siguiente ecuación:

$$DE = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad [9]$$



En la ecuación [9],  $L_0^*$ ,  $a_0^*$  y  $b_0^*$  corresponden a los parámetros de color del jugo natural y  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  son los parámetros de color del producto reconstituido (Rodríguez-Hernández et al., 2005).

### **3. 13 ANÁLISIS SENSORIAL DE PRODUCTOS FUNCIONALES CONTENIENDO MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA**

Los encapsulados desarrollados a partir de jugo de carambola (JC) con MD y GA fueron aplicados para desarrollar 8 formulaciones de productos funcionales considerando como vehículos de aplicación yogurt natural y gelatina sin sabor, con y sin la adición de jugo y fruto fresco en una relación 1:1. La evaluación sensorial de los productos formulados se realizó con 33 panelistas que fungieron como evaluadores sensoriales, los cuales evaluaron los atributos sensoriales de color, olor, sabor y textura en boca, así como el nivel de aceptación con base en una escala hedónica de 7 puntos. Asimismo, evaluaron el nivel de consumo con base en una escala afectiva descriptiva de 5 puntos. También se evaluaron la intensidad y punto perfecto (JAR) del atributo sensorial del sabor con base en escalas descriptivas de 5 puntos. Las escalas sensoriales utilizadas se presentan en las tablas 13-16. El análisis de datos sensoriales se realizó mediante el programa estadístico Minitab 20.0. (Ares y Jaeger, 2015; Kim et al., 2029; Aykan et al., 2020; Fabela-Morón et al., 2020).

**Tabla 13.** Escala sensorial hedónica de 7 puntos para evaluar atributos sensoriales

<b>Atributo</b>	<b>Escala categórica</b>
Me gusta extremadamente	1
Me gusta mucho	2
Me gusta ligeramente	3
Ni me gusta ni me disgusta	4
Me disgusta ligeramente	5



Me disgusta mucho	6
Me disgusta extremadamente	7

*Fuente. Propia*

**Tabla 14.** Escala sensorial hedónica de 5 puntos para evaluar nivel de consumo.

Nivel de consumo	Escala categórica
Siempre	1
Frecuentemente	2
Me es indiferente	3
No habitualmente	4
Nunca	5

**Tabla 15.** Escala sensorial JAR para evaluar intensidad del sabor

Sabor (intensidad)	Escala categórica
Ausente	0
Poco intenso	1
Moderado intenso	2
Medianamente intenso	3
Muy intenso	4

**Tabla 16.** Escala sensorial para evaluar el punto perfecto de sabor.

Sabor (Punto perfecto)	Escala categórica
Mucho más de lo que esperaba (muy alto)	2
Un poco más de lo que esperaba (un poco alto)	1
Justo como lo esperaba (adecuado)	0
Un poco menos de lo que esperaba (un poco bajo)	-1
Mucho menos de lo que esperaba (muy bajo)	-2



# CAPÍTULO 4

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL JUGO DE CARAMBOLA

La tabla 17 muestra las propiedades fisicoquímicas del jugo natural de carambola (pH, densidad, sólidos totales solubles y cantidad de vitamina C). Se puede observar que el jugo posee un pH ácido (2.77) característico de los frutos tropicales, un beneficio de este tipo de pH es el atributo que contribuye a la inhibición microbiana. Los sólidos totales solubles fueron de 10 °Brix aproximadamente, muy semejantes a los contenidos en el jugo de maracuyá y sandía, esta propiedad tiene su importancia en evaluar la calidad del jugo y así la preferencia del consumidor. (Carrillo-Navas et al., 2011; Quek, Chok & Swedlund, 2007). Para la propiedad de la densidad del jugo se identifica que es inferior a la de agua pura medidos a 20 °C. El contenido de vitamina C es un indicador más de la calidad del jugo, además, en el proceso de secado por aspersión la vitamina C juega un papel importante en la evaluación del grado de protección del jugo por los agentes encapsulantes.

En la tabla 18 se observan los parámetros de color iniciales del jugo, se observa que se tiene un color amarillo brillante indicado por los valores de  $L_0^*$  y  $b_0^*$ . Los parámetros de color son una característica importante que refleja la calidad sensorial del jugo.

**Tabla 17.** Propiedades fisicoquímicas del jugo natural de carambola

Propiedad	Valores
pH	$2.77 \pm 0.40$
Sólidos totales solubles (° Brix)	$10.20 \pm 0.60$
Vitamina C (mg/100 mL)	$2.55 \pm 0.80$
Densidad (g/mL)	$0.93 \pm 0.10$

*Referencia: Propiaz*

**Tabla 18.** Parámetros de color iniciales del jugo de carambola

Parámetros de color	
$L_0^*$ (claros-oscuros)	$3.31 \pm 0.74$
$a_0^*$ (rojos-verdes)	$0.69 \pm 0.04$
$b_0^*$ (azules-amarillos)	$0.15 \pm 0.08$

*Referencia: Propia*



## **4.2 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LAS MICROCÁPSULAS DEL JUGO DE CARAMBOLA**

Las figuras 15 y 16 presentan las isotermas de adsorción experimentales de las microcápsulas de goma arábica y maltodextrina respectivamente a 25, 35 y 40 °C, estas temperaturas representan las posibles condiciones de almacenamiento para las microcápsulas. De acuerdo a la clasificación de Brunauer, las curvas presentan una forma sigmoideal tipo II presente principalmente en los alimentos, caracterizadas por sistemas de alto peso molecular (Stępień et al., 2020) e indicativas de la presencia de adsorción en multicapas, así como en la monocapa, donde la actividad de agua promueve la adsorción de agua en superficies porosas y granulares (Silva et al., 2021). Se aprecia que estas isotermas tipo II están formadas por tres regiones, la primera región ( $a_w < 0,3$ ) se atribuye al contenido de humedad de la monocapa donde las moléculas de agua están fuertemente unidas a la matriz del sólido, en esta región el agua presente no puede ser ocupada para participar en reacciones; la segunda región ( $0,3 < a_w < 0,7$ ) presenta una curva casi lineal y corresponde al agua de las multicapas; y la última zona ( $a_w \geq 0,7$ ) indica que el agua está llenando los capilares (microcanales) del alimento y, por tanto, se tendrá un exceso de agua libre que estará disponible para ocasionar reacciones microbiológicas y químicas (Ociecek et al., 2022; Silva et al., 2021; Rosa et al., 2021).

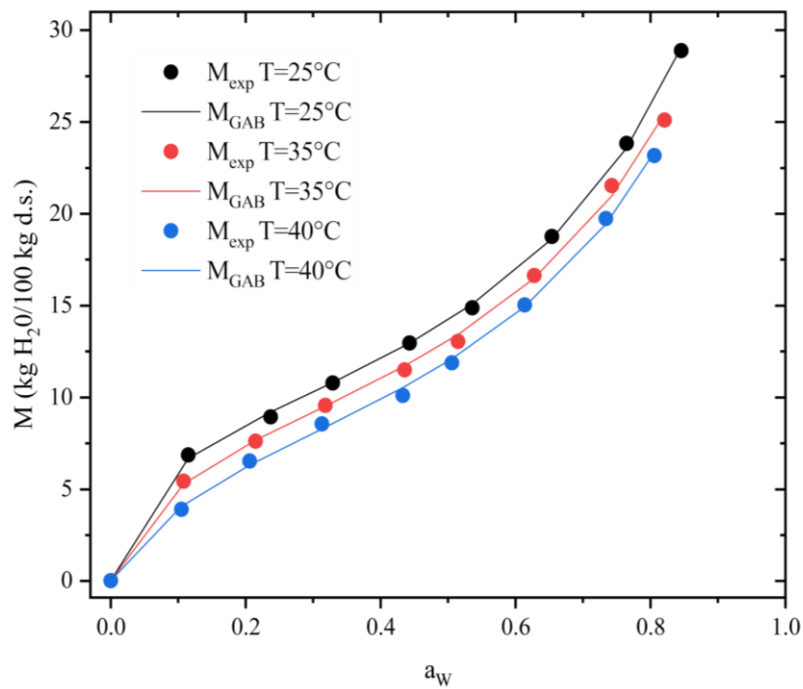


Figura 15. Isothermas de adsorción de las microcápsulas del jugo de carambola con GA  
Referencia: Propia

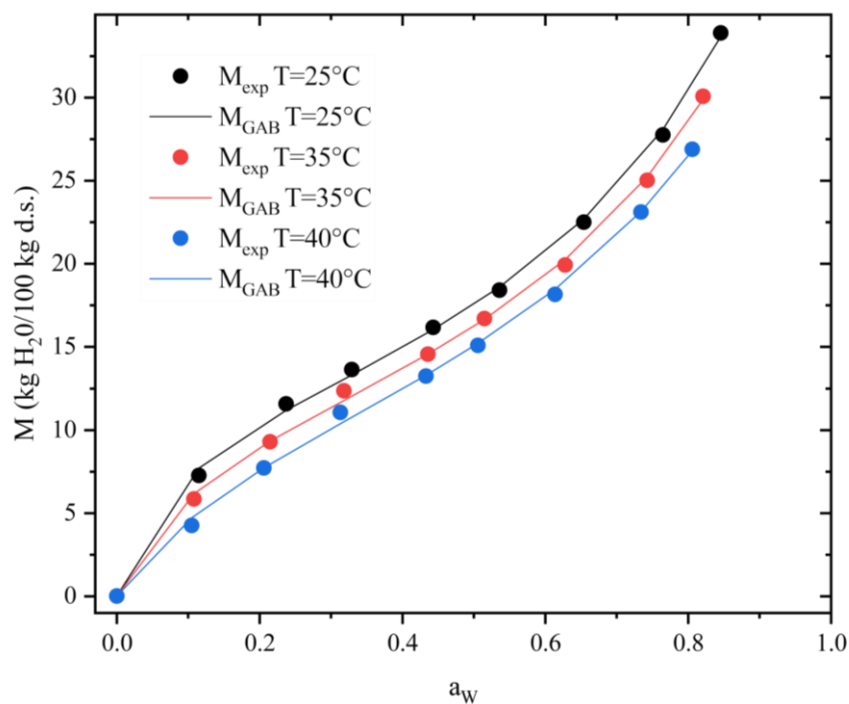


Figura 16. Isothermas de adsorción de las microcápsulas del jugo de carambola con MD

Referencia: Propia



De igual manera, las figuras muestran que la temperatura mientras sea constante, el contenido de agua en el equilibrio  $[M]$  aumentará de acuerdo con la actividad del agua  $[a_w]$ , como se observa en las temperaturas analizadas, por otra parte el incremento de la temperatura no genera un efecto o muestra un cambio significativo en el aumento o disminución del contenido de agua, se establece este razonamiento debido a que los gráficos se encuentran prácticamente superpuestos en todo el intervalo de actividad de agua, el único cambio considerable se presenta al final de las curvas, ya que la pendiente a altos contenidos de actividad acuosa es decir donde el agua libre predomina en las microcápsulas, se observa un mayor contenido de agua en el equilibrio para la temperatura de 25°C

Las tablas 19 y 20 muestran los parámetros de ajuste del modelo cinético de GAB para los dos sistemas encapsulados y sus tres isotermas a 25, 35 y 40 °C. El contenido de agua de la monocapa presente en la primera región, se refiere al parámetro utilizado para cuantificar la cantidad de agua fuertemente unida a los sitios de adsorción del sólido. Este parámetro es donde se minimizan las reacciones de degradación microbiológica y bioquímica, dando como resultado una mayor estabilidad en las microcápsulas (Hoyos-Leyva et al., 2018; Velázquez-Gutiérrez et al., 2015; Chranioti et al., 2015).

Para el caso de las microcápsulas con GA, los valores de  $M_0$  variaron de 8.92 [25°C] a 8.07 [40°C] kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s., es decir, el contenido de agua en la monocapa fue disminuyendo conforme se incrementó la temperatura de almacenamiento; mientras que los encapsulados con MD no reflejan una tendencia ascendente o descendente al incrementarse la temperatura. Los valores obtenidos para  $M_0$  con microcápsulas de MD muestran valores más altos (aproximadamente kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.) con respecto a la GA (8 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s), este fenómeno ha sido observado por otros autores (Pérez-Alonso et al., 2006; Sánchez-Sáenz et al., 2011). Los valores del contenido de agua de la monocapa fueron reportados por Carrillo-Navas et al. (2011) para microcápsulas de jugo de maracuyá a 25 y 35 °C mostraron similitudes con los hallazgos de este estudio.



