



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

PROPIEDADES ANTIOXIDANTES, FISICOQUÍMICAS Y
MICROESTRUCTURALES DE MICROCÁPSULAS DE ALGINATO-CÁSCARA
DE TUNA (*Opuntia ficus-indica*)

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

Presenta:

GUADALUPE SOMERA CISNEROS



APROBADA Bajo la supervisión de: LANDY HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, DRA.



Chapingo, Estado de México, octubre de 2024

**PROPIEDADES ANTIOXIDANTES, FISICOQUÍMICAS Y
MICROESTRUCTURALES DE MICROCÁPSULAS DE ALGINATO-
CÁSCARA DE TUNA (*Opuntia ficus-indica*)**

Tesis realizada por **Guadalupe Somera Cisneros** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

DIRECTOR:


Dra. Landy Hernández Rodríguez

ASESOR:


Dr. Eleazar Aguirre Mandujano

ASESORA:


Dra. Diana Itzel López Monterrubio

Contenido

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
DEDICATORIAS	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	xi
RESUMEN GENERAL	xii
GENERAL ABSTRACT	xiii
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	14
1.1 Capítulos de la tesis	16
1.2 Conclusiones generales	16
Literatura citada	17
2 REVISIÓN DE LITERATURA	19
2.1 Tuna: Antecedentes	19
2.1.1 Especies de <i>Opuntia</i>	20
2.1.2 <i>Opuntia ficus – indica</i>	21
2.1.3 Generalidades	22
2.1.4 Composición química de la tuna	25
2.1.5 Valor nutricional de la cáscara de los frutos	26
2.1.6 Aplicaciones y beneficios a la salud	27
2.1.6 Encapsulación	28
2.1.7 Métodos de encapsulación	30
2.1.8 Gelificación iónica	31
2.1.9 Materiales de encapsulación y/o de cobertura	32
2.2 Proceso de digestión humana	35
2.2.1 Factores que afectan la protección	36
2.3 Condiciones gastrointestinales simuladas	37
2.4 Literatura citada	38

3 PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y MICROESTRUCTURALES DE MICROCÁPSULAS DE ALGINATO-CÁSCARA DE TUNA (*Opuntia ficus-indica*)

49

3.1	Resumen	49
3.2	Introducción	51
3.3	Materiales y métodos.....	52
3.3.1	Ubicación del trabajo	52
3.3.2	Materiales utilizados	52
3.3.3	Caracterización de las microcápsulas.....	54
3.3.4	Análisis estadístico	55
3.4	Resultados y discusión	55
3.4.2	Diámetro y esfericidad	57
3.4.3	Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)	58
3.4.4	Microestructura de las microcápsulas de alginato-cáscara de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>)	61
3.5	Conclusiones	63
3.6	Agradecimientos	63
3.7	Literatura citada	63

4 PROPIEDADES ANTIOXIDANTES DE MICROCÁPSULAS ALGINATO-CÁSCARA DE TUNA (*Opuntia ficus-indica*) SOMETIDAS A CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y GASTROINTESTINALES SIMULADAS.....

68

4.1	Resumen	68
4.2	Introducción	70
4.3	Materiales y métodos.....	71
4.3.1	Ubicación del trabajo	71
4.3.2	Materiales y reactivos	71
4.3.3	Evaluación de contenido fenólico y actividad antioxidante de las microcápsulas	73
4.3.4	Condiciones gastrointestinales simuladas	74
4.3.5	Análisis estadístico	75

4.4	Resultados y discusión	75
4.4.1	Propiedades antioxidantes de las microcápsulas en condiciones de almacenamiento	75
4.4.2	Propiedades antioxidantes de las microcápsulas sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas.....	80
4.5	Conclusiones	85
4.6	Agradecimientos	85
4.7	Literatura citada	85

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Especies más comunes de nopal tunero.....	20
Cuadro 2 Contenido químico proximal de harina de cáscara de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>).....	56
Cuadro 3 Valores de las características morfológicas de las microcápsulas....	58
Cuadro 4 Contenido fenólico total (CFT) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato en condiciones de almacenamiento	76
Cuadro 5 Actividad de eliminación de radicales DPPH (2,2-Difenil picrilhidrazilo) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato en condiciones de almacenamiento.....	78
Cuadro 6 Actividad de eliminación de radicales ABTS (2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato en condiciones de almacenamiento	79
Cuadro 7 Contenido fenólico total (CFT) de cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas.....	81
Cuadro 8 Actividad de eliminación de radicales DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato después de condiciones gastrointestinales simuladas	83
Cuadro 9 Actividad de eliminación de radicales ABTS 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato después de condiciones gastrointestinales simuladas	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Distribución de nopalito, tuna y xoconostle.....	22
Figura 2 Plantaciones de nopal, tuna y xoconostle en México.	23
Figura 3 Descripción botánica de <i>Opuntia ficus-indica</i>	24
Figura 4 Diagramas esquemáticos de tipos representativos de microcápsulas, esferas, complejos y perlas utilizadas en la encapsulación..	29
Figura 5 Estructura química del alginato.	33
Figura 6 Afinidad del alginato con el catión Ca^{2+} para formar el modelo “Caja de huevo”.....	33
Figura 7 Micrografías representativas de las variaciones de cápsulas tomadas en un microscopio óptico..	58
Figura 8 Espectro FTIR de alginato (A) (a), harina de cáscara de tuna (HCT) (b) y los tratamientos de las microcápsulas de alginato y cáscara de tuna (CT) a diferentes concentraciones..	60
Figura 9 Micrografías MEB de microcápsulas de alginato-cáscara de tuna (CT: Concentración de harina de cáscara de tuna.....	62
Figura 10 Curva de calibración de Ácido Gálico	72
Figura 11 Curva de calibración de Trolox por el método DPPH.....	72
Figura 12 Curva de calibración de Trolox por el método ABTS	72

DEDICATORIAS

A mi mamá, Rosalba, por sus desvelos, amor y apoyo incondicional, por recordarme que cada día es un nuevo comienzo y encomendarme siempre a Dios. Eres mi motivación y fortaleza, gracias por estar siempre presente, este logro también es gracias a ti.

A Carlos, por tu paciencia, apoyo, cariño y comprensión en esta etapa de mi vida, por acompañarme en cada paso que me trajo hasta aquí.

“Mi corazón es más grande que la distancia entre nosotros”.

A Edith y Yose, por la fortuna de haberlos conocido, por su infinita confianza y apoyo en todo.

A mis amigas Alin, Abigail y Tania, por sus consejos, pláticas, risas y momentos compartidos.

A mis peludos, por su acompañamiento durante las noches de desvelo, cariño y alegrías, por darme fuerzas para seguir adelante.

A quienes ya no se encuentran físicamente aquí, pero siempre los llevo en mi corazón: Javier, Encarnación, Erasmo, Chona y Mila.

“... donde estés, un día iré a visitarte, sólo guárdame un besito más”.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, perteneciente al Departamento de Ingeniería Agroindustrial, por la oportunidad de pertenecer a su programa y las herramientas brindadas para culminar esta meta y continuar mi formación profesional.

Al Departamento de Preparatoria Agrícola por proveer los espacios para el desarrollo de este proyecto.

A la Dra. Landy Hernández Rodríguez por su indispensable apoyo, paciencia, asesoría y conocimientos compartidos durante esta investigación. Gracias por la confianza para trabajar bajo su dirección.

A mis asesores: Dr. Eleazar Aguirre Mandujano y Dra. Diana Itzel López Monterrubio, por su asesoría, apoyo y sugerencias para el desarrollo de este trabajo.

A la Dra. Blanca Elizabeth Hernández Rodríguez y a la Dra. Consuelo Lobato Calleros, por su orientación y enseñanzas brindadas para lograr esta investigación.

Al Ing. Marco Antonio Ramírez y al Centro de Acopio de Nopal Tuna de San Martín de las Pirámides, por su disponibilidad y ayuda en la fase de campo, así como la materia prima brindada para la fase experimental de este proyecto.

A la Dra. Issis Claudette Romero Ibarra y al Laboratorio de Síntesis y Caracterización de Materiales Avanzados y Tecnología para Aplicaciones de Energía y Medioambiente (MATEA) por la UPIITA (Unidad Profesional

Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas) por el equipo y apoyo técnico para la caracterización espectroscópica por FTIR.

Al Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal (LANISAF) por el equipo y apoyo técnico para el análisis microestructural.

A mis amigas Alin, Abigail, Tania y compañeros de generación, por su apoyo, amistad y consejos.

A mis compañeras de laboratorio, Karla García, Noé, Chío, Karla Ortiz, Diana Edith, Azu, Adri y América, por su apoyo, orientación y consejos.

A Edith y Yosemite, por su cariño y motivación, por impulsarme para seguir cumpliendo mis sueños. Mil gracias <3

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Guadalupe Somera Cisneros
Fecha de nacimiento	11 de diciembre de 1999
Lugar de nacimiento	Tlanepantla de Baz, Estado de México, México
CURP	SO CG 991211 MM CM SD 08
Profesión	Ingeniera en Biotecnología
Cédula profesional	12801019

Desarrollo académico

Bachillerato: Colegio de Bachilleres Plantel 01, El Rosario, Azcapotzalco, Ciudad de México

Licenciatura: Ingeniería en Biotecnología, Universidad Politécnica del Valle de México

RESUMEN GENERAL

PROPIEDADES ANTIOXIDANTES, FISICOQUÍMICAS Y MICROESTRUCTURALES DE MICROCÁPSULAS DE ALGINATO-CÁSCARA DE TUNA (*Opuntia ficus-indica*)

En el procesamiento de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) la pulpa es la fracción aprovechada, descartando a la cáscara como un subproducto, por esta razón es importante valorizarla como una fuente de diversos compuestos bioactivos. En la presente investigación se determinaron las propiedades fisicoquímicas, microestructurales y antioxidantes de microcápsulas de alginato (A) adicionadas con harina de cáscara de tuna (HCT) en diferentes concentraciones, con el objetivo de evaluar su efecto como material de pared para la protección de su actividad antioxidante, así como de su microestructura. Se elaboraron cuatro tratamientos con diferentes concentraciones de harina de cáscara de tuna añadida (0, 0.06, 0.12 y 0.25 % p/p de HCT). Las microcápsulas se caracterizaron mediante FTIR, microscopía óptica y electrónica de barrido para determinar la interacción entre el AS y la HCT. Se determinaron sus propiedades antioxidantes en condiciones de almacenamiento durante 14 días y después de ser sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas. Durante las condiciones de almacenamiento CT_{0.25} mostró un mayor contenido fenólico total (16.73 ± 0.02 mg EAG/g) respecto a CT₀ al día 14; para el ensayo DPPH y ABTS al día 7 CT_{0.25} mostró el mayor porcentaje de inhibición (88.96 ± 0.53 y 70.31 ± 0.45 %) respecto a CT₀. Las propiedades antioxidantes de las microcápsulas después de ser sometidas a condiciones gastrointestinales mostraron que durante la fase intestinal, CT_{0.25} mostró un mayor CFT (16.80 ± 0.05 mg EAG/g), además de mostrar un aumento en el porcentaje de inhibición para el ensayo DPPH y ABTS de 76.21 ± 0.60 y 74.15 ± 1.07 % en sales biliares, indicando que a mayor concentración de harina, mayor es la capacidad antioxidante inicial, además de retrasar la desintegración de la microcápsula durante la fase gástrica.

Palabras clave: Cáscara de tuna, microencapsulación, actividad antioxidante, microestructura.

Tesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Guadalupe Somera Cisneros

Directora de Tesis: Dra. Landy Hernández Rodríguez

GENERAL ABSTRACT

ANTIOXIDANT, PHYSICOCHEMICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF ALGinate-PRICKLY PEAR SHELL MICROCAPSULES (*Opuntia ficus-indica*)

In processing prickly pear (*Opuntia ficus-indica*), the pulp is the most used fraction, discarding the prickly pear shell as a by-product; for this reason, it is essential to value it as a source of various bioactive compounds. In the present research, the physicochemical, microstructural, and antioxidant properties of sodium alginate (AS) microcapsules added with prickly pear flour (HCT) in different concentrations were determined to evaluate their effect as a microcapsule wall material for the protection of their antioxidant activity, as well as their microstructure. Four treatments were developed with different concentrations of added prickly pear shell meal (0, 0.06, 0.12 and 0.25 % w/w HCT; CT₀, CT_{0.06}, CT_{0.12} and CT_{0.25}, respectively). Microcapsules were characterized using FTIR, light microscopy, and scanning electron microscopy to determine the interaction between AS and HCT. Their antioxidant properties were determined under storage conditions for 14 days after being subjected to simulated gastrointestinal conditions. During storage conditions, CT_{0.25} showed a higher total phenolic content (16.73 ± 0.02 mg EAG/g) compared to CT₀ at day 14; for the DPPH and ABTS assay at day 7, CT_{0.25} showed the highest percentage of inhibition (88.96 ± 0.53 and 70.31 ± 0.45 %) concerning CT₀. The antioxidant properties of the microcapsules after being subjected to gastrointestinal conditions showed that during the intestinal phase, CT_{0.25} showed a higher CFT (16.80 ± 0.05 mg EAG/g), in addition to showing an increase in the percentage of inhibition for the DPPH and ABTS assay of 76.21 ± 0.60 and 74.15 ± 1.07 % in bile salts, indicating that the higher the concentration of flour, the greater the initial antioxidant capacity, in addition to delaying the disintegration of the microcapsule during the gastric phase.