El parámetro  $C$  está relacionado con las interacciones adsorbente-adsorbato, donde los valores más altos de  $C$  indican una unión más fuerte. En este estudio, las microcápsulas con GA mostraron valores entre 19.932 y 8.800 y los microencapsulados con MD presentaron valores entre 14.713 y 6.891 indicando que estos valores son relativamente grandes, los cuales se atribuyen a una alta higroscopicidad por parte de los polisacáridos empleados como agentes encapsulantes. Por otra parte, el parámetro  $K$  está relacionado con las interacciones de las moléculas adsorbente-multicapa, los valores de  $K$  para los microencapsulados con GA oscilan entre 0.827 y 0.834, mientras que los encapsulados con MD se encuentran entre 0.780 y 0.745 en el intervalo de temperatura estudiado. Entre más próximos estén los valores de  $K$  al valor de 1 el comportamiento del agua en los sólidos se aproxima a un agua libre en la estructura multicapa de las microcápsulas (Quirijns et al., 2005).

De manera general se puede observar una tendencia que a menor temperatura se presenta una unión más fuerte  $C$  independientemente del agente encapsulante ocupado. Sin embargo, se identifica que la GA tiene una unión más fuerte. Para el parámetro  $K$  se observa que el comportamiento es el mismo cuando se utiliza MD, es decir conforme la temperatura aumenta el parámetro  $K$  disminuye, por otra parte, para la utilización de GA no se encuentra una tendencia de comportamiento.

Tabla 19. Parámetros de GAB de microcápsulas del jugo de carambola con GA.

$T$ (°C)	$M_0$ (kg H <sub>2</sub> O/100 kg s.s.)	$C$	$K$	$r^2$	$E$ (%)
25	8.92	19.932	0.827	0.999	1.21
35	8.50	13.326	0.825	0.998	1.65
40	8.07	8.800	0.834	0.999	2.47

Referencia: Propia

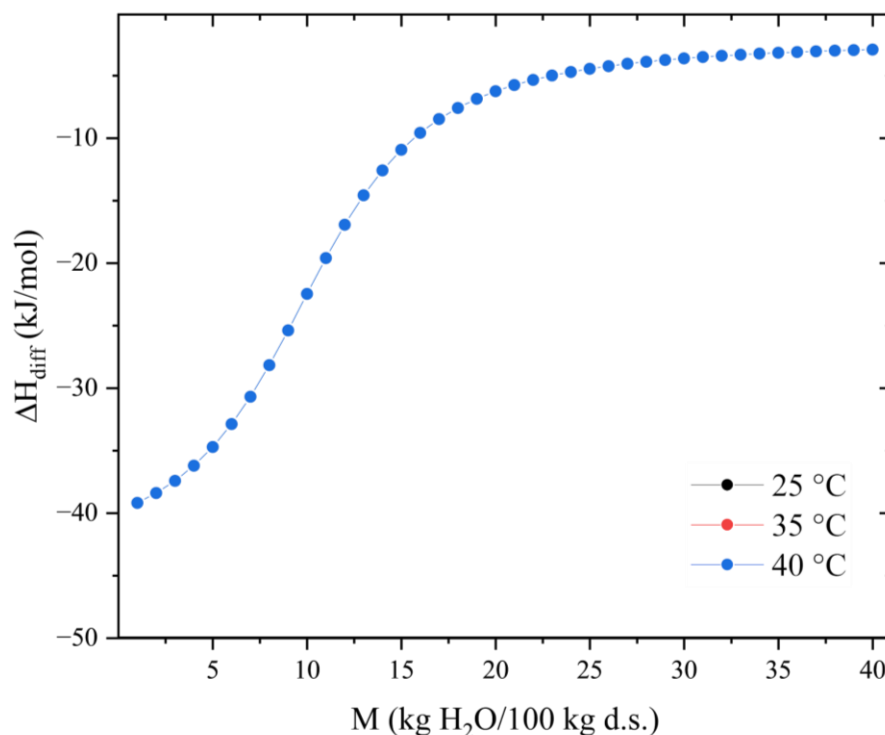
Tabla 20. Parámetros de GAB de microcápsulas del jugo de carambola con MD

$T$ (°C)	$M_0$ (kg H <sub>2</sub> O/100 kg s.s.)	$C$	$K$	$r^2$	$E$ (%)
25	11.83	14.713	0.780	0.999	2.03
35	11.38	10.708	0.777	0.999	1.72
40	11.74	6.891	0.745	0.999	2.53

Referencia: Propia

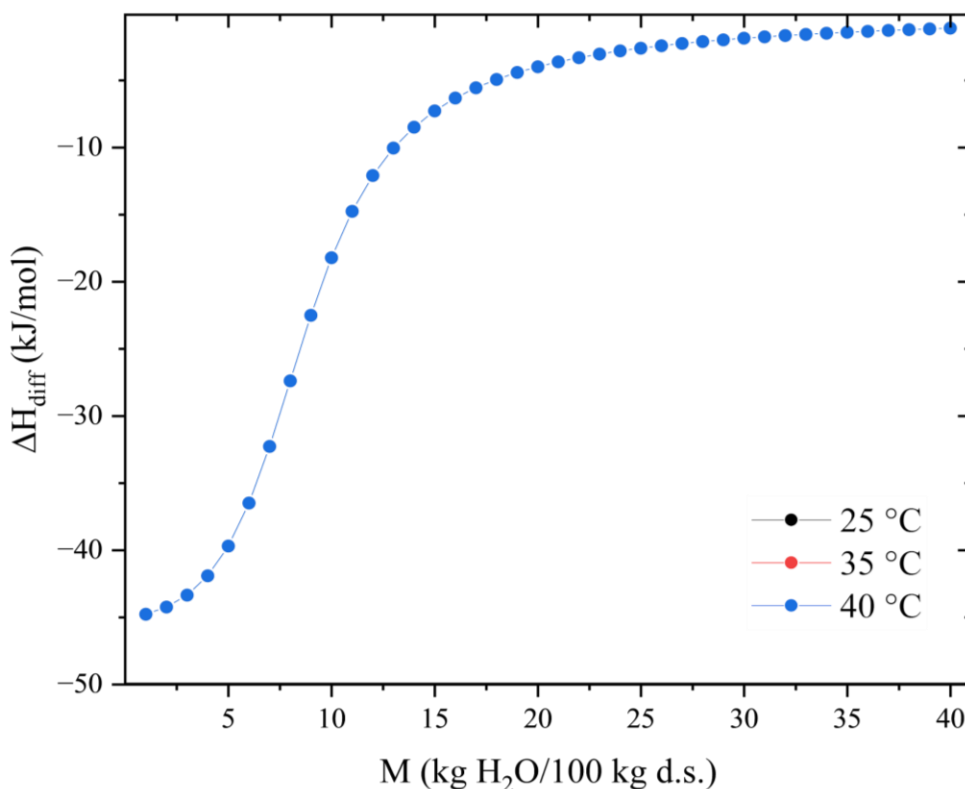
### 4.3 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA

Las figuras 17 y 18 muestran las curvas de entalpía diferencial de los dos tipos de microcápsulas en el intervalo de temperaturas estudiado. Para los dos sistemas encapsulados, las microcápsulas a bajos contenidos de agua (1-5 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.) muestran valores de entalpía con un carácter más negativo; este comportamiento se puede atribuir a los grupos hidrófilos de la GA y MD donde las moléculas de agua requieren menor energía para unirse a los sólidos. Cuando el contenido de agua aumentó (5-20 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.), la entalpía diferencial disminuyó debido a la menor presencia de sitios activos disponibles y a la menor energía de las moléculas de agua requerida para ser adsorbidas en la formación de multicapas (Collazos-Escobar et al., 2022; De Araújo & Da Silva-Pena, 2022). Posteriormente, al aumentar el contenido de humedad (> 20 kg H<sub>2</sub>O/100 kg s.s.), los valores de entalpía diferencial disminuyeron gradualmente; esto se atribuye a la formación de multicapas y a una menor disponibilidad de sitios activos de adsorción (Velázquez-Gutiérrez et al., 2015).



**Figura 17.** Entalpía diferencial de microcápsulas de jugo de carambola: (a) GA

**Referencia:** Propia



**Figura 18.** Entalpía diferencial de microcápsulas de jugo de carambola: (b) MD

**Referencia:** Propia

Las figuras 19 y 20 presentan los gráficos de la energía libre de Gibbs diferencial de cada agente encapsulante, este es un parámetro relacionado con la espontaneidad de la adsorción de agua y la afinidad entre el agua y las microcápsulas. Las microcápsulas a diferentes temperaturas y con ambos agentes encapsulantes presentaron el mismo comportamiento. Los valores de  $\Delta G$  fueron negativos y muy cercanos entre sí en el intervalo de temperatura estudiado, lo que indica un proceso de adsorción espontáneo (De Araújo & Da Silva-Pena, 2022). Rizvi (1995) explicó que cuando el proceso de adsorción es espontáneo, ocurren fuertes enlaces intermoleculares (interacciones) relacionados con la entalpía, lo que lleva a una mayor reducción en la libertad configuracional de las moléculas de agua, es decir, a un mayor orden del sistema adsorbente-adsorbato.

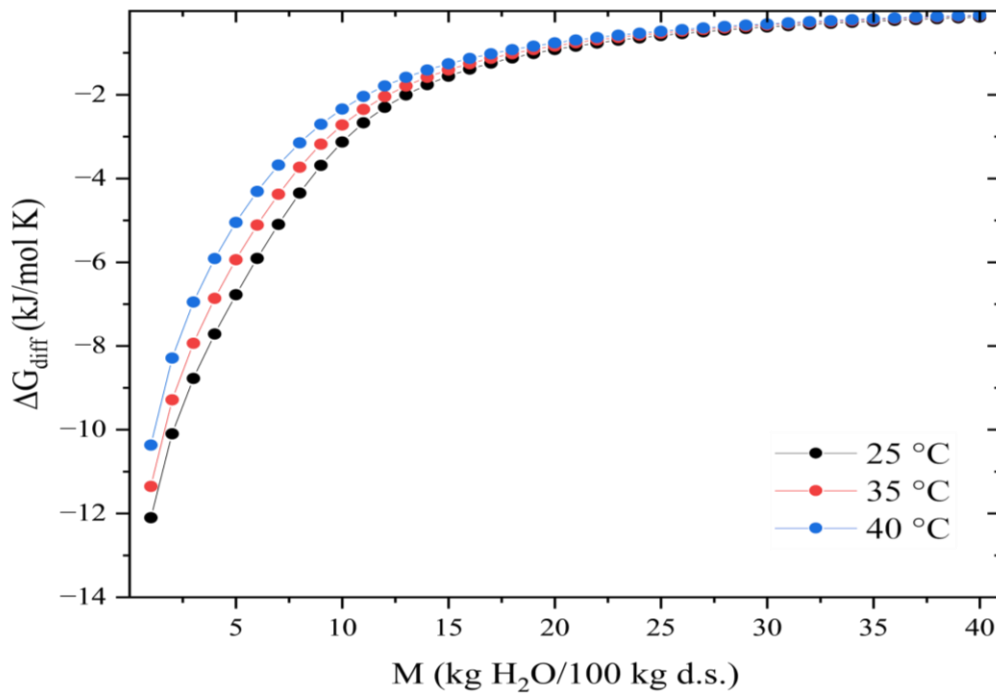


Figura 19. Energía libre de Gibbs diferencial de microcápsulas de jugo de carambola: (a) GA