Keywords: Prickly pear shell, microencapsulation, antioxidant activity, microstructure.

Thesis. Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Guadalupe Somera Cisneros

Advisor: Dra. Landy Hernández Rodríguez

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

México es el principal productor de tuna (*Opuntia ficus-indica*) con una producción de 446,237.07 toneladas al año, cuenta con una gran diversidad de frutos en tonalidades rojo, violeta, verde y amarillo (SIAP, 2024), los cuales están adaptados a regiones áridas y semiáridas. La tuna es considerada un alimento que se ofrece como fruto de temporada, reconocido por tener cáscara gruesa, pulpa jugosa y abundantes semillas, además de su aporte nutricional (Bensadón et al., 2010; Jiménez-Aguilar et al., 2015).

Dado la diversidad de productos procesados que se pueden obtener de la tuna como mermeladas, licores, conservas y mieles (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023), se han buscado alternativas para el aprovechamiento de los subproductos agroindustriales para su correcta eliminación y no ser un problema ambiental. La cáscara de tuna como subproducto, es una fuente de nutrientes como fibra dietética y pectina, así como de compuestos fenólicos, proteínas y compuestos antioxidantes, asociando su consumo a la reducción del riesgo de cáncer y enfermedades coronarias (Díaz-Vela et al., 2013).

Debido a lo anterior, la recuperación de compuestos naturales a partir de estos subproductos representa una oportunidad para ofrecerlos en la industria alimentaria o nutracéutica, por lo que es importante su preservación en distintos ambientes, ya que pueden ser inestables o susceptibles a la degradación química, transporte o almacenamiento, así como factores fisicoquímicos como el pH, temperatura y oxígeno, además de los efectos en el sistema digestivo humano que al ser suministrados pueden disminuir sus propiedades nutricionales (Haładyn et al., 2021; Santiago & Castro, 2016).

Ante esta problemática, la encapsulación es una herramienta que tiene como objetivo proteger diversos compuestos de interés, en la cual se emplea un

material que atrapa al ingrediente activo para preservarlo e incrementar su estabilidad. El uso de alginato se ha convertido en el polímero más utilizado en la técnica de gelificación iónica debido a su bajo costo, toxicidad y efectivo proceso de gelificación en combinación con cationes Ca^{2+} , sin embargo, se ha reportado que las microcápsulas obtenidas presentan baja estabilidad y alta porosidad, por lo que se utilizan materiales de pared para mejorar sus propiedades de barrera (Stach & Kolniak-Ostek, 2023). En algunas investigaciones se ha reportado el uso de la harina de cáscara de tuna como material prebiótico para la viabilidad de probióticos encapsulados, sin embargo no se han reportado investigaciones que evalúen el impacto de la adición de harina de cáscara de tuna en microcápsulas de alginato, lo que sugiere la siguiente hipótesis: La adición de harina de cáscara de tuna en microcápsulas de alginato como material de pared, contribuirá positivamente en sus propiedades fisicoquímicas y microestructurales; además de proteger su actividad antioxidante en condiciones de almacenamiento (14 días) así como a la exposición de condiciones gastrointestinales simuladas.

Por lo tanto, en la presente investigación se planteó como objetivo determinar las propiedades fisicoquímicas, microestructurales y antioxidantes de microcápsulas de alginato adicionadas con diferentes concentraciones de harina de cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) (0.06, CT_{0.06}; 0.12, CT_{0.12} y 0.25, CT_{0.25} % p/p), y para su cumplimiento se plantearon los siguientes objetivos: (a) obtener la harina a partir de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) y determinar sus propiedades fisicoquímicas (humedad, porcentaje de cenizas, proteínas, grasa cruda), (b) elaborar las microcápsulas de alginato adicionadas con 0, 0.06, 0.12 y 0.25 % p/p de harina de cáscara de tuna, (c) determinar los principales grupos funcionales de las microcápsulas y materiales de encapsulación mediante espectroscopía ATR-FTIR, (d) caracterizar la morfología y microestructura de las microcápsulas de alginato-cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*), (e) evaluar el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante de las microcápsulas bajo condiciones de almacenamiento y (f) evaluar el contenido fenólico total y la

capacidad antioxidante de las microcápsulas sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas.

1.1 Capítulos de la tesis

El presente documento de tesis está conformado por los siguientes capítulos:

- a) Capítulo 1: Presenta la introducción general del tema abordado incluyendo el objetivo general y los objetivos específicos propuestos.
- b) Capítulo 2: Muestra el estado del arte relacionado al problema investigado, iniciado con los antecedentes, producción y composición nutricional de la tuna, métodos de encapsulación y sus características, además del proceso de digestión humana e *in vitro*.
- c) Capítulo 3: En este apartado se muestran los resultados que corresponden al análisis químico proximal de la harina de cáscara de tuna, los procedimientos y condiciones necesarias para elaborar las microcápsulas, caracterización por FTIR de las microcápsulas y materiales de pared, así como la caracterización de sus propiedades morfológicas y microestructurales.
- d) Capítulo 4: En este apartado se muestran las pruebas realizadas para medir el efecto de la incorporación de cáscara de tuna a las microcápsulas de alginato en condiciones de almacenamiento y sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas. Finalmente se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los tratamientos evaluando el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante.

1.2 Conclusiones generales

El uso de cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) para su aplicación como material de pared para obtener microcápsulas, proporcionaron mejor protección y liberación de los compuestos antioxidantes encapsulados durante el almacenamiento y en condiciones gastrointestinales simuladas.

Las propiedades fisicoquímicas y microestructurales de las microcápsulas se vieron afectadas por el aumento de concentración de cáscara de tuna añadida a su formulación mostrando formas ovaladas y rugosidad en su pared en todos los tratamientos.

Las propiedades antioxidantes de las microcápsulas de alginato-cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) fueron afectadas por la concentración de cáscara de tuna añadida a la formulación, mostrando que esos tratamientos presentan mayor estabilidad de los compuestos fenólicos durante el almacenamiento hasta el día 7, lo que sugiere que su protección es gradual ante la sobreexposición de factores de degradación.

La protección y liberación de los compuestos fenólicos bajo condiciones gastrointestinales simuladas mostraron que las microcápsulas de alginato-cáscara de tuna, el tratamiento CT_{0.25}, proporciona mayor protección y una capacidad de liberación un mayor de los compuestos bioactivos de manera controlada tras su exposición a jugos gástricos y sales biliares, respectivamente.

Literatura citada

- Bensadón, S., Hervert-Hernández, D., Sáyago-Ayerdi, S. G., & Goñi, I. (2010). By-Products of *Opuntia ficus-indica* as a Source of Antioxidant Dietary Fiber. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(3), 210–216. <https://doi.org/10.1007/s11130-010-0176-2>
- Diaz-Vela, J., Totosaus, A., Cruz-Guerrero, A. E., & Pérez-Chabela, M. (2013). In vitro evaluation of the fermentation of added-value agroindustrial by-products: cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.) peel and pineapple (*Ananas comosus*) peel as functional ingredients. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(7), 1460–1467. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12113>
- Haładyn, K., Tkacz, K., Wojdyło, A., & Nowicka, P. (2021). The Types of Polysaccharide Coatings and Their Mixtures as a Factor Affecting the Stability of Bioactive Compounds and Health-Promoting Properties Expressed as the Ability to Inhibit the α -Amylase and α -Glucosidase of Chokeberry Extracts in the Microencapsulation Process. *Foods*, 10(9), 1994. <https://doi.org/10.3390/foods10091994>
- Jiménez-Aguilar, D. M., López-Martínez, J. M., Hernández-Brenes, C., Gutiérrez-Uribe, J. A., & Welte-Chanes, J. (2015). Dietary fiber, phytochemical

- composition and antioxidant activity of Mexican commercial varieties of cactus pear. *Journal of Food Composition and Analysis*, 41, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.01.017>
- Santiago, L. G., & Castro, G. R. (2016). Novel technologies for the encapsulation of bioactive food compounds. *Current Opinion in Food Science*, 7, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2016.01.006>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER]. (2023). *Arranca temporada de tuna con abasto garantizado y crecimiento en valor de producción*. gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/arranca-temporada-de-tuna-con-abasto-garantizado-y-crecimiento-en-valor-de-produccion?idiom=es#:~:text=Con%20una%20producci%C3%B3n%20anual%20que,resalt%C3%B3%20la%20Secretar%C3%ADa%20de%20Agricultura.&text=Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%2C%20a%2018%20de%20julio%20de%202023>
- Servicio de Información Agroalimentario y Pesquera [SIAP]. (2024). Producción Agrícola. Acciones y Programas. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Stach, M., & Kolniak-Ostek, J. (2023). The influence of the use of different polysaccharide coatings on the stability of phenolic compounds and antioxidant capacity of chokeberry hydrogel microcapsules obtained by indirect extrusion. *Foods*, 12(3), 515. <https://doi.org/10.3390/foods12030515>

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Tuna: Antecedentes

El nopal tunero es un cultivo de crecimiento rápido y bajo costo utilizado principalmente para el consumo humano (frutos y cladodios jóvenes) o como forraje (cladodios y cáscaras de frutos) (Gheribi et al., 2019). La tuna, conocida científicamente como *Opuntia ficus-indica*, oriunda de México es una planta perteneciente a la familia de las cactáceas, reconocida por su amplia distribución y su importancia en diversas culturas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017), esta se distingue por ser una fruta carnosa caracterizada por su sabor dulce debido a su bajo contenido de acidez y alta cantidad de carbohidratos y semillas con apariencia ovalada y espinas diminutas, puede ser consumida fresca, confitada o en jugos y mermeladas (Fideicomiso de Riesgo Compartido, 2017).

En 2005, Reyes-Agüero y colaboradores argumentan que el proceso de domesticación de *Opuntia ficus-indica* se debió por grupo étnico otomí, los cuales se centraron en obtener cladodios sin espinas y frutos de mayor tamaño, proponiendo que derivó de especies distribuidas en la región centro-norte de México (*Opuntia amyclae* u *Opuntia megacantha*). Así, en el siglo XVI, los españoles propagaron esta planta hasta su país y a otras partes del mundo, especialmente a la región mediterránea.

Hoy, en México, el nopal y la tuna han sido muy apreciados como elementos y como fuente de diversos productos de uso industrial, los cuales incluyen fibras, pectinas colorantes y aceites, obtenidos de sus pencas, frutos y semillas (Lozada Carbajal, 2007). En general, la tuna es una fruta con una rica historia y un potencial prometedor para diversas industrias, incluidas la alimentaria, la medicina y la salud natural. A pesar de que México lidera su producción de tuna

a nivel mundial, una gran cantidad se desperdicia debido a prácticas inadecuadas de almacenamiento (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018).

2.1.1 Especies de *Opuntia*

Originaria de América Central y América Latina, el género se destaca por su fruto, la tuna, y se encuentra en plantaciones comerciales en América del Sur (México, Brasil y Chile) y el sur de Europa (Italia y España) (Monroy-Gutiérrez et al., 2017; Scarano et al., 2020; CONABIO, 2023). Esta presencia abarca regiones cálidas de América, la cuenca mediterránea, África y Australia, siendo común en áreas subhúmedas y áridas en todo el mundo (Gouws, 2020).

Linneo, en 1753, denominó al género como *Cactus opuntia*, y posteriormente, se corrigió designando *Opuntia ficus-indica* como especie tipo del género, con alrededor de 220 especies reconocidas, de las cuales entre 60 y 90 se encuentran en México y solo de 10 a 12 especies han sido aprovechadas por el ser humano (Méndez Llorente et al., 2008). Se cultivan diversas especies de nopal en México, destacando *O. ficus-indica*, *O. xoconoxtle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*. Estas especies son aprovechadas tanto por su fruta como por sus características ornamentales, siendo *O. ficus-indica* la única cultivada a nivel mundial (Torres-Ponce et al., 2015; FAO, 2018).

Algunas de las especies más comunes de nopal tunero descritas por Almaraz Regalado y Suárez Gómez (1980, p. 4) son las siguientes:

Cuadro 1 Especies más comunes de nopal tunero

Espece	Color del fruto	Nombre común
<i>Opuntia ficus-indica</i>	Blanco	Nopal de castilla
	Amarillo	
	Rojo	
	Intermedio	
<i>Opuntia tapona</i>	Rojo	Nopal Tapón
<i>Opuntia megacantha</i>	Amarillo	Nopal Tapón
<i>Opuntia streptacantha</i>	Rojo	Nopal Cardón
<i>Opuntia amyclaea</i> , Tenore	Blanco	Nopal Alfajayucan

<i>Opuntia leucotricha</i>	Blanco	Nopal Duraznillo
<i>Opuntia robusta</i>	Amarillo	Nopal Camueso

2.1.2 *Opuntia ficus – indica*

Según la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (2015), *Opuntia ficus-indica*, más conocido como nopal tunero, es una planta de la familia de las cactáceas, destacándose por su capacidad para retener agua. Sus partes comestibles incluyen los nopalitos (brotes jóvenes y tiernos) y la tuna (fruto). Según Torres-Ponce, Morales-Corral, Ballinas-Casarrubias & Nevárez (2015), el nopal tunero se usa principalmente para la alimentación, incluyendo su fruto, cladodio entero (penca) y cladodio picado (nopalitos). Las especies del género *Opuntia* se utilizan como forraje para ganado, y en la industria para la obtención de pigmentos naturales como betalaínas, las cuales presentan efectos antioxidantes, anticancerígenos, antimicrobianos, jabón, pectinas y aceites o la preparación de mermeladas, harinas deshidratadas, conservas, jugos, confituras y bebidas alcohólicas (Moreno Álvarez et al., 2008).

En cuanto a los frutos de la tuna, estos pueden presentar una amplia variedad de tonalidades, desde el blanco hasta el morado, incluyendo el amarillo, naranja y rojo, debido a la presencia de dos pigmentos a base de betalaínas. Esta diversidad de colores también influye en las propiedades nutricionales y antioxidantes de la fruta, como indican Scarano et al. (2020).

El cultivo del nopal tunero en el nororiente del Estado de México, inicialmente empleado para el control de la erosión, ha evolucionado en una alternativa económica vital para los agricultores en una región con condiciones climáticas específicas. Dos tipos de tuna, "blanca" (*Opuntia albicarpa*) y "roja" (*Opuntia megacantha*), son cultivados en esta área, aunque estudios genéticos recientes cuestionan su clasificación como especies distintas (Márquez-Berber, 2012).

2.1.3 Generalidades

2.1.3.1 Origen y distribución

Su origen e historia están relacionados desde las antiguas civilizaciones mesoamericanas (Sáenz et al., 2006) hasta la época precolombina, sin embargo, diversos etnobotánicos sugiriendo que su origen fue en el Valle Central de México, donde se localizaban pueblos nativos, los cuales seleccionaban frutos sin espinas de *O. streptacantha* para facilitar su cultivo y la recolección de cochinillas, de las cuales se obtienen pigmentos rojos (Bakewell-Stone, 2018).

La distribución de la planta *Opuntia ficus-indica* tuvo sus inicios en las regiones áridas de América Central y del Sur, donde fue cultivada y utilizada por las culturas como alimento y medicina tradicional contribuyendo a su propagación influenciada por la colonización y el comercio, llevada y cultivada a regiones como Europa, África y Asia (gracias a su adaptabilidad climática y de suelo) como resultado de los intercambios culturales y comerciales entre los continentes (Kiesling, 1998).

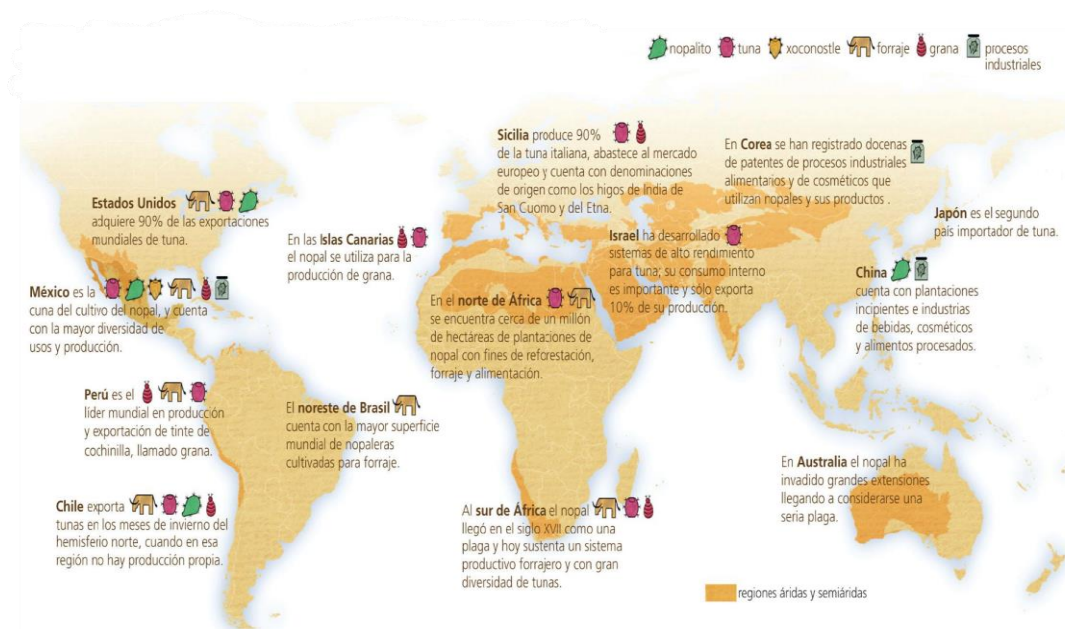


Figura 1 Distribución de nopalito, tuna y xoconostle. Fuente: CoMeNTuna (2009).

La diversidad y variabilidad del nopal en diferentes partes del mundo, especialmente en México, es muy grande, al igual que la diversidad en el contenido de los frutos (Yahia & Mondragón-Jacobo, 2011) y, aproximadamente de las 590,000 hectáreas cultivadas en todo el mundo, es en México donde el grado de diversidad genética corresponde al 70 % (Bellumori et al., 2023).

Producción en México

En México, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2023) destaca al país como el principal productor mundial de tuna, con una producción anual que supera las 400 mil toneladas y en temporadas de cosecha entre abril a noviembre. En el 2022, la superficie dedicada a la siembra de tuna superó las 45 mil hectáreas, logrando un volumen de 444 mil 081 toneladas. Este organismo resalta que la tuna cosechada en 16 entidades del país no solo ofrece sabor y propiedades nutricionales, sino que también es accesible para la población. Además, el nopal, presente en estas zonas, se convierte en una fuente de ingreso para las comunidades rurales, fomentando el arraigo de los campesinos a sus tierras. En estas regiones se consumen las pencas jóvenes, las tunas y el xoconostle, generando así una conexión integral entre la producción de tuna y el beneficio económico y cultural de las comunidades rurales (Agricultura Sostenible, 2022).

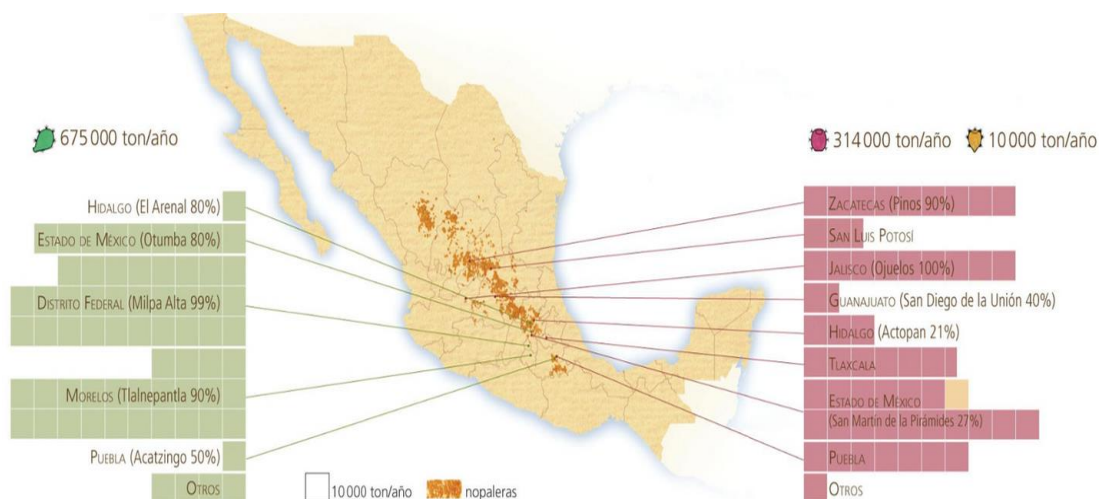


Figura 2 Plantaciones de nopal, tuna y xoconostle en México. Fuente: CoMeNTuna (2009).

Características de la planta

Los nopales presentan tallos compuestos por estructuras modulares llamadas pencas o cladodios carnosos que se agrupan en nopaleras y nopaleras tuneras (García Suárez & Serrano, 2021). El fruto se compone de cáscara (30-40 %), pulpa (60-70 %), y semillas (2-10 %), siendo la porción comestible con pulpa aromática y semillas ricas en minerales la de especial interés.

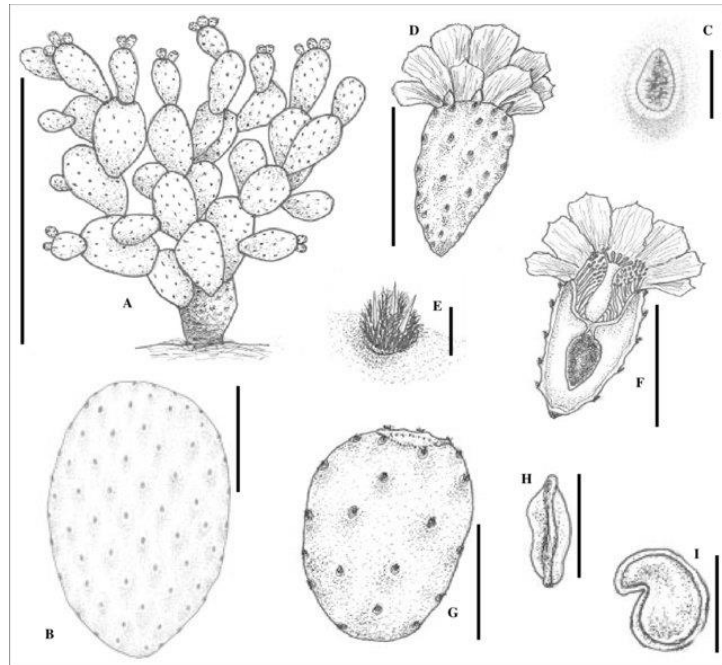


Figura 3 Descripción botánica de *Opuntia ficus-indica*. Fuente: Reyes-Agüero (2005)¹.

Es una planta adaptada para crecer en áreas desérticas, su morfología y fisiología le permiten sobrevivir con poca agua, donde sus espinas y cladodios realizan funciones de transpiración y fotosíntesis, por lo que estas adaptaciones le permiten almacenar agua en sus tallos, pierde poca por evaporación y transpira de noche para conservarla mejor (Arancibia et al., 2016).

¹ Nota: A, *Opuntia ficus-indica* (1 m); B, cladodio (10 cm); C: areola del cladodio (5 mm); D, flor (4 cm); E areola de la flor (5 mm); F, sección longitudinal de la flor (4 cm); G, fruto (5 cm); H: vista dorsal de la semilla (4 mm); I, vista ventral de la semilla (4 mm)

2.1.4 Composición química de la tuna

La tuna, fruto del nopal (*Opuntia ficus-indica*) se encuentra en diversas zonas áridas y varía de tamaño y forma. Su piel varía de tonalidad verde a rojiza, con una pulpa jugosa y dulce en su interior que puede ser roja, amarilla o blanca. La forma y tamaño puede variar (Gómez-Maqueo et al., 2020; CONABIO, 2023).