Referencia: Propia

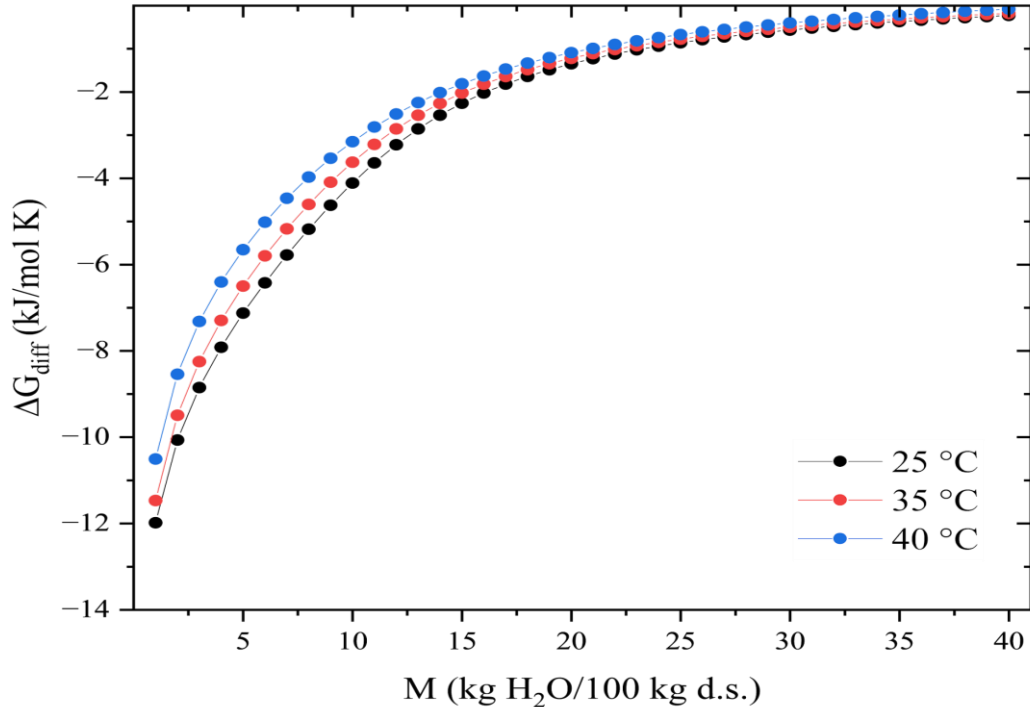


Figura 20. Energía libre de Gibbs diferencial de microcápsulas de jugo de carambola: (b) MD.

Referencia: Propia



Las ilustraciones 21 y 22 muestran la variación de la entropía integral ( $\otimes S_{\text{int}}$ ) con el contenido de agua a 25, 35 y 40°C para las microcápsulas de jugo de carambola encapsulado con GA y MD. Las microcápsulas mostraron una disminución en la entropía integral alcanzando una región mínima y manteniéndose casi constante conforme el contenido de humedad crecía, es decir, los gráficos se volvieron asintóticos.

Si bien ambos agentes encapsulantes tienen el mismo comportamiento con la GA se observa una disminución más prolongada comparada con la MD, en la primera la entropía integral que va desde 1.1 a 0.1 [KJ/molK] aproximadamente, mientras que en la MD la variación solo ocurre de 0.2 a 0.025 [KJ/molK] aproximadamente. Es decir, mientras que la GA tiene una mayor disminución de entropía integral, la MD posee desde un inicio valores bajos

La disminución en la entropía integral representa un incremento en la restricción de la movilidad de las moléculas de agua conforme los sitios disponibles se saturan y los sitios más energéticos se utilizan.

La entropía integral mínima es considerada o interpretada como aquella propiedad que permite cuantificar y conocer la mayor estabilidad de un sistema, en este caso, donde las moléculas de agua logran el arreglo más ordenado dentro del sólido (microcápsula) y enlaces fuertes aparecen entre el adsorbato y el adsorbente, entonces, el agua está menos disponible para participar en reacciones de deterioro (Pérez-Alonso et al., 2006; Spada et al., 2013). Con contenidos de humedad altos, la entropía será la misma que la del agua pura (McMinn et al., 2004).

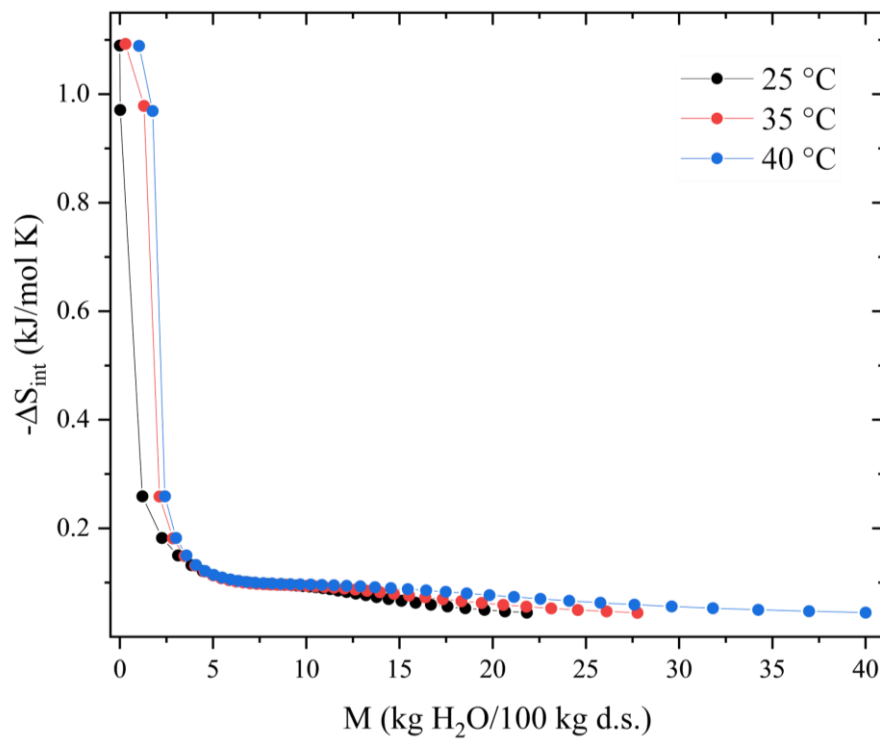


Figura 21. Entropía integral de microcápsulas de jugo de carambola: (a) GA

Referencia: Propia

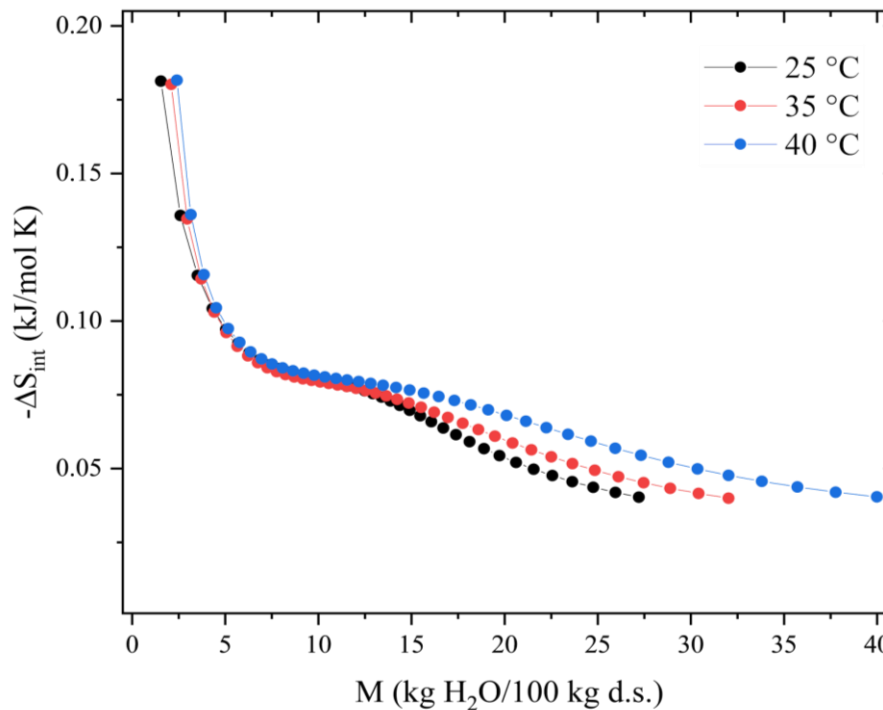


Figura 22. Entropía integral de microcápsulas de jugo de carambola: (b) MD.

Referencia: Propia

Las condiciones de estabilidad máxima de las microcápsulas se obtuvieron del análisis de las condiciones de  $\Delta S_{int}$ ,  $a_w$ , y  $M$  relacionadas con la región mínima (tablas 21 y 22). En ambas tablas se observa que conforme la temperatura se incrementa el contenido de humedad y la actividad de agua en las microcápsulas también se incrementa. Más aún, la entropía integral puede estar directamente relacionada con el orden-desorden de las moléculas de agua adsorbidas en las microcápsulas, y, por lo tanto, es una función útil para estudiar el efecto del método de secado en la estabilidad del producto (Azuara & Beristain, 2006).

**Tabla 21.** Condiciones de estabilidad de las microcápsulas con GA

$T$ (°C)	$M$ (kg H <sub>2</sub> O/100 kg s.s.)	$a_w$
25	5-10	0.092-0.195
35	5-10	0.102-0.402
40	5-10	0.181-0.453

*Referencia: Propia*

**Tabla 22.** Condiciones de estabilidad de las microcápsulas con MD

$T$ (°C)	$M$ (kg H <sub>2</sub> O/100 kg s.s.)	$a_w$
25	5-10	0.085-0.192
35	5-10	0.090-0.282
40	5-10	0.121-0.303

*Referencia: Propia*

Silva et al. (2014) determinaron las condiciones de estabilidad máxima de microcápsulas de aceite de romero utilizando goma Arábica como agente encapsulante y encontraron que la mayor estabilidad ocurría a valores de actividad de agua de 0.358, 0.292, 0.250 y 0.119 en relación con temperaturas de 15, 25, 35 y 40 °C, respectivamente. Sánchez-Sáenz et al., (2011) establecieron las condiciones de máxima estabilidad de microcápsulas de aceite de pimienta y encontraron que la mayor estabilidad ocurría a valores de actividad de agua de 0.44 a 0.71 en un intervalo de temperatura de 25 a 40 °C.

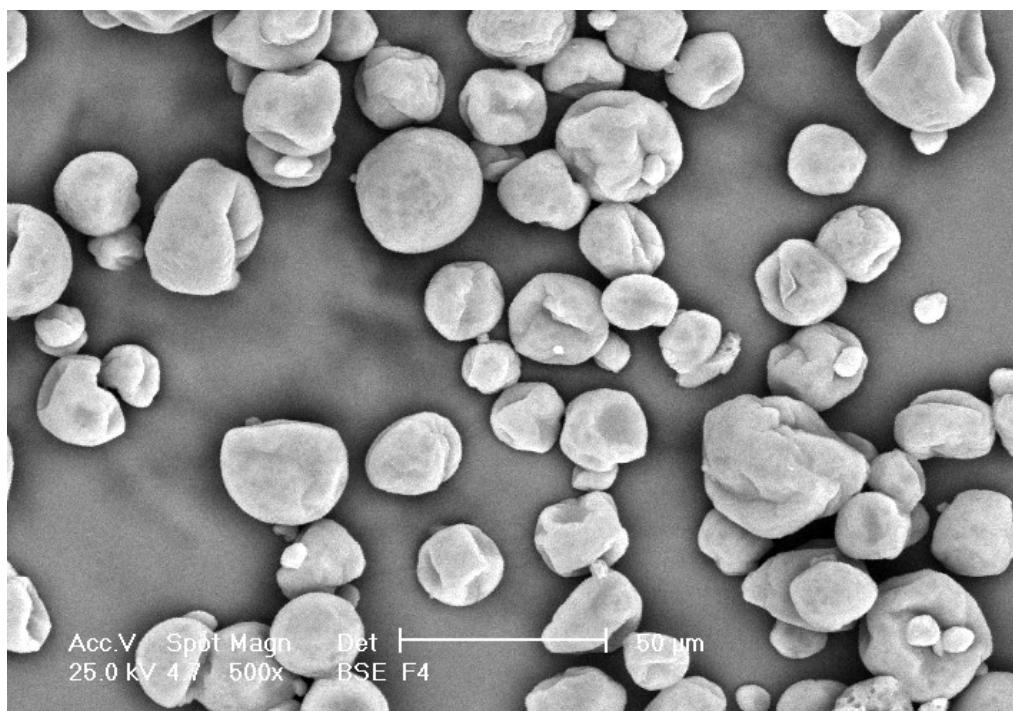


#### **4.4 MORFOLOGÍA DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA**

La Figura 23 y 24 muestran la microestructura de las microcápsulas de jugo de carambola con GA y MD como agentes encapsulantes. Para los dos tipos de microcápsulas, estas presentan una morfología tipo matriz, que es una característica del proceso de secado por aspersión donde el material encapsulado se encuentra incrustado en la parte interior de la cápsula y en el grosor de la misma.