2.1.4.1 Pulpa

La pulpa es principalmente 90.60 % agua con sólidos solubles que van de 10 a 17 grados brix dependiendo de la variedad y madurez del fruto (Farceque Santos, 2021). Además, es rica en ácidos grasos beneficiosos para la salud y contiene una variedad de nutrientes como polifenoles, fibras, carotenoides, vitaminas, minerales y aminoácidos (Giraldo-Silva et al., 2023). La composición química varía según la especie, método de cultivo y región de origen (Sumaya-Martínez et al., 2010).

2.1.4.2 Semillas

A pesar de ser consideradas como subproductos de la tuna, son ricas en macro y micro minerales, fibra, ácidos grasos como el ácido linoleico y tocoferoles (Elkady et al., 2020). Contienen altos niveles de carbohidratos, almidones y grasas, útiles para productos alimenticios (Prieto-García et al., 2006). Además, son una fuente concentrada de proteínas, lípidos y minerales, que contribuyen a las necesidades nutricionales diarias.

2.1.4.3 Cáscara

La cáscara de tuna constituye aproximadamente del 45 a 50 % del peso total del fruto (Carena Ramírez & Ortiz Chavez, 2024) y se considera un residuo agroindustrial por ser una parte no comestible del fruto sin embargo ha sido considerada como fuente prometedora de compuestos bioactivos. Existen dos clases de pigmentos de la tuna, las betaxantinas amarillo-naranja y betacianinas rojo-morado, pero la tuna blanca o verde presenta menor cantidad de betalaínas y contienen exclusivamente indicaxantina (Ramírez Pérez, 2022).

Las cáscaras desechadas de frutas presentan tejidos específicos y, aunque pocos estudios han explorado la extracción de polisacáridos de estas cáscaras, en el caso de *O. ficus-indica*, se ha identificado una estructura ramificada de polisacáridos pécticos con ácido galacturónico y ramnosa (Jiménez-Aguilar et al., 2014; Gheribi et al., 2019). Según el estudio realizado por Amaya-Cruz, Pérez-Ramírez, García, Mondragón-Jacobo & Reynoso-Camacho (2019) llevaron a cabo un análisis de la composición fitoquímica de tres variedades de cáscaras de tuna pigmentadas, en donde se encontró que la variedad 'Cristalina' exhibía un elevado contenido de polifenoles hidrolizables.

2.1.5 Valor nutricional de la cáscara de los frutos

Las características fisicoquímicas y nutricionales varían según factores genéticos, clima y prácticas agronómicas. El fruto (pulpa y piel) incluye agua, azúcares, ácido ascórbico, fibras, aminoácidos, minerales y antioxidantes como fenoles, flavonoides, betalaínas y carotenoides. Su valor energético varía de 31 a 50 kcal/100 g, comparable con otros frutos (Martins et al., 2023).

Entre los nutrientes clave, se encuentra un alto contenido de fibra dietética, lo cual es importante para la salud digestiva. La fibra en la cáscara ayuda a regular el tránsito intestinal y puede contribuir a la reducción del riesgo de enfermedades crónicas como la diabetes y las enfermedades cardiovasculares.

Una revisión sistemática de los fitoquímicos y las actividades farmacológicas de *O. ficus-indica* es proporcionada por Giraldo-Silva et al. (2023) quienes también describen cómo el consumo de la fruta mejora la salud humana, exhibiendo actividad antioxidante y otras actividades farmacológicas relevantes a través de mecanismos enzimáticos y no enzimáticos. Los frutos de *O. ficus-indica* por su alto contenido de sustancias activas, como antocianinas, flavonoides y polisacáridos, algunos estudios muestran que pueden regular la flora intestinal (Zhang et al., 2022).

Los resultados de De Wit et al. (2019) indican que la cáscara de la variedad Nepgen de la tuna blanca es rica en antioxidantes, incluyendo betalaínas,

betaxantinas, carotenoides y compuestos fenólicos, con un alto contenido de ácido ascórbico (55.88 mg/100g). La variedad Morado también tiene propiedades antioxidantes, aunque en menor medida, con ácido ascórbico de 12.11 mg/100g. Estos antioxidantes pueden ayudar a reducir el daño oxidativo y disminuir el riesgo de enfermedades crónicas. Además, la cáscara de la pera espinosa es una fuente de vitamina C, beneficiando al sistema inmunológico y piel.

De acuerdo con el estudio de El-Beltagi, Ahmed, Mohamed, Al-Otaibi, Ramadan, & Elkatry (2023) destaca el contenido de minerales en la cáscara de tuna como magnesio (963 mg), calcio (929 mg), sodio (911.5 mg) y potasio (304.5 mg) con valores aproximados por 100 g de peso seco; por otro lado cuenta con una alta concentración de compuestos fenólicos totales, ácido ascórbico, antocianinas, flavonoides y carotenoides, que contribuyen a su capacidad antioxidante y a sus posibles beneficios para la salud.

2.1.6 Aplicaciones y beneficios a la salud

El procesamiento de frutas y hortalizas genera subproductos ricos en compuestos saludables, como la cáscara de la tuna. Con un alto valor nutricional, aproximadamente el 40 % se descarta debido a problemas de almacenamiento, privándonos de compuestos beneficiosos como fenoles, betalaínas y fibra. Estos subproductos desechados, que incluyen semillas y cáscaras, son una fuente potencialmente valiosa de nutrientes desaprovechada en la promoción de la salud y la prevención de enfermedades (Ochoa-Velasco et al., 2022).

El consumo de tuna no solo ofrece beneficios nutricionales debido a su contenido de nutrientes y propiedades antioxidantes, sino que también se relaciona con posibles ventajas para la salud, incluyendo la reducción de la inflamación, mejora en el control del azúcar en la sangre y potencial promoción de la salud intestinal, según estudios de Hernández García et al. (2020) y Simmonds & Preedy (2015). Además, con relación a los compuestos bioactivos presentes, como ácidos fenólicos, polifenoles, flavonoides, indicaxantina, betalaínas y vitaminas, su potencial antioxidante, que participa en beneficios para la salud como la prevención de la inflamación, desregulación cardiovascular y las enfermedades

neurodegenerativas, también han demostrado actividad anticancerígena (Karym et al., 2014).

Estos subproductos contienen importantes compuestos funcionales, como las fibras dietéticas, que constituyen alrededor del 65 %. Tal valor permite que esta fruta sea una excelente fuente de fibras, en comparación con otras frutas como las cáscaras de plátano, mango y manzana (Borchani et al., 2022).

2.1.6 Encapsulación

La encapsulación es un método efectivo para proteger y transportar moléculas bioactivas o células vivas en alimentos al mantener agentes activos en un material portador (Culas et al., 2024) y debido a su tamaño permite una mejor absorción y retención de nutrientes en el intestino con una liberación controlada provocada por factores como temperatura, enzimas, pH o fermentación (Kailasapathy, 2015).

La encapsulación se destaca como tecnología de micro-empaquetamiento, ofreciendo ventajas como la protección contra condiciones adversas, aumento de la vida útil y preservación durante el paso gastrointestinal. Es empleada en diversas industrias, incluyendo la farmacéutica, cosmética, alimentaria, médica, textil, pesticida, química, agroquímica, biomédica y de plásticos, abarca propósitos que involucran biomoléculas variadas como carbohidratos, polímeros, polisacáridos, proteínas y lípidos (Gürbüz et al., 2020; Castromonte et al., 2020; Díaz-Montes et al., 2022; Pino & Aragüez, 2021).

De acuerdo con Choudhury, Meghwal & Das (2021) el tamaño de las microcápsulas varía según las técnicas utilizadas en su elaboración, su morfología tanto interna como externa depende de las condiciones operativas y los materiales de pared empleados, lo que permite que tomen diversas formas, desde esferas simples hasta cápsulas con núcleos irregulares o múltiples núcleos rodeados por recubrimientos.

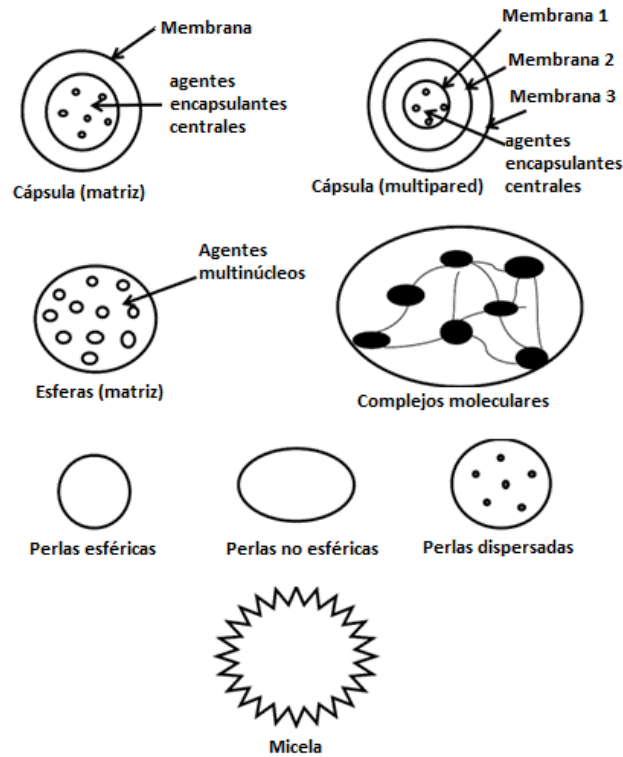


Figura 4 Diagramas esquemáticos de tipos representativos de microcápsulas, esferas, complejos y perlas utilizadas en la encapsulación. Fuente: Santiago and Castro (2016).

Las partículas encapsuladas tienen dos componentes principales: el núcleo (componentes activos a recubrir) y la cubierta de recubrimiento. Los materiales del núcleo pueden presentarse en diferentes estados físicos, como líquido, sólido o gas, y el proceso implica atrapar o cubrir el componente activo con una pared matricial. La selección del material de la pared puede realizarse entre un amplio grupo de polímeros naturales o sintéticos según las características deseadas para el producto final (Culas et al., 2024; Ayyaril et al., 2023).

La encapsulación ofrece beneficios significativos, como el aumento de la solubilidad y biodisponibilidad de las sustancias encapsuladas, facilitando el embalaje, transporte y comercialización. También oculta propiedades no deseadas como olor y sabor, permite la aplicación de diversas técnicas innovadoras y previene la degradación de ingredientes durante el procesamiento y almacenamiento. Además, mejora la estabilidad microbiológica del producto (Gómez et al., 2018).

2.1.7 Métodos de encapsulación

La técnica de encapsulación de compuestos, aunque relativamente nueva, ha experimentado avances notables y rápidos, lo que ha permitido su aplicación en diversas áreas. El método de encapsulación se debe seleccionar según las características requeridas de las partículas, como tamaño, morfología y rugosidad, el tipo de materiales pared (polisacáridos, lípidos o proteínas) y aplicación (Díaz-Montes et al., 2022).

El proceso de encapsulación, según Reque & Brandelli (2021) consta de tres etapas principales:

1. Incorporación del componente bioactivo a una matriz sólida o líquida.
2. Dispersión o pulverización de la matriz líquida.
3. Estabilización mediante procesos físicos (evaporación, solidificación y coalescencia), químicos (polimerización) o fisicoquímicos (gelación).

Asimismo, destaca que el tamaño de la cápsula suele variar según las tecnologías de encapsulación utilizadas, siendo de 5–150 μm en la atomización, 20–200 μm en la pulverización refrigerante, 5 μm -1 mm en el recubrimiento por pulverización, 1 μm -1 mm en la coacervación, 200 μm -1 mm en la emulsificación o 300 μm -3 mm en la extrusión.

Las diferentes tecnologías de encapsulación se describen a continuación:

2.1.7.1 Coacervación

La conservación es una técnica de encapsulación que se basan en la separación de fases líquido-líquido donde el material del núcleo se dispersa en una solución de polímero formador de pared (Sun et al., 2021). Esta técnica se divide en conservación compleja y simple con la primera formando una matriz fuertemente mediante la complicación de dos polímeros opuestos, mientras que la segunda implica la precipitación de un polímero soluble (Spruijt, 2023).

2.1.7.2 Secado por aspersión

Como menciona Mesquitic Mendoza (2021), el proceso de secado por aspersión es ampliamente utilizado en las industrias alimentaria y farmacéutica por su alta eficiencia para materiales sensibles al calor, además de asegurar partículas de calidad sensorial y textural deseable (Özkan et al., 2019). El ingrediente activo se mezcla con el material encapsulante para formar una emulsión, que se homogeneiza y atomiza en una cámara de secado, después, la niebla se convierte en polvo mediante aire caliente y las partículas se recogen con ciclones o filtros (Choudhury et al., 2021).