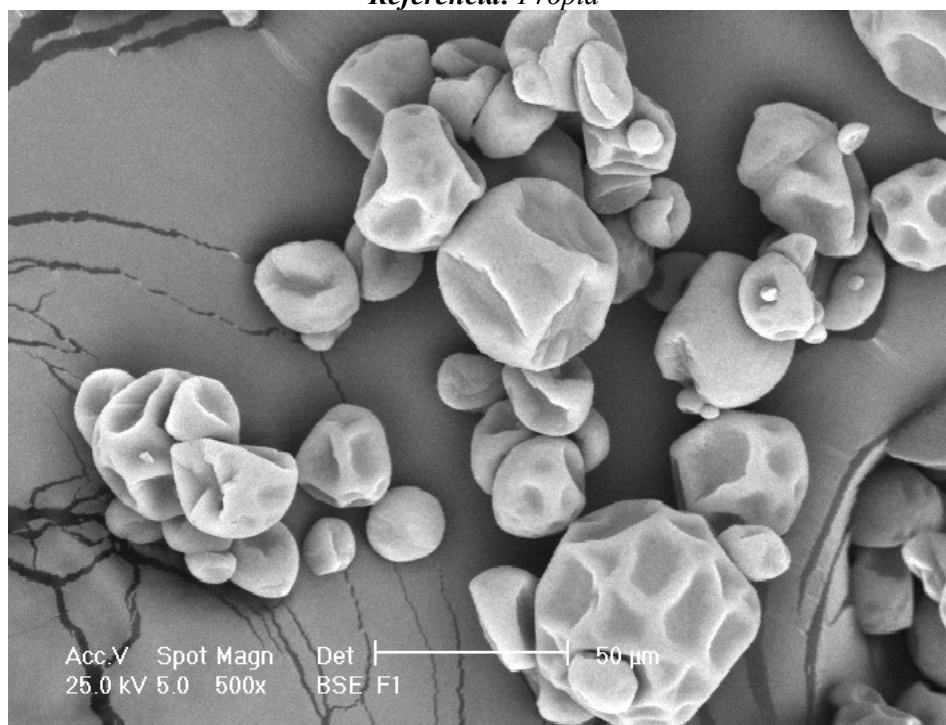
En las microcápsulas con GA se identifica una forma semiesférica de tamaños irregulares con pequeñas aglomeraciones que son propias características propias del uso de este agente encapsulante (Pérez-Alonso et al., 2006). Por otra parte, los encapsulados con MD muestran abolladuras muy pronunciadas y en algunos casos evidencian superficies ligeramente lisas. Esta última morfología se atribuye a las propiedades inherentes de la MD, que sirvió como agente encapsulante para proteger el jugo, y a las condiciones del proceso de secado, en este se utilizó una boquilla de presión en una disposición paralela de la cámara de secado, facilitando la formación de microgotas que finalmente se someten a secado. para obtener microcápsulas en forma de polvo.

Durante el proceso de secado por aspersión, surgen imperfecciones microestructurales como consecuencia de la evaporación del agua de manera inmediata, lo que lleva a la expansión y posterior colapso del material de la pared (Drusch & Berg, 2008). Estas microestructuras características también se han observado en microcápsulas que contienen aceite de pescado (Espinosa-Andrews et al., 2022), extracto de *Hybiscus sabdariffa* (Ochoa-Velasco et al., 2017), aceite esencial de limón (Cortés-Camargo et al., 2017), aceite de cáscara de naranja (Beristain et al., 2002).



**Figura 23.** *Micrografías de microcápsulas de jugo de carambola con GA como material de pared*

*Referencia: Propia*



**Figura 24.** *Micrografías de microcápsulas de jugo de carambola con MD como material de pared*

*Referencia: Propia*

#### **4.5 PROPIEDADES FÍSICAS, FISICOQUÍMICAS Y DE CALIDAD DE LAS MICROCÁPSULAS DE JUGO DE CARAMBOLA REHIDRATADAS.**

Una vez que se produjeron los dos tipos de microcápsulas de jugo de carambola con GA y MD, estas fueron rehidratadas y ajustadas al mismo contenido de °Brix que el jugo natural en un inicio para evaluar estas propiedades y de esta manera analizar el grado de protección que le brindan al jugo la GA y la MD.



**Figura 25.** *Jugo con MD, Jugo natural y Jugo con GA, respectivamente*

**Referencia:** *Propia*

En la tabla 19 se muestran los resultados referentes a las propiedades físicas de los dos tipos de microcápsulas que se produjeron.

La densidad de partícula considera el volumen total y el peso de las partículas, excluyendo los espacios vacíos entre las partículas. De acuerdo a los resultados, ambos tipos de microcápsulas presentaron valores semejantes tanto para la densidad en el empacada (bulk) como la densidad compactada, promoviendo un empaquetamiento más denso y una mayor compresión entre las partículas.

Por otra parte, la GA presenta una porosidad menor de la MD con una variación de 0.098, dicha propiedad de las partículas generalmente se describe como una medida de la fracción vacía que existe en las partículas cuando son compactadas. De acuerdo a la literatura, se alcanza una estabilidad de almacenamiento mayor en los sistemas de encapsulación cuando las partículas muestran una alta densidad aparente y una baja



porosidad de las partículas, lo que proporciona un mejor manejo en el transporte de los microencapsulados. Tomando en consideración estas dos características (densidad y porosidad) se considera a las GA como un potencial agente encapsulante para la carambola, ya que tiene una mejor porosidad (menor) y densidad (similar) sin embargo a continuación se presentan y analizan las demás propiedades.

El índice de compresibilidad y la relación de Hausner son dos parámetros comúnmente utilizados para describir las propiedades de flujo de las partículas durante las operaciones de procesamiento de alimentos. El índice de compresibilidad indica la capacidad de aglomeración de partículas (cohesividad); mientras que la relación de Hausner determina la fuerza de fricción.

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 23, las microcápsulas producidas con ambos hidrocoloides presentaron valores muy semejantes para ambos parámetros de fluidez, aunque los valores del índice de compresibilidad resultaron ser altos, lo que produjo una alta cohesividad entre las partículas.

**Tabla 23.** *Propiedades físicas de las microcápsulas de jugo de carambola.*

<b>Propiedad física</b>	<b>GA</b>	<b>MD</b>
Densidad empacada [bulk] (g/mL)	0.387	0.334
Densidad compactada (g/mL)	0.560	0.472
Densidad intrapartícula (g/mL)	1.683	1.600
Índice de compresibilidad (-)	30.890	29.190
Relación de Hausner (-)	1.447	1.412
Porosidad interpartícula (-)	0.607	0.705
Contenido de humedad (kg H <sub>2</sub> O/kg microcápsula)	0.031	0.040
Actividad acuosa (-)	0.129	0.228

**Referencia:** *Propia*

El contenido de humedad inicial osciló entre 0.031 y 0.040 kg H<sub>2</sub>O/kg microcápsula para los encapsulados. Cuando el contenido de humedad de las microcápsulas se encuentra por



debajo del 7%, el coeficiente de difusión del agua se reduce y esto disminuye su movimiento a través de la matriz seca y por ende, el sistema es estable a posibles reacciones de descomposición. La actividad acuosa de los polvos estuvo en el intervalo de 0.129-0.228. Este parámetro termodinámico indica que cuando los alimentos se encuentran por debajo de 0.6 ( $a_w < 0,6$ ), estos se consideran estables a cambios microbiológicos.

Los resultados que se muestran en la tabla 24 indican las propiedades de calidad de las microcápsulas (higroscopicidad, dispersabilidad, tiempo de redispersión y retención de vitamina C); la higroscopicidad resultó ser muy alta para los dos tipos de microcápsulas, esto se puede explicar debido a que los biopolímeros que se emplearon como agentes encapsulantes tienen un carácter hidrofílico; sin embargo, no se presentó un grado de apelmazamiento alto (evidencia visual), ya que el porcentaje de dispersabilidad fue alto, y por tanto, el tiempo de redispersión fue menor a un minuto para la cantidad de microcápsula redispersada (1 g), esto infiere que el jugo de carambola encapsulado puede ser utilizado como una bebida en polvo instantánea.

Con respecto a las propiedades de calidad del JC encapsulado, el porcentaje de retención de vitamina C en las microcápsulas de GA durante 6 semanas fue del 80.77% y de la MD fue del 47.37% a 25 °C de almacenamiento.

**Tabla 24.** *Propiedades de calidad de las microcápsulas de jugo de carambola.*

<b>Agente Encapsulante</b>	<b>Higroscopicidad (%)</b>	<b>Dispersabilidad (%)</b>	<b>Tiempo de Redispersión (s)</b>	<b>Retención de Vitamina C [6 semanas @ 25°C]</b>
<b>GA</b>	82.35 ± 3.71	95.41 ± 4.29z	39 ± 1.75	<b>80.77%</b>
<b>MD</b>	<b>79.07 ± 3.16</b>	<b>88.07 ± 3.52</b>	<b>43 ± 1.72</b>	<b>47.37%</b>

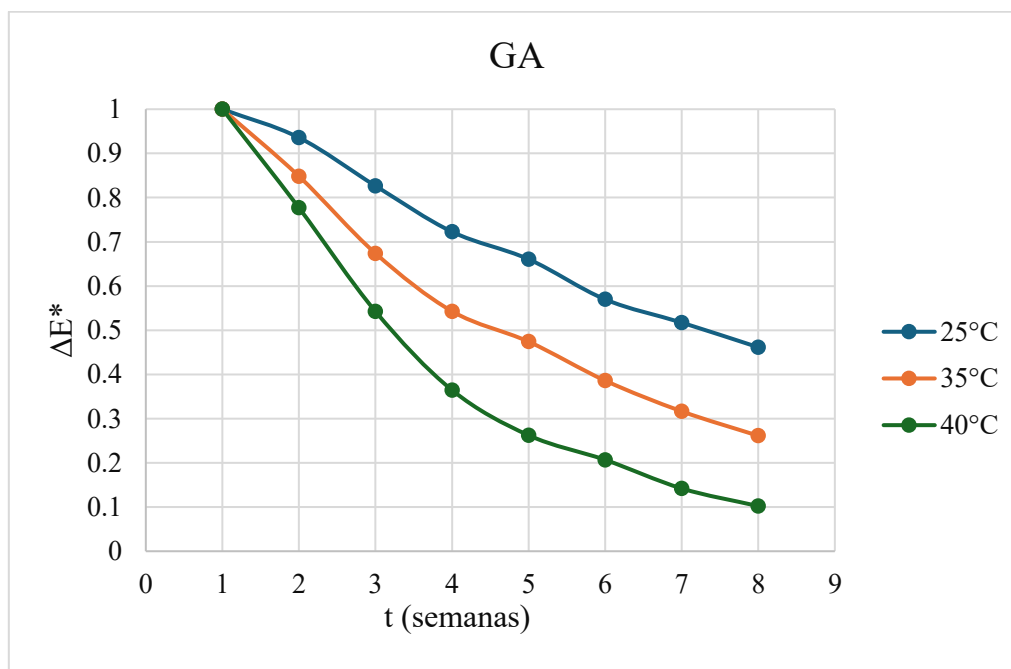
*Referencia: Propia*

#### 4.6 CINÉTICAS DE CAMBIO DE COLOR

Se establecieron las cinéticas de cambio de color total de las microcápsulas de jugo de carambola rehidratadas, las cuales fueron monitoreadas semanalmente por un tiempo de 8 semanas. El cambio de color total se midió de las microcápsulas acondicionadas a 25, 35 y 40°C. Los resultados se muestran en las ilustraciones 26 y 27.

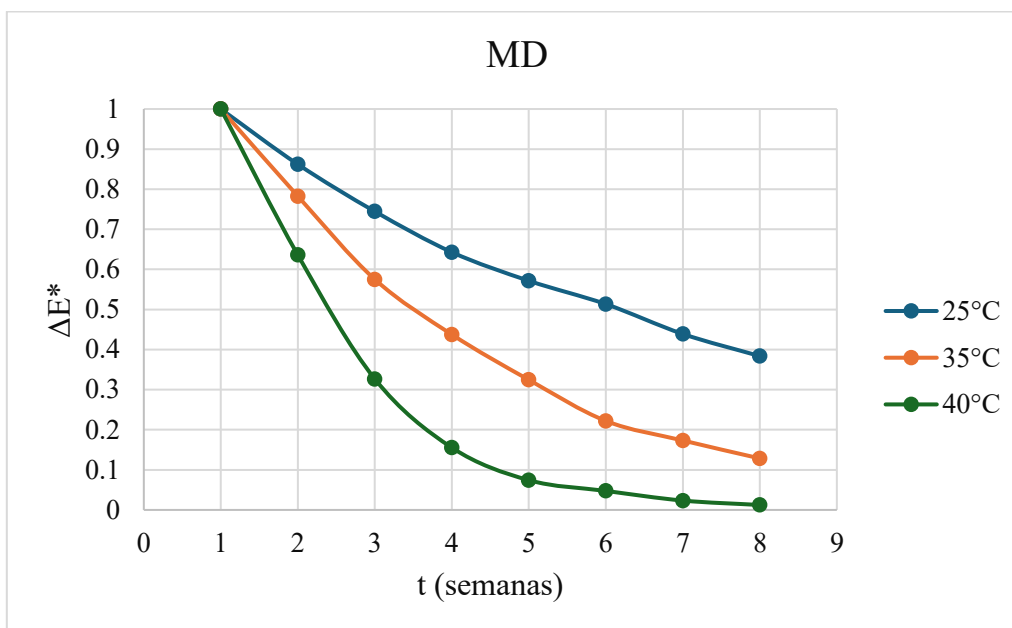
Tanto las cinéticas de la GA y la MD presentan un comportamiento igual ante el cambio de temperatura, a un incremento de temperatura existe una mayor pérdida en el color, lo que se ve afectado con la calidad de las microcápsulas. En la semana ocho el agente activo con MD a una temperatura de 40°C presenta la mayor pérdida de color en ambos sistemas y en las tres temperaturas analizadas.

De manera general, la MD tiene una menor capacidad para conservar el color de los agentes activos, analizando específicamente el comportamiento a 25°C, se observa que la MD tiene una mayor pérdida de color que de igual manera se ve identificado con la propiedad de calidad de retención de vitamina C, como se muestra en la tabla 20, la MD a la misma temperatura posee una menor calidad en comparación con la GA.



**Figura 26.** Cinéticas de cambio de color total de las microcápsulas de JC para GA

**Referencia:** Propia



**Figura 27.** Cinéticas de cambio de color total de las microcápsulas de JC para MD

*Referencia: Propia*

Posteriormente, se modelaron los gráficos de cambio de color en función del tiempo con diferentes modelos cinéticos, donde el modelo de primer orden fue el que arrojó una mejor representación de los datos experimentales. En la tabla 25 se muestran los valores de la constante de velocidad de cambio de color  $k$  y el tiempo de vida media. Estos valores denotan como la temperatura influye de manera directa e importante en la pérdida de color, siendo los valores de la constante de velocidad de reacción mayores a medida que se incrementa la temperatura. Caso contrario, el tiempo de vida media va siendo menor al incrementarse la temperatura.

De manera específica, los parámetros cinéticos muestran que la GA brinda mayor protección contra la pérdida de color del jugo rehidratado, ya que los valores de la constante de velocidad de cambio de color resultaron ser menores y los valores de tiempo de vida media fueron mayores en comparación con los microencapsulados con MD. Esto asume que el carácter macromolecular de la GA sirve como impedimento estérico para que factores pro-deteriorativos como la temperatura, luz y oxígeno influyen en menor medida al cambio de calor del jugo y se infiere desde un punto de vista termodinámico

que la interacción moléculas de agua-GA ofrecen una mayor protección que las interacciones moléculas de agua-MD.

**Tabla 25.** *Parámetros cinéticos del cambio de color de las microcápsulas de JC.*

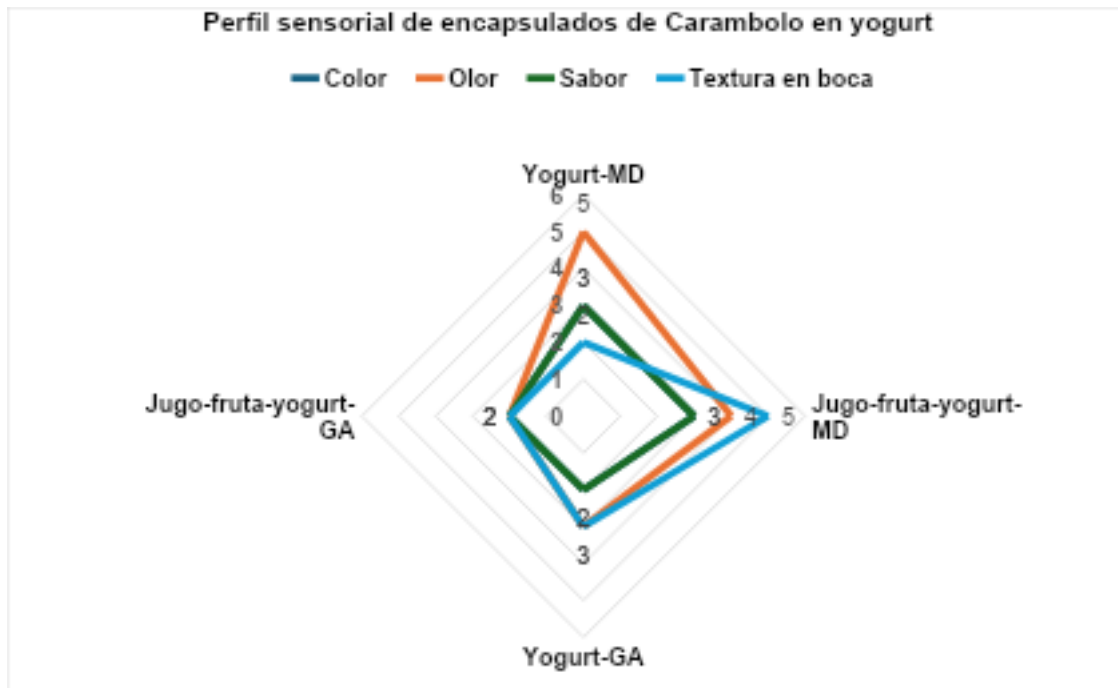
<b>T = 25°C</b>			
	<b>Modelo cinético</b>	<b>t<sub>1/2</sub> (semanas)</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
GA	$\text{Ln } \Delta E^* = 0.1396 - 0.1141 * t$	7.30	0.9965
MD	$\text{Ln } \Delta E^* = 0.1196 - 0.1347 * t$	6.03	0.9982
<b>T = 35°C</b>			
	<b>Modelo cinético</b>	<b>t<sub>1/2</sub> (semanas)</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
GA	$\text{Ln } \Delta E^* = 0.1943 - 0.1921 * t$	4.62	0.9983
MD	$\text{Ln } \Delta E^* = 0.3348 - 0.2983 * t$	3.45	0.9984
<b>T = 40°C</b>			
	<b>Modelo cinético</b>	<b>t<sub>1/2</sub> (semanas)</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
GA	$\text{Ln } \Delta E^* = 0.3559 - 0.3297 * t$	3.18	0.9978
MD	$\text{Ln } \Delta E^* = 0.7294 - 0.6409 * t$	2.22	0.9974

$\Delta E^*$  = Cambio de color total; t = Tiempo de almacenamiento (semanas);  
t<sub>1/2</sub> = Tiempo de vida medio (semanas)

**Referencia:** *Propia*

#### 4.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PARTE SENSORIAL

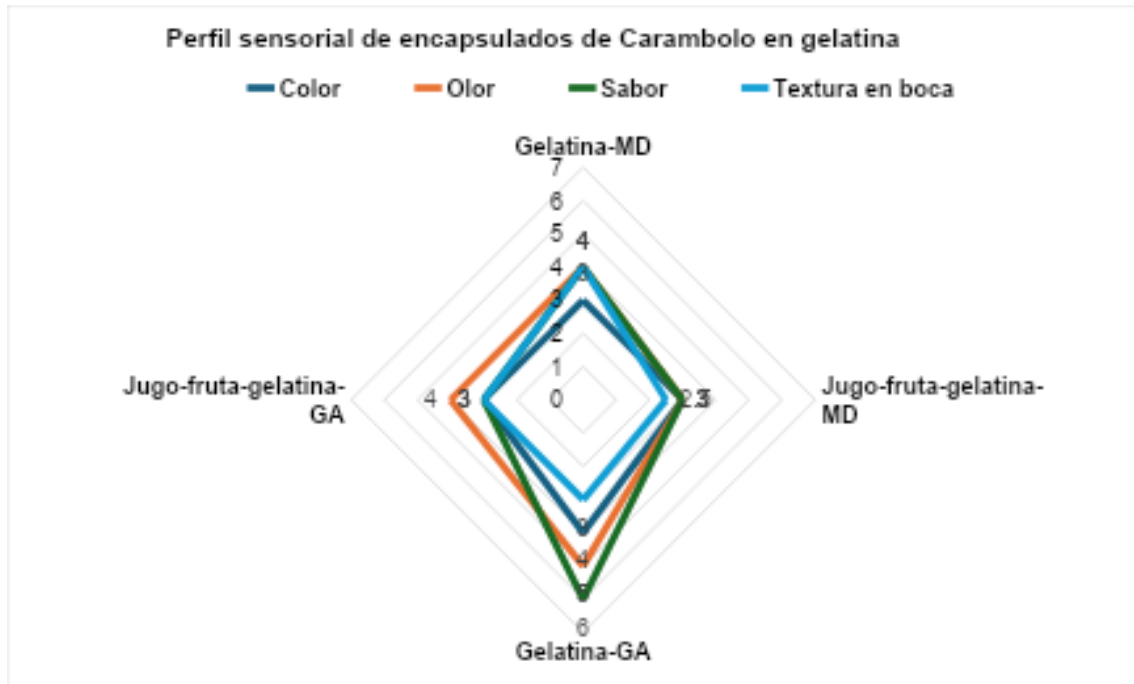
En la figura 28, se presenta el perfil sensorial descriptivo de los atributos sensoriales evaluados de color, olor, sabor y textura en boca, en los productos funcionales formulados con los encapsulados de jugo de carambola en yogurt natural, considerando los valores numéricos de la escala sensorial indicados por parte de los evaluadores sensoriales:



**Figura 28.** Perfil sensorial descriptivo (QDA) de atributos sensoriales de encapsulados de jugo de Carambola con yogurt con mayor nivel de aceptación.  
*Referencia: Propia*

Con base en el perfil sensorial descriptivo evaluado, se identificó que los atributos sensoriales de olor y textura en boca destacaron en la formulación con yogurt-MD y jugo-fruta-yogurt-MD, mientras que los atributos de color y sabor destacaron en las formulaciones de yogurt-GA, los cuales dan la pauta para analizar la preferencia de consumo y perspectiva del evaluador sensorial como “consumidor” de los productos funcionales formulados con el jugo de carambola con yogurt respecto a los atributos sensoriales específicos con respecto a su nivel de agrado. De forma complementaria, se analizó la preferencia de consumo de los productos funcionales en función de los atributos sensoriales que consideraron con mayor nivel de agrado y desagrado.