2.1.7.3 Enfriamiento por aspersión

Es un proceso eficiente para solidificar líquidos atomizados en partículas sin implicar la transferencia de masa. Se utiliza material de recubrimiento como aceites vegetales en puntos de fusión específicos. En este método, el material del núcleo se disuelve o dispersa en un portador fundido, y la mezcla resultante se rocía en una cámara de enfriamiento a través de una boquilla atomizadora. Las gotas fundidas, al entrar en contacto con el aire enfriado, se solidifican, dando lugar a la formación de micropartículas con una distribución uniforme del material del núcleo (Gürbüz et al., 2020).

2.1.8 Gelificación iónica

Como menciona Londoño-Moreno et al. (2023), esta técnica es empleada para proteger y estabilizar compuestos bioactivos mediante la creación de una red hidrofílica o hidrofóbica a través de biopolímeros en la pared del material encapsulado permitiendo la liberación del compuesto bioactivo. El método consiste en gotear la solución que contiene el material de pared en una solución catiónica para formar las microcápsulas, dando la formación de enlaces iónicos entre los grupos carboxilo de los polisacáridos (alginato) y los iones de la solución catiónica (cloruro de calcio), donde los iones de sodio son reemplazados por los iones de calcio, formando una matriz gelatinosa que encapsula el compuesto bioactivo (Silva de Azevedo & Zapata Noreña, 2021; Kurozawa & Hubinger, 2017;

Rajmohan & Bellmer, 2019;). Las ventajas de este método es que puede realizarse a temperatura ambiente y sin equipos sofisticados, reduciendo costos del procedimiento.

2.1.9 Materiales de encapsulación y/o de cobertura

La selección del material de recubrimiento es crucial para obtener un producto encapsulado eficaz, ya que sus propiedades determinan la protección del compuesto (Aldana et al., 2011). Se han reportado diferentes polímeros (naturales o sintéticos) como agentes encapsulantes beneficiando la solubilidad y biodisponibilidad de las sustancias, mejorando el empaque y transporte, enmascarando propiedades indeseables y previniendo la degradación de ingredientes (Pino y Aragüez, 2021). En el área alimentaria, se han ensayado con péptidos bioactivos, vitaminas, aceites esenciales, cafeína, extractos de plantas, ácidos grasos, flavonoides, carotenoides y terpenos como los principales compuestos encapsulados para mejorar la estabilidad de los sistemas formulados, prolongar el tiempo de liberación, retener y proteger las propiedades activas, reducir la oxidación lipídica y mantener las propiedades organolépticas (Zabot et al., 2022).

Entre los numerosos materiales de pared comúnmente empleados para encapsular, se encuentran los polisacáridos, que tienen una amplia disponibilidad y bajo costo. Se destacan por sus ventajas como buena capacidad de encapsulación, estabilidad, protección contra la oxidación y la humedad (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2015). Los polisacáridos son biodegradables, biocompatibles y no tóxicos, pero su aplicación puede limitarse debido a su baja estabilidad térmica y propensión a la degradación en ambientes ácidos (Santiago & Castro, 2016).

2.1.9.1 Alginato

Es un polisacárido compuesto por unidades de ácido β -D-manurónico (bloques M) y ácido α -L-gulorónico (bloques G), unidos a (1,4) en diferentes proporciones, lo que genera que la distribución de los monómeros de su cadena polimérica

determine la flexibilidad del gel resultante (Ortiz-Romero et al., 2021). Es extraído de las algas marrones y es soluble en agua, gracias a su capacidad hidrofílica. Sus aplicaciones principales se encuentran en las industrias alimentaria y farmacéutica, donde actúa como agente de liberación controlada de nutrientes y medicamentos, sin embargo, puede ser sensible al pH y degradarse en medios ácidos, lo cual es importante tener en cuenta en su aplicación (Aldana et al., 2011; Zabot et al., 2022).

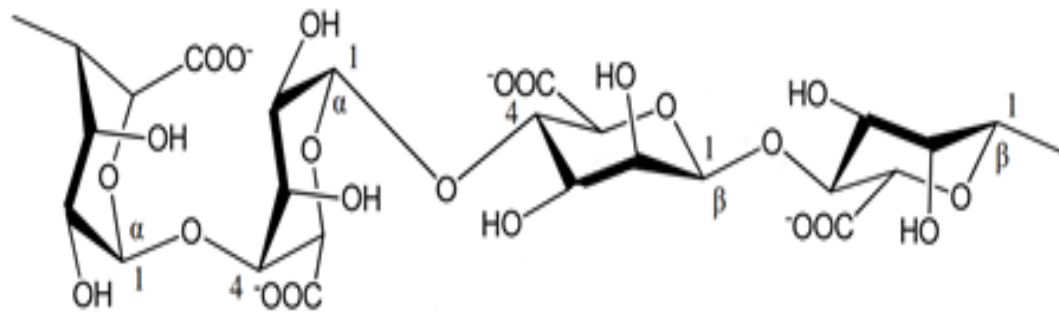


Figura 5 Estructura química del alginato. Fuente: Uyen et al. (2020).

2.1.9.2 Características del alginato

Según Arriola et al. (2019), el alginato demuestra ser útil debido a su capacidad para proteger y liberar los compuestos de interés de manera controlada mediante gelificación iónica, formando hidrogeles al entrar en contacto con cationes divalentes como el Ca^{2+} debido a su afinidad.

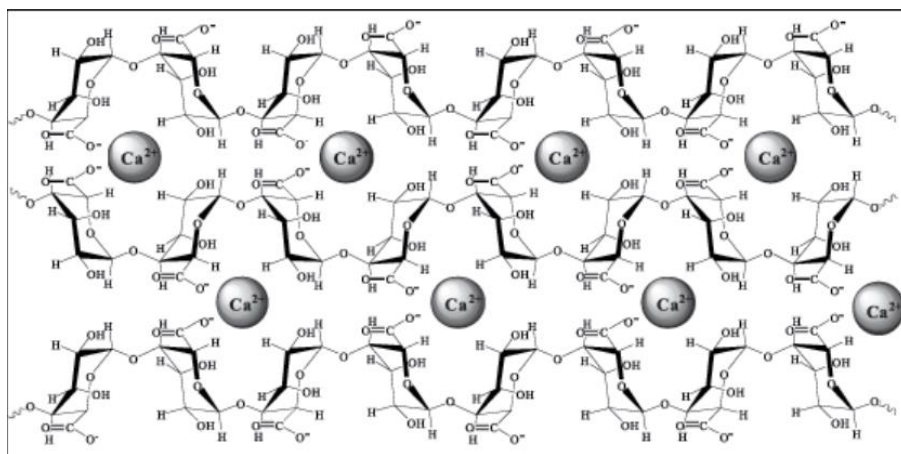


Figura 6 Afinidad del alginato con el catión Ca^{2+} para formar el modelo “Caja de huevo”. Fuente: Ortiz-Romero et al. 2021.

El alginato se utiliza solo o en combinación con otros polímeros naturales, como mucílagos de plantas, para diversas aplicaciones alimentarias y de encapsulación. Las matrices mixtas mejoran la conservación de los compuestos encapsulados al combinar los beneficios de cada material (Reyes Escogido et al., 2023).

Particularmente, la inclusión de subproductos agroindustriales para la mejora de la formulación de las microcápsulas de alginato ofrece nuevas alternativas nutricionales y funcionales. Por ejemplo, de acuerdo con la investigación de Otálora, Carriazo, Iturriaga, Osorio & Nazareno (2016) donde encapsularon mediante gelificación iónica y secado por aspersión, betalaínas a partir de frutos de cactus morados con alginato de calcio y albúmina sérica bovina, la primer técnica evidenció un efecto protector, mayor manteniendo su actividad antioxidante con respecto al secado por aspersión. En otra investigación realizada por Bruno et al., (2022) la combinación de técnicas de microencapsulación del extracto de cáscara de uva, la gelificación iónica influyó en las propiedades fisicoquímicas, morfológicas y biológicas durante el proceso de digestión, mejorando con ello un menor tamaño de partícula y esfericidad.

Asimismo, Liu, Wang, Xie, Zhang & Zhang (2022), emplearon saponina a partir de *Momordica grosvenorii*, fruto utilizado como edulcorante, como retardante de la rancidez oxidativa en bebidas funcionales, ya que su actividad antioxidante se ve afectada por las condiciones ácidas, por lo que su encapsulamiento compuesto por una matriz de alginato con quitosano mejoró su estabilidad en condiciones gastrointestinales. Del mismo modo, Dadwal et al. (2021) desarrollaron microcápsulas de alginato-calcio reforzadas con polisacáridos para mejorar la liberación controlada de fenoles cítricos, ayudando a preservar la estabilidad morfológica.

2.1.9.3 Mucílago

No obstante, el uso de alginato como material de pared puede presentar algunas limitaciones con respecto a su funcionalidad, por lo que se han investigado distintos materiales a base de carbohidratos para su aplicación conjunta en

procesos de encapsulación. Uno de estos materiales es el mucílago, componente principal de la cáscara de tuna, el cual es un heteropolisacárido soluble en agua y con alto peso molecular (Reyes Escogido et al., 2023), además, posee en su estructura química cargas negativa debido a la presencia de ácido galacturónico y unidades monoméricas de L-arabinosa, D-xilosa, D-galactosa, L-ramnosa (Tosif et al., 2021). Esta estructura química le confiere propiedades gelificantes, similar a la pectina, una gran capacidad de retención de agua (Van Rooyen et al., 2023), además de excelentes propiedades funcionales para la formación de películas, emulsiones y geles (Tosif et al., 2021).

De acuerdo con la investigación de Anuradha et al. (2015), mencionan que la interacción entre el mucílago de *Portulaca* y el alginato forman una estructura de red en la pared de las microcápsulas debido a la hidratación de los grupos hidrofílicos de ambos polisacáridos. Por otra parte, Tosif et al. (2021) mencionan que la aplicación de mucílago como agente de encapsulación pueden ayudar a la retención de compuestos bioactivos para aumentar su estabilidad.

Para la formación efectiva de las microcápsulas, Reyes Escogido et al. (2023) mencionan que al mezclar el alginato con el mucílago, la presencia de iones en la solución reticulante, crea una red con el alginato, mediante enlaces de hidrógeno de sus grupos funcionales, que atrapa al mucílago confiriendo estabilidad a la matriz polimérica.

2.2 Proceso de digestión humana

La digestión es un proceso metabólico que transforma los alimentos ingeridos en formas absorbibles en el tracto gastrointestinal, involucrando una digestión mecánica y química que ocurre desde la boca hasta el intestino delgado, con la participación del páncreas, el hígado y la vesícula biliar (Rivas Montoya, 2007).

La biodisponibilidad de nutrientes durante la digestión es una etapa importante para la salud humana ya que, a través del sistema gastrointestinal, los minerales y vitaminas ingresan al cuerpo, donde lípidos, proteínas y carbohidratos complejos se descomponen en unidades absorbibles, principalmente en el

intestino delgado para después atravesar la mucosa e ingresar a la linfa o la sangre (Boland, 2016; Justin, 2022).

Las sales biliares contribuyen a la digestión de los alimentos y absorción de grasas, vitaminas liposolubles y colesterol; se produce en el hígado y se almacena en la vesícula biliar y se libera hacia el intestino delgado (duodeno) por la estimulación de la hormona colecistoquinina, quien es secretada por la presencia de grasas en el intestino (Jiménez et al., 2020; Saiman, 2023). Para que ocurra la descomposición del bolo alimenticio y los nutrientes puedan ser absorbidos en el intestino delgado, debe haber un cambio de pH en las fases digestivas (gástrica a pH 3 e intestinal a pH 7), permitiendo la alcalinización del bolo por la presencia de enzimas hidrolíticas (proteasas, amilasas y lipasas) en las sales biliares (Staruss Brunell & Jinich Brook, 1976; Gutiérrez et al., 2021).

La estructura de las sales biliares se conforma por una región hidrofílica e hidrofóbica para la emulsificación de las grasas, permitiendo que las enzimas las descompongan en unidades pequeñas (ácidos grasos y glicerol) aumentando la superficie de contacto entre las grasas emulsificadas y las enzimas digestivas mediante la formación de micelas que facilitan la accesibilidad de las lipasas para solubilizar las grasas y permitir su absorción en el intestino delgado hacia el torrente sanguíneo y, al término de este proceso, las sales biliares son reabsorbidas en el íleon para volver al hígado y ser reutilizadas (Jiménez et al., 2020).

2.2.1 Factores que afectan la protección

Al diseñar sistemas encapsulados para la administración de compuestos, es esencial considerar la complejidad del tracto gastrointestinal considerando los niveles del pH, el tiempo de digestión y las presiones peristálticas. Los encapsulados deben atravesar la boca, el estómago y el intestino delgado antes de llegar al colon, enfrentando factores que amenazan su viabilidad (Espinosa Andrews & García Márquez, 2017).

La interacción de los encapsulados con los fluidos gástricos y enzimas digestivas puede aumentar la permeabilidad de sus paredes, lo que aumenta su susceptibilidad al daño por lo que los sistemas de encapsulamiento deben garantizar la supervivencia a estos factores además de daños por almacenamiento (Ramos Domingo, 2020; Xu et al., 2022; Mosquera Vivas et al., 2023).

Así, durante la elaboración de las microcápsulas es importante considerar la concentración de CaCl_2 ya que es un parámetro que influye en la eficiencia de encapsulación y las características de estas, como su morfología y esfericidad, donde un valor cercano a 1 se relaciona a una esfericidad completa (Abraham et al., 2021; Toprakçı et al., 2023).

De acuerdo con los resultados de Wongverawattanakul, Suklaew, Chusak, Adisakwattana & Thilavechet (2022), las interacciones de la matriz alginato-calcio es un factor importante debido a que su interacción dentro de los valores bajos de pH en condiciones gástricas, el alginato forma un enlace estable con el calcio dando una respuesta favorable en la retención y posterior liberación gradual del contenido de fenoles totales dentro de las cápsulas.

2.3 Condiciones gastrointestinales simuladas

Para llevar a cabo estudios de nutrición humana, se diseñan modelos que repliquen el entorno gastrointestinal con el fin de ser rápidos, rentables y sin restricciones éticas (Gonçalves et al., 2021).

La digestión es un proceso metabólico de transformación de alimentos ingeridos en formas que pueden ser absorbidas por el tracto gastrointestinal, donde participa el estómago y el intestino delgado (Rivas Montoya, 2007).

2.3.1.1 Fisiología del tracto gastrointestinal

Cuando los alimentos pasan hacia el estómago, estos se mezclan con los jugos gástricos secretados (pH entre 1.5 a 3.5) que contienen ácido clorhídrico, favoreciendo la digestión de los alimentos, en especial de proteínas. En este

proceso, los alimentos son almacenados temporalmente para después simular el efecto de su digestión en el intestino delgado (Taylor & Knight, 2021). Cuando el estómago finaliza la transformación de los alimentos, ingresan al intestino delgado para ahora crear un ambiente óptimo para las enzimas digestivas que se encuentran en las sales biliares (pH entre 6 y 7), producidas por el páncreas, y permitir la digestión y absorción de los nutrientes (Ogoburio, 2023).

Por ejemplo, Kanokpanont et al. (2018), encapsularon antocianinas extraídas de morera para someterlos a fluidos gástricos simulados mostrando que la interacción entre el alginato y las antocianinas son estables en medios ácidos, lo que sugiere este ser un sistema efectivo de encapsulación para la biodisponibilidad de compuestos antioxidantes.

En otro estudio, realizado por Martinović, Lukinac, Jukić, Ambrus, Planinić, Šelo, Klarić, Perković, & Bucić-Kojić (2023), protegieron compuestos fenólicos usando como material de recubrimiento al alginato de las condiciones gástricas simuladas, demostrando que, en medios ácidos, los antioxidantes se liberen de manera controlada y sobrevivan hasta su sitio de absorción.

Además, los hallazgos de Luo et al. (2022) sugieren que los frutos de *K. coccinea* tienen un alto potencial antioxidante, y su eficacia puede verse influenciada por el proceso digestivo durante la fase gástrica, que mejora sus propiedades antioxidantes antes de disminuir en la fase intestinal.

2.4 Literatura citada

- Abraham, R. E., Su, P., Puri, M., Raston, C. L., & Zhang, W. (2021). Release of encapsulated bioactives influenced by alginate viscosity under in-vitro gastrointestinal model. *International Journal of Biological Macromolecules*, 170, 540-548. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.143>
- Agricultura Sostenible. (2022). Generación de alternativas de ingreso para los productores de tuna en San Pablo Xúchitl. Agricultura Sostenible. Recuperado 24 de diciembre de 2023, de <https://agriculturasostenible.mx/2021/12/23/tuna/>
- Aldana, A. S., Rodríguez-Sandoval, E., & Aponte, A. A. (2011). Encapsulación de Aditivos para la Industria de Alimentos. *Ingeniería y Competitividad*, 5(2), 73. <https://doi.org/10.25100/iyc.v5i2.2298>

- Almaraz Regalado, H. & Suárez Gómez, J. de J. (1980). El nopal tunero (*Opuntia amyclaea*, Tenore), Una alternativa de producción en el Estado de Guanajuato [Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara]. Consultada en: http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1313/Almaraz_Regalado_Hector.pdf?sequence=1
- Amaya-Cruz, D. M., Pérez-Ramírez, I. F., García, J. D., Mondragón-Jacobo, C., Déctor, A. & Reynoso-Camacho, R. (2019). An integral profile of bioactive compounds and functional properties of prickly pear (*Opuntia ficus indica* L.) peel with different tonalities. *Food Chemistry*, 278, 568-578. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.031>
- Anuradha, K., Bangal, P., & Madhavendra, S. S. (2015). Structural characterization and water turbidity removing efficacy of Portulaca mucilage–alginate (PMA) beads. *Desalination And Water Treatment*, 57(10), 4386-4397. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.994108>
- Arancibia, D., Talamilla, M., Prat, L., & Ministerio de Agricultura - Chile. (2016). La tuna - Manejo del cultivo y usos. En Fundación para la Innovación Agraria - Biblioteca Digital. Facultad de Ciencias Agronómicas - Universidad de Chile.
- Arriola, N. D. A., Chater, P. I., Wilcox, M., Lucini, L., Barba, F. J., Dalmina, M., Pearson, J. P., & De Mello Castanho Amboni, R. D. (2019). Encapsulation of Stevia rebaudiana Bertoni aqueous crude extracts by ionic gelation – effects of alginate blends and gelling solutions on the polyphenolic profile. *Food Chemistry*, 275, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.086>
- Ayyaril, S. S., Shanableh, A., Bhattacharjee, S., Rawas-Qalaji, M., Cagliani, R., Shabib, A., & Khan, M. I. (2023). Recent progress in micro and nano-encapsulation techniques for environmental applications: A review. *Results in Engineering*, 18, 101094. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101094>
- Bakewell-Stone, P. (2023). *Opuntia ficus-indica* (prickly pear) [Conjunto de datos]. En CABI Compendium. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.37714>
- Bellumori, M., Innocenti, M., Andrenelli, L., Melani, F., Cecchi, L., Pandino, G., Mauromicale, G., La Malfa, S., & Mulinacci, N. (2023). Composition of discarded Sicilian fruits of *Opuntia ficus indica* L.: phenolic content, mineral profile and antioxidant activity in peel, seeds and whole fruit. *Food Chemistry*, 428, 136756. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136756>
- Boland, M. J. (2016). Human digestion – a processing perspective. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(7), 2275–2283. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7601>
- Borchani, M., Masmoudi, M., Amira, A. B., Besbes, S., Blecker, C., & Attia, H. (2022). Physicochemical, thermal and rheological properties of prickly pear

- peel flours and fibers. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(5), 3557-3567. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01467-2>
- Bruno Norcino, L., Farinassi Mendes, J., De Abreu Figueiredo, J., Leite Oliveira, N., Alvarenga Botrel, D., & Capparelli Mattoso, L. H. (2022). Development of alginate/pectin microcapsules by a dual process combining emulsification and ultrasonic gelation for encapsulation and controlled release of anthocyanins from grapes (*Vitis labrusca* L.). *Food Chemistry*, 391, 133256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133256>
- Castromonte, M., Wacyk, J., & Valenzuela, C. (2020). Encapsulación de extractos antioxidantes desde sub-productos agroindustriales: una revisión. *Revista Chilena de Nutrición*, 47(5), 836–847. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182020000500836>
- Cerena Ramírez, D. S., & Ortiz Chavez, V. V. (2024). *Evaluación del efecto de harina de cáscara de tuna (Opuntia ficus-indica) sobre el rendimiento productivo y calidad de carne del cuy*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Consultada en: https://repositorio.unifsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/8847/TE_SIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Choudhury, N., Meghwal, M., & Das, K. (2021). Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods. *Food Frontiers*, 2(4), 426–442. <https://doi.org/10.1002/fft2.94>
- CONABIO. (2023). *Nopales | Biodiversidad mexicana*. Biodiversidad Mexicana. Recuperado 27 de diciembre de 2023, de <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/nopales>
- Consejo Mexicano de Nopal y Tuna, AC [CoMeNTuna], CONABIO, & Red Nopal. (2008). *Nopales, tunas y xoconostles* (2.^a ed.) [En línea], Disponible en: <http://bioteca.conabio.gob.mx/janium/Documentos/6579.pdf>
- Culas, M. S., Popovich, D. G., & Rashidinejad, A. (2023). Recent advances in encapsulation techniques for cinnamon bioactive compounds: A review on stability, effectiveness, and potential applications. *Food Bioscience*, 57, 103470. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103470>
- Dadwal, V., Joshi, R., & Gupta, M. (2021). Formulation, characterization and in vitro digestion of polysaccharide reinforced Ca-alginate microbeads encapsulating Citrus medica L. phenolics. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie/Food Science & Technology*, 152, 112290. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112290>
- Díaz-Montes, E., Cerón-Montes, G. I., & Vargas-León, E. A. (2022). Encapsulación de compuestos bioactivos: una revisión sistemática. *PADI Boletín Científico De Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 17–28. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9575>

- El-Beltagi, H. S., Ahmed, A., Mohamed, H. I., Al-Otaibi, H. H., Ramadan, K. M. A., & Elkatry, H. O. (2023). Utilization of prickly pear peels flour as a natural source of minerals, dietary fiber and antioxidants: Effect on cakes production. *Agronomy*, 13(2), 439. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020439>
- Elkady, W. M., Bishr, M., Abdel-Aziz, M. M., & Salama, O. (2020). Identification and isolation of anti-pneumonia bioactive compounds from *Opuntia ficus-indica* fruit waste peels. *Food & Function*, 11(6), 5275-5283. <https://doi.org/10.1039/d0fo00817f>
- FAO. (2018). *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal*. Food & Agriculture Organization of The United Nations. <https://www.fao.org/3/i7628es/i7628ES.pdf>
- Farceque Santos, J. P. (2021). *Elaboración de mermelada aprovechando la pulpa de "tuna" Opuntia ficus-indica L. variedad blanca, edulcorada con panela granulada orgánica y evaluación del nivel de aceptabilidad*. [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. Consultada en: <https://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14095/1027/Tesis%20-%20Farceque%20Santos%2c%20Juan%20Pedro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fideicomiso de Riesgo Compartido. (2017). *La TUNA, una fruta muy mexicana*. gob.mx. Recuperado el 18 de diciembre de 2023, de <https://www.gob.mx/firco/articulos/la-tuna-una-fruta-muy-mexicana?idiom=es#:~:text=La%20tuna%20fruta%20se%20utiliza,elaborar%20fruta%20abrillantada%20en%20alm%C3%ADbar>
- García Suárez, Ma. D., & Serrano, H. (2021, 7 julio). *La tuna de los nopales Opuntia SP. una cactácea de usos múltiples* | No. 149 | 2021 | TecnoAgro. Recuperado 4 de enero de 2024, de <https://tecnoagro.com.mx/no.-149/la-tuna-de-los-nopales-opuntia-sp-una-cactacea-de-usos-multiples>
- Gheribi, R., Habibi, Y., & Khwaldia, K. (2019). Prickly pear peels as a valuable resource of added-value polysaccharide: Study of structural, functional and film forming properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 238-245. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.228>
- Giraldo-Silva, L., Ferreira, B., Rosa, E., & Dias, A. C. P. (2023). *Opuntia ficus-indica* Fruit: A Systematic Review of Its Phytochemicals and Pharmacological Activities. *Plants*, 12(3), 543. <https://doi.org/10.3390/plants12030543>
- Gómez-Maqueo, A., Antunes-Ricardo, M., Welti-Chanes, J., & Cano, M. P. (2020). Digestive Stability and Bioaccessibility of Antioxidants in Prickly Pear Fruits from the Canary Islands: Healthy Foods and Ingredients. *Antioxidants*, 9(2), 164. <https://doi.org/10.3390/antiox9020164>