En la figura 29, se presenta el perfil sensorial descriptivo de los atributos sensoriales evaluados de color, olor, sabor y textura en boca, en los productos funcionales formulados con los encapsulados de jugo de carambola en gelatina, considerando los valores numéricos de la escala sensorial indicada por parte de los evaluadores sensoriales:



**Figura 29.** Perfil sensorial descriptivo (QDA) de atributos sensoriales de encapsulados de jugo de Carambola con gelatina con mayor nivel de aceptación

*Referencia: Propia*

Con base en el perfil sensorial descriptivo evaluado, se identificó que los atributos sensoriales de olor y textura en boca destacaron en la formulación con gelatina-MD y jugo-fruta-gelatina-MD, mientras que los atributos de color, olor y sabor destacaron en las formulaciones de gelatina-GA, los cuales dan la pauta para analizar la preferencia y perspectiva del evaluador sensorial como “consumidor” de los productos funcionales formulados con el jugo de carambola con gelatina respecto a los atributos sensoriales específicos con respecto a su nivel de agrado. De forma complementaria, se analizó la preferencia de consumo y aceptación de los productos funcionales en función de los atributos sensoriales que consideraron con mayor nivel de agrado y desagrado.

Derivado del análisis sensorial aplicado, para evaluar el nivel de aceptación y consumo de los productos funcionales formulados con jugo de Carambola, se identificó que los encapsulados de JC-MD aplicados en yogurt natural como vehículo, presentaron una aceptación del atributo de color del 57.6% indicando que les gustó ligeramente; respecto al atributo de olor, el 36% indicó que les disgustó ligeramente; para el atributo de sabor el 48.5% les gustó ligeramente y para el atributo de textura en boca el 42.4% indicó que



les gustó mucho, siendo el nivel de aceptación de esta formulación del 39.4% indicando que les gustó ligeramente y de 30.3% para quienes les gustó mucho.

Los encapsulados de JC-MD con jugo y fruto fresco de Carambolo en yogurt presentaron una aceptación del atributo de color del 30.3% indicando que les gustó ligeramente, mientras que el 27.3% indicó que les gustó mucho; respecto al atributo de olor, el 30.3% indicó que les gustó ligeramente; para el atributo de sabor el 30.3% les gustó ligeramente y para el atributo de textura en boca el 33.3% indicó que les disgustó ligeramente, siendo el nivel de aceptación de esta formulación del 36.6% indicando que les gustó ligeramente y de 18.2% para quienes les gustó mucho.

Por otra parte, los encapsulados de JC-GA aplicados en yogurt presentaron una aceptación del atributo de color del 54.6% indicando que les gustó mucho, mientras que el 30.3% indicó que les gustó ligeramente; respecto al atributo de olor, el 27.3% indicó que les gustó ligeramente; para el atributo de sabor el 27.3% les gustó mucho y para el atributo de textura en boca el 51.5% indicó que les gustó ligeramente, siendo el nivel de aceptación de esta formulación del 39.4% indicando que les gustó mucho y de 36.4% para quienes les gustó ligeramente.

Los encapsulados de JC-GA con jugo y fruto fresco de Carambolo en yogurt presentaron una aceptación del atributo de color del 57.6% indicando que les gustó mucho; respecto al atributo de olor, el 48.5% indicó que les gustó mucho; para el atributo de sabor el 48.5% les gustó mucho y para el atributo de textura en boca el 48.5% indicó que les gustó mucho, siendo el nivel de aceptación de esta formulación del 66.7% indicando que les gustó mucho.

Asimismo, los encapsulados de JC-MD aplicados en gelatina presentaron una aceptación del atributo de color del 54.6% indicando que les gustó ligeramente; respecto al atributo de olor, el 30.3% indicó que les gustó y disgustó ligeramente; para el atributo de sabor el 39.4% ni les gusta ni les disgusta y para el atributo de textura en boca el 21.2% indicó que les gustó mucho y 24.2% que les gustó ligeramente, siendo el nivel de aceptación de



esta formulación del 36.4% indicando que ni les gusta ni les disgusta y de 24.2% para quienes les gustó ligeramente.

Los encapsulados de JC-MD con jugo y fruto fresco de Carambolo en gelatina presentaron una aceptación del atributo de color del 63.6% indicando que les gustó ligeramente; respecto al atributo de olor, el 39.4% indicó que les gustó ligeramente; para el atributo de sabor el 54.6% les gustó ligeramente y para el atributo de textura en boca el 36.4% indicó que les gustó mucho y ligeramente, siendo el nivel de aceptación de esta formulación del 60.6% indicando que les gustó ligeramente y de 27.3% para quienes les gustó mucho.

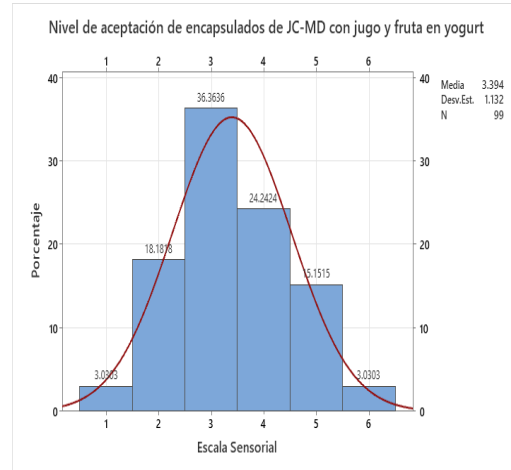
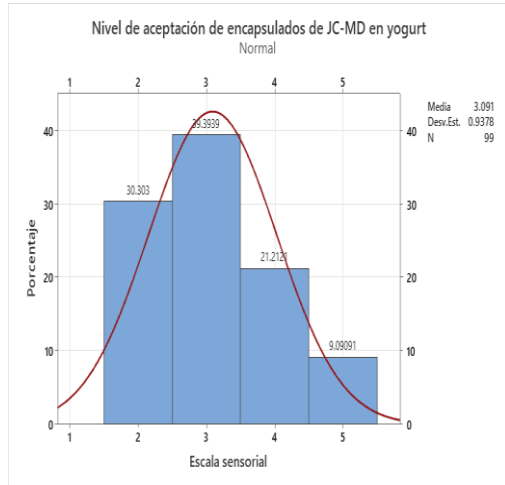
Mientras que, los encapsulados de JC-GA aplicados en gelatina presentaron una aceptación del atributo de color del 45.5% indicando que ni les gusta ni disgusta; respecto al atributo de olor, el 42.4% indicó que les disgustó ligeramente; para el atributo de sabor el 36.4% les disgustó mucho y para el atributo de textura en boca el 33.3% indicó que les gustó ligeramente, siendo el nivel de aceptación de esta formulación del 30.3% indicando que les gustó ligeramente y de 45.5% para quienes ni les gusta ni les disgusta.

Los encapsulados de JC-GA con jugo y fruto fresco de Carambolo en gelatina presentaron una aceptación del atributo de color del 36.4% indicando que les gustó ligeramente; respecto al atributo de olor, el 36.4% indicó que ni les gusta ni disgusta; para el atributo de sabor el 45.5% les gustó ligeramente y para el atributo de textura en boca el 45.5% indicó que les gustó ligeramente y 27.3% les gustó mucho, siendo el nivel de aceptación de esta formulación del 45.5% indicando que les gustó ligeramente.

Por tanto, los atributos sensoriales evaluados en los productos funcionales desarrollados con el jugo de carambola permitieron identificar las características sensoriales con mayor preferencia y nivel de aceptación como productos potenciales para el consumidor.

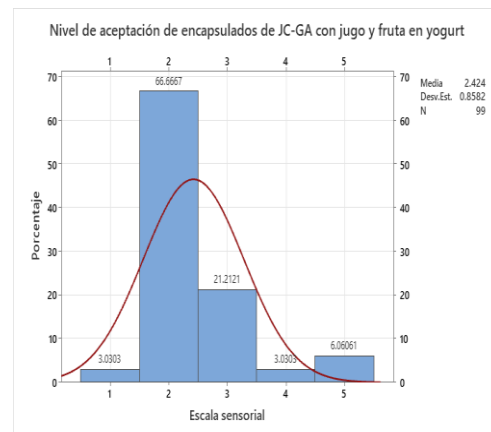
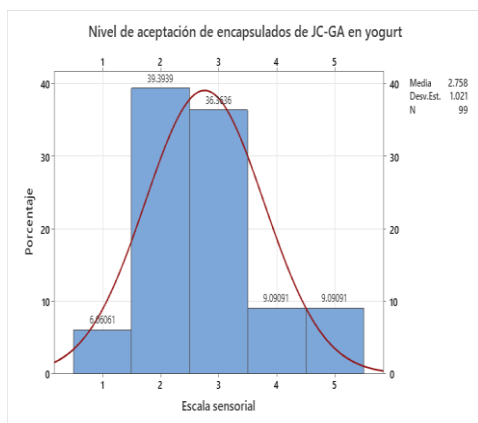
Respecto al nivel de preferencia para su consumo, las figuras 30, 31, 32 y 33 presentan los gráficos de las muestras con mayor nivel de aceptación por parte de los consumidores expresados en porcentaje, donde los valores de la media y desviación estándar hacen referencia a la ponderación de la escala numérica sensorial que los consumidores

seleccionaron al evaluar los atributos sensoriales de las muestras y su nivel de aceptación, en los cuales se encuentra el valor máximo de aceptación y consumo.



*Figura 30.- Nivel de aceptación de encapsulados de Jugo de Carambolo con Maltodextrina en yogurt*

*Figura 31.- Nivel de aceptación de encapsulados de Jugo de Carambolo con Maltodextrina, jugo y fruta en yogurt*



*Figura 32.- Nivel de aceptación de encapsulados de Jugo de Carambolo con Goma Arábica en yogurt*

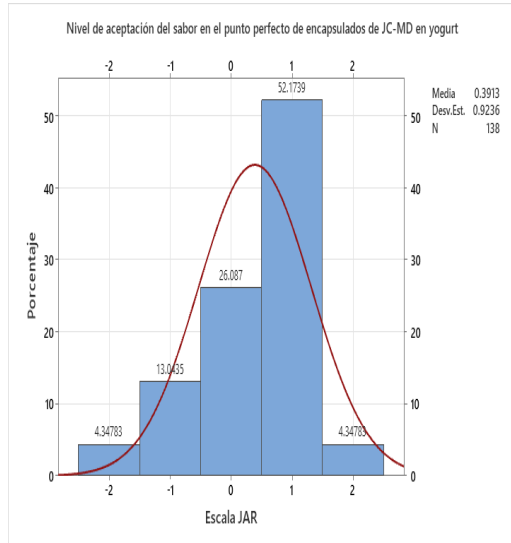
*Figura 33.- Nivel de aceptación de encapsulados de Jugo de Carambolo con Goma Arábica, jugo y fruta en yogurt*



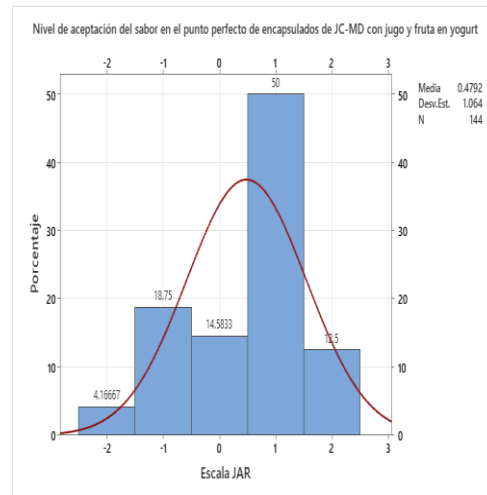
A partir del análisis del nivel de aceptación de cada producto para su consumo, se identificó que los encapsulados con MD y GA aplicados en yogurt presentaron niveles de aceptación para su consumo del 45.5% y 42.4% respectivamente, mientras que el producto formulado con los encapsulados con GA, jugo y fruto fresco en yogurt presentó el mayor nivel de consumo de 54.6% respecto a las otras formulaciones en gelatina las cuales presentaron un nivel de aceptación para su consumo no habitual ni frecuente.