- Gonçalves, A., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2021). Methodologies for simulation of gastrointestinal digestion of different controlled delivery systems and further uptake of encapsulated bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.007>
- Gouws, C. A. (2020). *Compositional Analysis of Prickly Pear (Opuntia spp.) fruit and its Physiological Effects upon Consumption in Humans* [Tesis de doctorado, Universidad de Canberra].
- Gürbüz, E., Baysal, G., Keresteci, B., & Günneç, C. (2020). Encapsulation Applications and Production Techniques in the Food Industry. *Journal of Nutrition and Health Sciences*, 7(1). <https://www.annexpublishers.com/articles/JNH/7106-Encapsulation-Applications-and-Production-Techniques-in-the-Food-Industry.pdf>
- Gutiérrez, A. B. H., Grau, A. A., Lerma, J. C., & Grau, A. M. A. (2021). Simulación in vitro de la digestión gastrointestinal de alimentos. *RiuNet*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/158446>
- Hernández García, F., Andreu Coll, L., Cano-Lamadrid, M., López Lluch, D., Carbonell Barrachina, Á. A., & Legua Murcia, P. (2020). Valorization of Prickly Pear [Opuntia ficus-indica(L.) Mill]: Nutritional Composition, Functional Properties and Economic Aspects. In *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92009>
- Jiménez-Aguilar, D. M., López-Martínez, J. M., Hernández-Brenes, C., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Welte-Chanes, J. (2015). Dietary fiber, phytochemical composition and antioxidant activity of Mexican commercial varieties of cactus pear. *Journal of Food Composition and Analysis*, 41, 66–73.
- Justin J., P. (2022, September 12). *Physiology, digestion*. *StatPearls - NCBI Bookshelf*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544242/>
- Kailasapathy, K. (2015). Bioencapsulation Technologies for Incorporating Bioactive Components into Functional Foods. *Advances in Food Biotechnology*, 311–334. <https://doi.org/10.1002/9781118864463.ch19>
- Kanokpanont, S., Yamdech, R., & Aramwit, P. (2017). Stability enhancement of mulberry-extracted anthocyanin using alginate/chitosan microencapsulation for food supplement application. *Artificial Cells Nanomedicine and Biotechnology*, 46(4), 773-782. <https://doi.org/10.1080/21691401.2017.1339050>
- Karym, E. M., Kharrassi, Y. E., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., Kebbaj, M. S. E., Latruffe, N., Lizard, G., Nasser, B., & Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal cactus (Opuntia ficus-indica) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19(9), 14879-14901. <https://doi.org/10.3390/molecules190914879>

- Kiesling, R. (1998). Origen, Domesticación y Distribución de *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 3. <https://www.ipacd.org/ipacd/article/view/159>
- Kurozawa, L. E., & Hubinger, M. D. (2017). Hydrophilic food compounds encapsulation by ionic gelation. *Current Opinion in Food Science*, 15, 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.06.004>
- Liu, L., Wang, Y., Xie, H., Zhang, B., & Zhang, B. (2022). Enhancing the Antioxidant Ability of *Momordica grosvenorii* Saponin to Resist Gastrointestinal Stresses via Microcapsules of Sodium Alginate and Chitosan and Its Application in Beverage. *Beverages*, 8(4), 70. <https://doi.org/10.3390/beverages8040070>
- Londoño-Moreno, A., Mundo-Franco, Z., Franco-Colín, M., Buitrago-Arias, C., Arenas-Ocampo, M. L., Jiménez-Aparicio, A. R., Cano-Europa, E., & Camacho-Díaz, B. H. (2023). Controlled release of phycocyanin in simulated gastrointestinal conditions using Alginate-Agavins-Polysaccharide beads. *Foods*, 12(17), 3272. <https://doi.org/10.3390/foods12173272>
- Lozada Carbajal, M. A. (2007). *Extracción y caracterización reológica de polisacáridos tipo pectina de la cáscara de tuna (Opuntia spp.)* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo].
- Márquez-Berber, S. R., Torcuato-Calderón, C., Almaguer-Vargas, G., Colinas-León, M. T., & Khalil Gardezi, A. (2012). EL SISTEMA PRODUCTIVO DEL NOPAL TUNERO (*Opuntia albicarpa* y *O. megacantha*) EN AXAPUSCO, ESTADO DE MÉXICO. PROBLEMÁTICA Y ALTERNATIVAS. *REVISTA CHAPINGO SERIE HORTICULTURA*, 18(1), 81-93. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60923315006>
- Martinović, J., Lukinac, J., Jukić, M., Ambrus, R., Planinić, M., Šelo, G., Klarić, A., Perković, G., & Bucić-Kojić, A. (2023). Physicochemical Characterization and Evaluation of Gastrointestinal In Vitro Behavior of Alginate-Based Microbeads with Encapsulated Grape Pomace Extracts. *Pharmaceutics*, 15(3), 980. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030980>
- Martins, M., Ribeiro, M. H., & Almeida, C. (2023). Physicochemical, Nutritional, and Medicinal Properties of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and Its Main Agro-Industrial Use: A Review. *Plants*, 12(7), 1512. <https://doi.org/10.3390/plants12071512>
- Monroy-Gutiérrez, T., Martínez-Damián, M. T., Barrientos-Priego, A. F., Gallegos-Vázquez, C., Cruz-Álvarez, Ó., & Vargas-Madríz, H. (2017). COMPUESTOS BIOACTIVOS Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE EN FRUTOS DE XOCOTUNA, TUNA Y XOCONOSTLE (*Opuntia* spp.). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Science*. <https://doi.org/10.4067/s0719-38902017005000704>

- Moreno Álvarez, M. J., García Pantaleón, D., Belén Camacho, D., Medina Martínez, C., & Muñoz Ojeda, N. (2008). *Análisis bromatológico de la tuna Opuntia elatior Miller (Cactaceae)*. Recuperado el 17 de diciembre de 2023, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182008000100004&lng=es&tlng=es
- Mosquera Vivas, E. E., Ayala Aponte, A. A., & Serna Cock, L. (2023). Importancia de la encapsulación de probióticos: gelificación iónica y coacervación compleja como técnicas prometedoras para uso alimentario*. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 22(1). <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v22.n1.2024.2223>
- Ochoa-Velasco, C. E., Palestina-Rivera, J., Ávila-Sosa, R., Navarro-Cruz, A. R., Vera-López, O., Lazcano-Hernández, M., & Hernández-Carranza, P. (2022). Use of green (*Opuntia megacantha*) and red (*Opuntia ficus-indica* L.) cactus pear peels for developing a supplement rich in antioxidants, fiber, and *Lactobacillus rhamnosus*. *Food Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.101421>
- Ogobuiro, I. (2023). *Physiology, gastrointestinal*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537103/>
- Ortiz-Romero, N., Ochoa-Martínez, L. A., González-Herrera, S. M., Rutiaga-Quiñones, O. M., & Gallegos-Infante, J. A. (2021). Avances en las investigaciones sobre la encapsulación mediante gelación iónica: una revisión sistemática. *TecnoLógicas*, 24(52), e1962. <https://doi.org/10.22430/22565337.1962>
- Otálora, M. C., Carriazo, J. G., Iturriaga, L., Osorio, C., & Nazareno, M. A. (2016). Encapsulating betalains from *Opuntia ficus-indica* fruits by ionic gelation: Pigment chemical stability during storage of beads. *Food Chemistry*, 202, 373-382. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.115>
- Özkan, 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>
- Pino, J. A., & Aragüez, Y. (2021). Conocimientos actuales acerca de la encapsulación de aceites esenciales. *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*. <https://doaj.org/article/fe2eaa641c0a4b0d9fb1ee031c5a6852>
- Piñol Jiménez, F. N., Ruiz Torres, J. F., Segura Fernández, N., Proaño Toapanta, P. S., & Sánchez Figueroa, E. M. (2020, March 20). *Ácidos biliares: actividad biológica y toxicología*. Piñol Jiménez | Revista Cubana De Investigaciones Biomédicas. <https://revibiomedica.sld.cu/index.php/ibi/article/view/260/789>

- Prieto-García, F., Filardo-Kerstup, S., Pérez-Cruz, E., Beltrán-Hernández, R., Román-Gutiérrez, A., & Méndez-Marzo, M. (2006). Caracterización física y química de semillas de opuntias (*Opuntia* spp.) cultivadas en el Estado de Hidalgo, México. *Bioagro*, 18(3), 163–169. <https://www.redalyc.org/pdf/857/85718305.pdf>
- Rajmohan, D., & Bellmer, D. D. (2019). Characterization of Spirulina-Alginate beads formed using ionic gelation. *International Journal of Food Science*, 2019, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2019/7101279>
- Ramírez Pérez, M. (2022). Estudio metabolómico de trece accesiones de tuna cultivadas en México. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/bitstream/231104/2868/1/AT26525.pdf>
- Ramos Domingo, M. C. (2020). Secreción ácida del estómago y sus alteraciones. Actuación nutricional. [Tesis de maestría, Universidad de Valladolid]. Consultada en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/42205/TFG-M-N2028.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Reque, P. M., & Brandelli, A. (2021). Encapsulation of Probiotics and Nutraceuticals: Applications in functional food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 114, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.022>
- Reyes Escogido, M. D. L., Barrón Vilchis, D., Zavala Martínez, L. G., & Angulo Romero, F. (2023). *Opuntia robusta* mucilage combined with alginate as encapsulation matrix for *Lactiplantibacillus plantarum*. *CyTA - Journal of Food*, 21(1), 126–132. <https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2168303>
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre-Rivera, J. R., & Hernández, H. M. (2005). NOTAS SISTEMÁTICAS Y UNA DESCRIPCIÓN DETALLADA DE *Opuntia ficus-indica* (L.) MILL. (CACTACEAE). *Agrociencia*, 39(4), 395-408. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30239404>
- Rivas Montoya, E. (2007). Desarrollo de un prototipo simulador del tracto gastrointestinal mediante reactores químicos automatizados [Tesis de doctorado, Universidad de Málaga]. Consultada en: https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/8635/TDR_RIVAS_MONTOYA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sáenz, C., Servicio de Tecnologías de Ingeniería Agrícola y Alimentaria [AGST], & Red Internacional de Cooperación Técnica del Nopal (FAO-CACTUSNET). (2006). *Utilización agroindustrial del nopal*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120301/Utilizacion-agroindustrial-del-nopal.pdf>

- Saiman, Y. (2023). *Generalidades sobre la función biliar*. Manual MSD Versión Para Profesionales. Recuperado el 6 de septiembre de 2024, de: <https://www.msdmanuals.com/es/professional/trastornos-hep%C3%A1ticos-y-biliares/trastornos-de-la-ves%C3%ADcula-biliar-y-los-conductos-biliares/generalidades-sobre-la-funci%C3%B3n-biliar?ruleredirectid=757>
- Santiago, L. G., & Castro, G. R. (2016). Novel technologies for the encapsulation of bioactive food compounds. *Current Opinion in Food Science*, 7, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2016.01.006>
- Scarano, P., Naviglio, D., Prigioniero, A., Tartaglia, M. C., Postiglione, A., Sciarrillo, R., & Guarino, C. (2020). Sustainability: Obtaining Natural Dyes from Waste Matrices Using the Prickly Pear Peels of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Agronomy*, 10(4), 528. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040528>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). *Arranca temporada de tuna con abasto garantizado y crecimiento en valor de producción*. gob.mx. Recuperado el 17 de diciembre de 2023, de: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/arranca-temporada-de-tuna-con-abasto-garantizado-y-crecimiento-en-valor-de-produccion?idiom=es#:~:text=Con%20una%20producci%C3%B3n%20anual%20que,resalt%C3%B3%20la%20Secretar%C3%ADa%20de%20Agricultura.&text=Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%2C%20a%2018%20de%20julio%20de%202023>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2015). TUNA: Un alimento para descubrir. In *Alimentos Argentinos - MAGyP* (Ficha N°41). Ministerio de Producción y Trabajo - Presidencia de la Nación. Recuperado el 14 de diciembre de 2023, de https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/HomeAlimentos/Nutricion/ficha_spdf/Ficha_41_Tuna.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Nopal, planta que documenta la historia de México*. gob.mx. Recuperado 16 de diciembre de 2023, de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/nopales-previo?idiom=es>
- Silva de Azevedo, E., & Zapata Noreña, C. P. (2021). External ionic gelation as a tool for the encapsulation and stability of betacyanins from *Bougainvillea glabrata* extract in a food model. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(9). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15637>
- Simmonds, M., & Preedy, V. (2015). *Nutritional composition of fruit cultivars*. Academic Press.
- Spruijt, E. (2023). Multiphase complex droplets. In *Elsevier eBooks* (pp. 173–204). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823967-4.00015-4>