Por su parte, al analizar también en los productos formulados la intensidad y punto perfecto del atributo de sabor con la prueba sensorial JAR (Just About Right), se identificó que la formulación que presentó una intensidad moderada y un poco más alta de lo que se esperaba fue formulada con los encapsulados de GA en yogurt con un 39.4% y 48.5% respectivamente, siendo la de mayor nivel de aceptación respecto a las otras formulaciones, donde las formulaciones aplicadas en gelatina presentaron menor nivel de intensidad y punto perfecto de sabor de acuerdo con las escalas de evaluación.

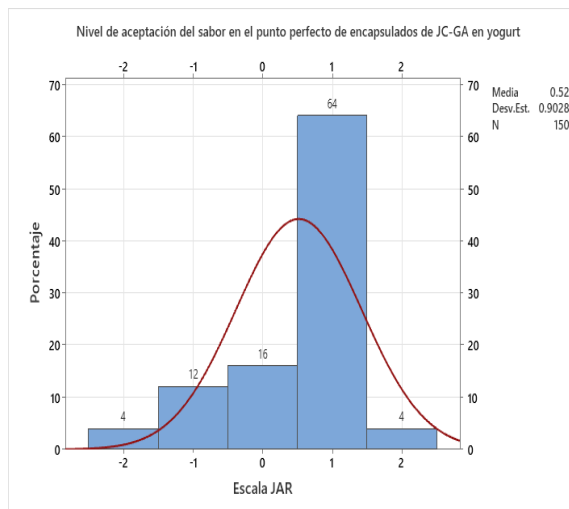
De forma complementaria, las Figuras 34, 35, 36 y 37 presentan los gráficos de las muestras con mayor nivel de aceptación del atributo del sabor en el punto perfecto de la escala sensorial JAR por parte de los consumidores expresados en porcentaje, donde los valores de la media y desviación estándar hacen referencia a la ponderación de la escala numérica sensorial que los consumidores asignan al evaluar los atributos sensoriales de las muestras y su nivel de aceptación, en los cuales se encuentra el valor máximo de aceptación.



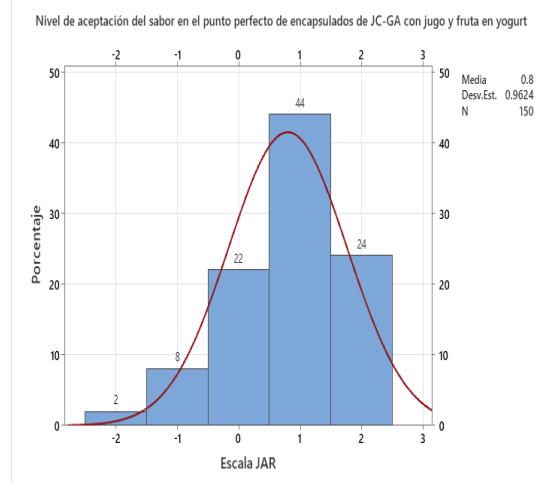
*Figura 34.- Nivel de aceptación del sabor en el punto perfecto de encapsulados de JC-MD en yogurt*



*Figura 35.- Nivel de aceptación del sabor en el punto perfecto de encapsulados de JC-MD con jugo y fruta en yogurt*



*Figura 36.- Nivel de aceptación del sabor en el punto perfecto de encapsulados de JC-GA en yogurt*



*Figura 37.- Nivel de aceptación del sabor en el punto perfecto de encapsulados de JC-GA con jugo y fruta en yogurt*



Por tanto, se identificó que las formulaciones con mayor aceptación y potencial de consumo por sus atributos sensoriales fueron las desarrolladas con los encapsulados de JC-MD y GA en yogurt y las formuladas adicionalmente con jugo y fruto fresco, lo cual representa una potencial aplicación del jugo de carambola encapsulado para generar un producto con un nivel de aceptación y consumo importante para el consumidor.



# CONCLUSIONES



- El proceso de adsorción de humedad en las microcápsulas de jugo de carambola presentó curvas sigmoidales tipo II que se caracterizan por la adsorción del adsorbente mediante el llenado de una monocapa y multicapas sobre la superficie de un adsorbato con microestructura porosa como fue el caso de la GA y MD.
- Al utilizar MD como agente encapsulante, existió una mayor capacidad de adsorción de agua mostrando interacciones adsorbente-adsorbato más fuertes debido a su alta higroscopicidad.
- Ambos tipos de microcápsulas presentaron morfologías tipo matriz irregulares caracterizadas por partículas con superficies abolladas y rugosas, pero no presentaron grietas u orificios que favorezcan el deterioro fisicoquímico o de color del jugo encapsulado. Además, las microcápsulas no presentaron aglomeraciones, por lo que favorece la disolución instantánea de los polvos.
- Los diferentes comportamientos entálpicos y entrópicos (funciones diferenciales e integrales), permitieron analizar el proceso de adsorción de humedad en los microencapsulados. Estos indicaron que las moléculas de agua se organizan en la superficie de las microcápsulas, ordenándose tanto en la monocapa como en las multicapas de los sólidos. Las microcápsulas mostraron energía libre negativa, lo que indica un proceso espontáneo de adsorción de agua.
- Las cinéticas de cambio de color total de las microcápsulas de jugo de carambola monitoreados por dos meses de almacenamiento a 25, 35 y 40 °C mostraron que la temperatura influye de manera significativa en este atributo sensorial, ya que, a mayor temperatura, el cambio de color fue más evidente.
- Los valores de los parámetros cinéticos de cambio de color (constante de velocidad de reacción y tiempo de vida media) indican que la GA resultó ser una mejor opción para la encapsulación y protección del jugo de carambola.



- Las formulaciones de productos funcionales formuladas con los encapsulados de jugo de carambola que presentaron mayor nivel de aceptación y potencial de consumo por sus atributos sensoriales fueron las desarrolladas con los encapsulados de JC-MD y GA en yogurt y las formuladas adicionalmente con jugo y fruto fresco, lo cual representa una potencial aplicación del jugo de carambola encapsulado para generar un producto con un nivel de aceptación y consumo importante para el consumidor.



**Universidad Autónoma del Estado de  
México**  
Facultad de Química

*Dulce Karen Bahena Hernández*

# BIBLIOGRAFÍA



- Al-Hamayda, A., Abu-Jdayil, B., Ayash, M., & Tannous, J. (2023). Advances in microencapsulation techniques using Arabic gum: A comprehensive review. *Carbohydrate Polymers*, 306, e120529. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120529>
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. *Food and Bioproducts Processing*, 80(2), 118-128. <https://doi.org/10.1205/09603080252938753>
- Alpizar-Reyes, E., Carrillo-Navas, H., Romero-Romero, R., Varela-Guerrero, V., Alvarez-Ramírez, J., & Pérez-Alonso, C. (2016). Thermodynamic sorption properties and glass transition temperature of tamarind seed mucilage (*Tamarindus indica* L.). *Food and Bioproducts Processing*, 101, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.11.003>
- Association of Official Analytical Chemists. (1980). *Official methods of analysis* (13th ed.).
- Ares, G., & Jaeger, S. R. (2015). Examination of sensory product characterization bias when check-all-that-apply (CATA) questions are used concurrently with hedonic assessments. *Food Quality and Preference*, 40, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.10.004>
- Aykan, S., Vatansever, G., Doğanay-Erdoğan, B., & Kalaycıoğlu, C. (2020). Development of Sensory Sensitivity Scales (SeSS): Reliability and validity analyses. *Research in Developmental Disabilities*, 100, e103612. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2020.103612>
- Azuara, E., & Beristain, C. I. (2006). Enthalpic and entropic mechanisms related to water sorption of yogurt. *Drying Technology*, 24(11), 1501-1507. <https://doi.org/10.1080/07373930600961080>
- Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M. Y., 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. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12179>
- Beristain, C. I., Azuara, E., & Vernon-Carter, E. J. (2002). Effect of water activity on the stability to oxidation of spray-dried encapsulated orange peel oil using



- mesquite gum (*Prosopis juliflora*) as wall material. *Journal of Food Science*, 67(1), 206-211. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11385.x>
- Carrillo-Navas, H., González-Rodea, D. A., Cruz-Olivares, J., Barrera-Pichardo, J. F., Román-Guerrero, A., & Pérez-Alonso, C. (2011). Estabilidad durante el almacenamiento y propiedades fisicoquímicas de microcápsulas de jugo de maracuyá obtenidas mediante secado por aspersión. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(3), 421-430.
  - Chranioti, C., Nikoloudaki, A., & Tzia, C. (2015). Saffron and beetroot extracts encapsulated in maltodextrin, gum Arabic, modified starch and chitosan: Incorporation in a chewing gum system. *Carbohydrate Polymers*, 127, 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.049>
  - Chuacharoen, T., Moolwong, J., & Chysirichote, T. (2021). Effects of maltodextrin on physicochemical properties of freeze-dried avocado powder. *Food Science and Technology*, 41(2), 431-437. <https://doi.org/10.1590/fst.09220>
  - Cieurzyńska, A., Jasiorska, 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, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.003>
  - Collazos-Escobar, G. A., Gutiérrez-Guzmán, N., Váquiro-Herrera, H. A., Bon, J., & Garcia-Perez, J. V. (2022). Thermodynamic analysis and modeling of water vapor adsorption isotherms of roasted specialty coffee (Coffee arabica L. cv. Colombia). *LWT – Food Science and Technology*, 160, e113335. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113335>
  - De Araújo, A. L., & Da Silva-Pena, R. (2022). Moisture desorption behavior and thermodynamic properties of pulp and seed of jambolan (*Syzygium cumini*). *Heliyon*, 8(5), e09443. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09443>
  - Delgado-Vargas, F., Jiménez, A. R., & Paredes-López, O. (2000). Natural pigments: Carotenoids, anthocyanins, and betalains-characteristics, biosynthesis processing, and stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40(3), 173-289. <https://doi.org/10.1080/10408690091189257>
  - Domínguez, M. R. (2007). Guía para la evaluación sensorial de alimentos, Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT, Lima



- Domínguez, R., Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Maggiolino, A., Bohrer, B., & Lorenzo, J. M. (2020). Red beetroot: A potential source of natural additives for the meat industry. *Applied Sciences*, 10(23), e8456. <https://doi.org/10.3390/app10238456>
- Drusch, S., & Schwarz, K. (2006). Microencapsulation properties of two different types of n-octenylsuccinate-derivatised starch. *European Food Research and Technology*, 222(1), 155-164. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0087-x>
- Espinosa-Andrews, H., Morales-Hernández, N., García-Márquez, E., & Rodríguez-Rodríguez, R. (2022). Development of fish oil microcapsules by spray drying using mesquite gum and chitosan as wall materials: Physicochemical properties, microstructure, and lipid hydroperoxide concentration. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 72(8), 646-655. <https://doi.org/10.1080/00914037.2022.2042289>
- Esquerdo, V. M., Monte, M. L., & Pinto, L. A. A. (2018). Microstructures containing nanocapsules of unsaturated fatty acids with biopolymers: Characterization and thermodynamic properties. *Food and Bioprocess Technology*, 11(6), 1265-1276. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2098-1>
- Esquivel-González, B. E., Ochoa-Martínez, L. A., & Rutiaga-Quiñones, O. M. (2015). Microencapsulación mediante secado por aspersion de compuestos bioactivos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(2), 180-192.
- Fabela-Morón, M. F., Díaz-Ramírez, M., Jiménez-Guzmán, J., Cruz-Monterrosa, R. G., Rayas-Amor, A. A., León-Espinosa, E. B., Mena-Martínez, M., & García-Garibay, M. (2020). Evaluación de la calidad sensorial y nivel de aceptación de formulaciones de sopa de zanahoria microemulsionada con Inulina y Concentrado de Proteína de Suero de Leche (WPC). *Agroproductividad*, 13(7), 101-106. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1688>
- García-Barrón, S. E., Leyva-Trinidad, D. A., Carmona-Escutia, R. P., Romero-Medina, A., & Villanueva-Rodríguez, S. J. (2021). Evaluation of traditional foods from a consumer's perspective: A review of methods and highlights. *British Food Journal*, 123(12), 4451-4465. <https://doi.org/10.1108/BFJ-10-2020-0917>
- Gawalek, J. (2021). Effect of spray dryer scale size on the properties of dried beetroot juice. *Processes*, 9(6), e1056. <https://doi.org/10.3390/pr9061056>



- Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias (3ra ed.). Prentice Hall.
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107-1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
- Ghosh, S. K. (Ed.). (2006). Functional coatings and microencapsulation: A general perspective. En *Functional coatings: By polymer microencapsulation* (pp. 1-28). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Ghosh, S., Sarkar, T., Das, A., & Chakraborty, R. (2021). Natural colorants from plant pigments and their encapsulation: An emerging window for the food industry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(15), 6095-6118. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11341>
- Gómez-Corona, C., & Lelièvre-Desmas, M. (2019). Introducción al análisis sensorial y estudios con consumidores: Nuevas perspectivas. XOC ESTUDIO.
- Hernández, E. (2005). Evaluación sensorial. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Hidar, N., Ouhammou, M., Idlimam, A., Jaouad, A., Bouchdoug, M., Lamharrar, A., Kouhila, M., & Mahrouz, M. (2018). Investigation of water adsorption and thermodynamic properties of stevia powder. *International Journal of Food Engineering*, 14(7-8), e20170377. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0377>
- Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., & Alvarez-Ramirez, J. (2018). Thermodynamic analysis for assessing the physical stability of core materials microencapsulated in taro starch spherical aggregates. *Carbohydrate Polymers*, 197, 431-441. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.012>
- Huynh, N. K., & Nguyen, H. V. H. (2017). Effects of juice processing on oxalate contents in carambola juice products. *Food Research*, 1(5), 156-162. <https://doi.org/10.26656/fr.2017.5.020>
- Jebitta, R. S., Allwin, J. S. I., & Pandian, K. N. S. (2022). Sorption isotherm study on vacuum and freeze-dried jamun pulp. *Journal of Food Process Engineering*, 45(4), e13975. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13975>



- Jia, X., Yang, D., Yang, Y., & Xie, H. (2019). Carotenoid-derived flavor precursors from *Averrhoa carambola* fresh fruit. *Molecules*, 24(8), e1471. <https://doi.org/10.3390/molecules24081471>
- Espinosa-Manfugás, J. (2007). *Evaluación Sensorial de los Alimentos*. Ciudad de La Habana: Editorial Universitaria, 2007. ISBN 978-959-16-0539-9.
- Kaushik, P., Dowling, K., Barrow, C. J., & Adhikari, B. (2014). Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of Functional Foods*, 19(Part A), 868-881. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.06.029>
- Khoo, Z. Y., Teh, C. C., Rao, N. K., & Chin, J. H. (2022). Evaluation of the toxic effect of star fruit on serum biochemical parameters in rats. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 22, e59. <https://doi.org/10.1186/s12906-022-03534-4>
- Kim, M., Hout, D. V., Zandstra, E. H., & Lee, H. S. (2019). Consumer acceptance measurement focusing on a specified sensory attribute of products: Can the attribute-specified degree of satisfaction-difference (DOSD) method replace hedonic scaling? *Food Quality and Preference*, 71, 438-450. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.08.014>
- Knekt, P., Järvinen, R., Teppo, L., Aromaa, A., & Seppänen, R. (1999). Role of various carotenoids in lung cancer prevention. *Journal of the National Cancer Institute*, 91(2), 182-184. <https://doi.org/10.1093/jnci/91.2.182>
- Labuza, T. P., Kaanane, A., & Chen, J. Y. (1985). Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food Science*, 50(2), 385-391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13409.x>
- Lakmal, K., Yasawardene, P., Jayarajah, U., & Senevirathna, S. L. (2021). Nutritional and medicinal properties of star fruit (*Averrhoa carambola*): A review. *Food Reviews International*, 37(6), 529-543. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1734331>
- Leivas, C. L., Iacomini, M., & Cordeiro, L. M. C. (2014). Structural characterization of a rhamnogalacturonan I-arabinan-type I arabinogalactan macromolecule from starfruit (*Averrhoa carambola* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(27), 6403-6411. <https://doi.org/10.1021/jf501272g>



- Leivas, C. L., Nascimento, L. F., Barros, W. M., Santos, A. R. S., Iacomini, M., & Cordeiro, L. M. C. (2015). Substituted galacturonan from starfruit: Chemical structure and antinociceptive and anti-inflammatory effects. *International Journal of Biological Macromolecules*, 76, 86-94.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.02.031>
- Lin, Q., Zhong, Q., & Zhang, Z. (2021). Identification and functional analysis of SWEET gene family in *Averrhoa carambola* L. fruits during ripening. *Scientia Horticulturae*, 281, Article 109939. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109939>
- Lu, Y., Tan, C.-W., Chen, D., & Liu, S.-Q. (2018). Potential of three probiotic lactobacilli in transforming star fruit juice into functional beverages. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(9), e13689.  
<https://doi.org/10.1111/jfpp.13689>
- Luan, F., Peng, L., Lei, Z., Jia, X., Zou, J., Yang, Y., He, X., & Zeng, N. (2021). Traditional uses, phytochemical constituents and pharmacological properties of *Averrhoa carambola* L.: A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 265, e113278.  
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113278>
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release – a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 41(1), 1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>
- Mallek-Ayadi, S., Bahloul, N., & Kechaou, N. (2020). Mathematical modelling of water sorption isotherms and thermodynamic properties of *Cucumis melo* L. seeds. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(1), 243-253.  
<https://doi.org/10.1007/s11694-019-00290-6>
- Manzoora, M., Singha, J., Ganib, A., & Noora, N. (2021). Valorization of natural colors as health-promoting bioactive compounds: Phytochemical profile, extraction techniques, and pharmacological perspectives. *Journal of Functional Foods*, 83, e104580. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104580>
- Martinelli, L., Gabas, A. L., & Telis-Romero, J. (2007). Thermodynamic and quality properties of lemon juice powder as affected by maltodextrin and Arabic gum. *Drying Technology*, 25(12), 2035-2045.  
<https://doi.org/10.1080/07373930701728836>



- McLaughlin, C. P., & Magee, T. R. A. (1998). The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *Journal of Food Engineering*, 35(3), 267-280. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00025-9)
- McMinn, W. A. M., & Al-Muhtaseb, A. H. (2002). Moisture sorption isotherms characteristics of food products: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 80(2), 118-128. <https://doi.org/10.1205/026387602753501906>
- 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. *International Journal of Biological Macromolecules*, 117, 599-607. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.147>
- Nava Reyna, E., Michelena Álvarez, G., Iliná, A., & Martínez Hernández, J. L. (2015). Microencapsulation of bioactive compounds. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 66, 64-70.
- Newsome, R. L. (1990). Natural and synthetic coloring agents. En A. L. Branen, P. M. Davidson, & S. Salminen (Eds.), *Food Additives* (pp. 326-346). Marcel Dekker.
- Nishino, H., Tokuda, H., Satomi, Y., Masuda, M., Bu, P., Onozuka, M., Yamaguchi, S., Okuda, Y., Takayasu, J., Tsuruta, J., Okuda, M., Ichiisi, E., Murakoshi, M., Kato, T., Misawa, N., Narisawa, T., Takasuka, N., & Yano, M. (1999). Cancer prevention by carotenoids. *Pure and Applied Chemistry*, 71(12), 2273-2278. <https://doi.org/10.1351/pac199971122273>
- Ochoa-Velasco, C. E., Salazar-González, C., Cid-Ortega, S., & Guerrero-Beltrán, J. A. (2017). Antioxidant characteristics of extracts of *Hibiscus sabdariffa* calyces encapsulated with mesquite gum. *Journal of Food Science and Technology*, 54(7), 1747-1756. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2564-1>
- Ocieczek, A., Mesinger, D., & Toczek, H. (2022). Hygroscopic properties of three cassava (*Manihot esculenta* Crantz) starch products: Application of BET and GAB models. *Foods*, 11(13), e1966. <https://doi.org/10.3390/foods11131966>
- Omae, J. M., Goto, P. A., Rodrigues, L. M., dos Santos, S. S., Paraiso, C. M., Madrona, G. S., & Bergamasco, R. D. C. (2017). Beetroot extract encapsulated in inulin: Storage stability and incorporation in sorbet. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), Article e13194. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13194>



- Osorio-Tellez, A., Pedroza-Islas, R., & Pérez-Alonso, C. (2021). Prediction of storage stability parameters of spray dried powders of maltodextrins and corn syrups with different levels of hydrolysis (conversion). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20(2), 679-696. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim2136>
- Özkan, G., & Ersus Bilek, S. (2014). Microencapsulation of natural food colourants. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(3), 145-156. <https://doi.org/10.11648/j.ijnfs.20140303.21>
- Ozkan, G., Franco, P., De Marco, I., Xiao, J., & Capanoglu, E. (2019). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry*, 272, 494-506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.205>
- 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(3), 753-760. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.002>
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2020). *Manual del ingeniero químico* (12.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- Prajapati, R. A., & Jadeja, G. C. (2022). Natural food colorants: Extraction and stability study. *Biomolecules*, 12(3), e446. <https://doi.org/10.3390/biom12030446>
- Prajapati, V. D., Jani, G. K., Moradiya, N. G., & Randeria, N. P. (2004). Pharmaceutical applications of various natural gums, mucilages and their modified forms. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1685-1699. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.021>
- Prasetijo, L. D., Trisnawati, C. Y., & Srianta, I. (2017). Physicochemical and sensory characteristics of reduced sugar starfruit juice. *International Food Research Journal*, 24(1), 318-324.
- Quek, S. Y., Chok, N. K., & Swedlund, P. (2007). The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 386-392. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.06.020>



- Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J., Van Loon, W. K., & Van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(11), 1805-1814. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2140>
- Rizvi, S. S. H. (1995). Rheological properties of fluid foods. En M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.), *Engineering properties of foods* (2.<sup>a</sup> ed.). Academic Press.
- Rizvi, S. S. H. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. En M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.), *Engineering Properties of Foods* (pp. 133-214). Marcel Dekker.
- Rodríguez-Hernández, G. R., González-García, R., Abud-Archila, M. A., Grajales-Lagunes, A., & Ruiz-Cabrera, M. A. (2005). Spray drying of cactus pear juice: Effect on the physicochemical properties of powder and reconstituted product. *Drying Technology*, 23(4), 955-973. <https://doi.org/10.1080/DRT-200054251>
- Rodríguez-Huezo, M. E., Pedroza-Islas, R., Prado-Barragán, L. A., Beristain, C. I., & Vernon-Carter, E. J. (2004). Microencapsulation by spray-drying of multiple emulsions containing carotenoids. *Journal of Food Science*, 69(7), 351-359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb13641.x>
- Rosa, D. P., Evangelista, R. R., Machado, A. L. B., Sanches, M. A. R., & Telis-Romero, J. (2021). Water sorption properties of papaya seeds (*Carica papaya* L.) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. *LWT – Food Science and Technology*, 138, e110458. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110458>
- Saikia, S., Mahnot, N. K., & Mahanta, C. L. (2014). Optimisation of phenolic extraction from *Averrhoa carambola* pomace by response surface methodology and its microencapsulation by spray and freeze drying. *Food Chemistry*, 171, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.074>
- Sánchez-Sáenz, E. O., Pérez-Alonso, C., Cruz-Olivares, J., Román-Guerrero, A., Báez-González, J. G., & Rodríguez-Huezo, M. E. (2011). Establishing the most suitable storage conditions for microencapsulated allspice essential oil entrapped in blended biopolymers matrices. *Drying Technology*, 29(8), 863-872. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.541569>



- Santos, P. D. de F., Rubio, F. T. V., da Silva, M. P., Pinho, L. S., & Favaro-Trindade, C. S. (2021). Microencapsulation of carotenoid-rich materials: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(7), 1844-1871. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1952125>
- Sarkar, T., Salauddin, M., Roy, A., Sharma, N., Sharma, A., Yadav, S., Jha, V., Rebezov, M., Khayrullin, M., Thiruvengadam, M., Chung, I. M., Shariati, M. A., & Simal-Gandara, J. (2022). Minor tropical fruits as a potential source of bioactive and functional foods. *Foods*, 11(21), e3430. <https://doi.org/10.3390/foods11213430>
- Shahidi, F., & Han, X. Q. (2009). Encapsulation of food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(6), 507-547. <https://doi.org/10.1080/10408399309527645>