- Staruss Brunell, R., & Jinich Brook, H. (1976). Fisiopatología de las sales biliares. *Revista de la Facultad de Medicina, México*, 24(7). <https://revistas.unam.mx/index.php/rfm/article/view/74140>
- Sumaya-Martínez, M. T., Diéguez, T. S., Del Socorro Cruz Cansino, N., García, E. A., & Sampedro, J. G. (2010). *INNOVACION DE PRODUCTOS DE ALTO VALOR AGREGADO a PARTIR DE LA TUNA MEXICANA*. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14114743013>
- Sun, X., Okagu, O. D., & Udenigwe, C. C. (2021). Encapsulation technology for protection and delivery of bioactive peptides. In Elsevier eBooks (pp. 331–356). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821389-6.00028-5>
- Taylor, J., & Knight, J. (2021). *Endocrine System 6: pancreas, stomach, small intestine and liver. Nursing Times*. <https://www.nursingtimes.net/clinical-archive/long-term-conditions/endocrine-system-6-pancreas-stomach-small-intestine-and-liver-27-09-2021/>
- Toprakçı, İ., Torun, M., & Şahin, S. (2023). Encapsulation of plum biowaste extract: design of alginate beads by response surface approach. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(3), 2676-2687. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01826-7>
- Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., De Lourdes Ballinas-Casarrubias, M., & Nevárez, G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal* Nopal: semi-desert plant with applications in pharmaceuticals, food and animal nutrition. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(5). https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/Tuna/19-aplicaciones.pdf
- Tosif, M. M., Najda, A., Bains, A., Kaushik, R., Dhull, S. B., Chawla, P., & Walasek-Janusz, M. (2021). A Comprehensive review on Plant-Derived Mucilage: characterization, functional properties, applications, and its utilization for nanocarrier fabrication. *Polymers*, 13(7), 1066. <https://doi.org/10.3390/polym13071066>
- Uyen, N. T. T., Hamid, Z. A. A., Tram, N. X. T., & Ahmad, N. (2020). Fabrication of alginate microspheres for drug delivery: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 1035-1046. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.233>
- Van Rooyen, B., De Wit, M., Osthoff, G., Van Niekerk, J., & Hugo, A. (2023). Microstructural and Mechanical Properties of Calcium-Treated Cactus Pear Mucilage (*Opuntia* spp.), Pectin and Alginate Single-Biopolymer Films. *Polymers*, 15(21), 4295. <https://doi.org/10.3390/polym15214295>
- Wongverawattanakul, C., Suklaew, P. O., Chusak, C., Adisakwattana, S., & Thilavech, T. (2022). Encapsulation of Mesona chinensis Benth Extract in Alginate Beads Enhances the Stability and Antioxidant Activity of

Polyphenols under Simulated Gastrointestinal Digestion. *Foods*, 11(15), 2378. <https://doi.org/10.3390/foods11152378>

- Xu, C., Ban, Q., Wang, W., Hou, J., & Jiang, Z. (2022). Novel nano-encapsulated probiotic agents: Encapsulate materials, delivery, and encapsulation systems. *Journal of Controlled Release*, 349, 184–205. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.06.061>
- Yahia, E. M., & Mondragón-Jacobo, C. (2011). Nutritional components and antioxidant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *Food Research International*, 44(7), 2311-2318. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.042>
- Zabot, G. L., Rodrigues, F. S., Ody, L. P., Tres, M. V., Herrera, E., Palacin-Baldeón, H., Córdova-Ramos, J. S., Best, I., & Olivera-Montenegro, L. (2022). Encapsulation of bioactive compounds for food and agricultural applications. *Polymers*, 14(19), 4194. <https://doi.org/10.3390/polym14194194>
- Zhang, Y., Chang, H., Shao, S., Zhao, L., Zhang, R., & Zhang, S. (2022). Anthocyanins from *Opuntia ficus-indica* Modulate Gut Microbiota Composition and Improve Short-Chain Fatty Acid Production. *Biology*, 11(10), 1505. <https://doi.org/10.3390/biology11101505>

3 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MICROESTRUCTURALES DE MICROCÁPSULAS DE ALGINATO-CÁSCARA DE TUNA (*Opuntia ficus-indica*)

3.1 Resumen

El procesamiento de la tuna genera subproductos no comestibles como la cáscara que representa entre el 33 y 55 % del peso total, siendo fuente importante de diversos compuestos antioxidantes, como los polifenoles, que son desaprovechados. Por lo tanto, para aprovechar sus compuestos bioactivos se elaboraron microcápsulas de alginato mediante gelificación iónica, incorporando diferentes concentraciones de harina de cáscara de tuna (0, 0.06, 0.12 y 0.25 % p/p) como material de pared para reforzar y mejorar la estructura de las microcápsulas. Se evaluaron los efectos de la incorporación de harina de cáscara de tuna sobre las características morfológicas y microestructurales de las microcápsulas mediante microscopía óptica y electrónica de barrido. Las microcápsulas obtenidas con 0.12 % p/p de harina mostraron un diámetro mayor respecto a 0.06 y 0.25 % p/p (1.42 ± 0.20 y 1.58 ± 0.26 mm) y esfericidad de 0.88 ± 0.09 . Los espectros de las microcápsulas caracterizadas mediante FTIR mostraron un aumento en el intervalo 3354.96 y 2153.15 cm^{-1} , lo cual evidenció la interacción entre los grupos O-H de los polifenoles y la matriz de alginato-cáscara de tuna. Con respecto al análisis de microestructura se observó que la geometría de las microcápsulas en todos los tratamientos fue ovalada y a medida que se incrementaba la concentración de HCT añadida, la superficie se volvía tortuosa y mayormente rugosa.

Palabras clave: Harina, cáscara, *Opuntia ficus-indica*, polifenoles, alginato, análisis FTIR, morfología, microestructura.

Tesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Guadalupe Somera Cisneros

Directora de Tesis: Dra. Landy Hernández Rodríguez

PHYSICOCHEMICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF ALGINATE-PRICKLY PEAR SHELL MICROCAPSULES (*Opuntia ficus-indica*)

Abstract

The processing of prickly pear generates inedible by-products such as the husk, which represents between 33 and 55 % of the total weight, being an essential source of various organic compounds and bioactive that are wasted. Therefore, to valorize its bioactive compounds, sodium alginate microcapsules were made by ionic gelation, incorporating different concentrations of prickly pear shell meal (0, 0.06, 0.12 and 0.25 % w/w) as wall material to reinforce and improve the structure of the microcapsules. The effects of the incorporation of prickly pear flour on the morphological and microstructural characteristics of microcapsules were evaluated by optical and scanning electron microscopy. The microcapsules obtained with 0.12 % w/w of flour showed a larger diameter compared to 0.06 and 0.25 % w/w (1.42 ± 0.20 and 1.58 ± 0.26 mm) and sphericity of 0.88 ± 0.09 . The spectra of the microcapsules characterized by FTIR showed an increase in the range 3354.96 and 2153.15 cm^{-1} , which evidenced the interaction between the O-H groups of the polyphenols and the matrix of sodium alginate-prickly pear shell meal. Regarding the microstructure analysis, it was observed that the geometry of the microcapsules in all treatments was oval. As the concentration of HCT added increased, the surface became tortuous and primarily rough.

Keywords: Flour, shell, *Opuntia ficus-indica*, polyphenols, sodium alginate, FTIR analysis, morphology, microstructure.

3.2 Introducción

La tuna es el fruto del nopal, originaria de regiones áridas, se extiende principalmente en México en las regiones de Estado de México, Hidalgo, Puebla y Zacatecas (Lira-Ortiz et al., 2014). Se consume mayormente fresca por lo que sólo es aprovechada la pulpa, descartando las semillas y la cáscara (fracción no comestible), representa entre el 33 a 55 % del peso total (Manzur-Valdespino et al., 2022), generando un problema ambiental debido a la mala disposición de estos subproductos.

En este contexto, las cáscaras de tuna han demostrado ser fuente de compuestos de interés, por ejemplo, un alto contenido de fibra soluble e insoluble (19.78 y 46.48 %) (Ochoa-Velasco et al., 2022), vitaminas, minerales, aminoácidos y polifenoles, los cuales poseen propiedades antioxidantes que pueden prevenir el daño oxidativo en las células y por lo tanto disminuir el riesgo de enfermedades crónicas (Sakar et al., 2023).

Sin embargo, la recuperación de los compuestos bioactivos, como antioxidantes, polifenoles y flavonoides, puede verse comprometida su estabilidad y biodisponibilidad debido a su fácil degradación por distintos factores, como su exposición a cambios de pH, temperaturas elevadas o cambios de oxígeno o luz, resultando en una disminución su efectividad, por lo que para prevenirlo, la encapsulación resulta una estrategia eficaz para proteger y mejorar su estabilidad.

En este sentido, la gelificación iónica es una técnica de encapsulación que recubre, con un material polimérico, los compuestos bioactivos. El material de pared utilizado en esta técnica es el alginato, el cual es goteado en una solución reticulante (cloruro de calcio) para producir las microcápsulas (Ortiz-Romero et al., 2021). No obstante, durante la polimerización del material de pared puede resultar una estructura porosa facilitando su permeabilidad, por este motivo, se han investigado diferentes materiales poliméricos para mejorar la estructura de las microcápsulas y, por ende, la protección de los compuestos encapsulados (Tsirigotis-Maniecka, 2020; Li et al., 2024).

Por lo tanto, en el presente estudio se consideró como material de pared la incorporación de harina de cáscara de tuna en diferentes concentraciones (0, 0.06, 0.12 y 0.25 % p/p) en la matriz de alginato. Las microcápsulas se caracterizaron mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), con el fin de identificar las interacciones químicas entre el alginato y la cáscara de tuna, así como la caracterización mediante microscopía óptica (diámetro y esfericidad) y microscopía electrónica de barrido (MEB) para evaluar el efecto de la incorporación de harina de cáscara de tuna en sus propiedades morfológicas y microestructurales.

Con base en lo expuesto, los objetivos de este proyecto fueron: (a) Obtener harina de cáscara de tuna y determinar su composición química, (b) elaborar las microcápsulas de alginato-cáscara de tuna, (c) caracterizar mediante FTIR las microcápsulas y sus materiales de pared y (d) evaluar las propiedades morfológicas y microestructurales de las microcápsulas de alginato- cáscara de tuna.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Ubicación del trabajo

El trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Tecnología de los Alimentos, ubicado en el Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

3.3.2 Materiales utilizados

Los frutos maduros de tunas se colectaron en el municipio de San Martín de las Pirámides, Teotihuacán, Estado de México, México (19°42'36''N, -98°49'14'' O), y fueron adquiridos por "Productora y comercializadora Pirámides Tuna". Los reactivos analíticos, cloruro de calcio (CaCl_2) y alginato de sodio se adquirieron de Química Meyer® (Química Suastes S.A. de C.V., CDMX, México). Todas las evaluaciones y determinaciones se llevaron a cabo por triplicado y los resultados se reportaron como media $\pm$ desviación estándar.

3.3.2.1 Acondicionamiento de la muestra

Las tunas colectadas se transportaron, desinfectaron y posteriormente se despulparon manualmente. Se pesaron el fruto fresco, la pulpa y la cáscara para obtener sus rendimientos. Posteriormente, las cáscaras se secaron a 45 ± 1 °C durante 48 horas en una estufa (modelo HCF-62, Riossa Digital, Ciudad de México, México), se molieron con un procesador de alimentos Nutri-Bullet® (modelo NBR-1240M, motor de 600W, velocidad 10 000 rpm, NutriBullet, México) durante 3 min y se pasaron a través de una malla No. 80 (Fabricantes de Suministros Industriales y Comerciales, St. Louis, Michigan, Estados Unidos), finalmente la harina de cáscara de tuna obtenida se almacenó a 4 °C.

3.3.2.2 Análisis químico proximal

Se realizó un análisis químico proximal de la harina de cáscara de tuna molida de acuerdo con los procedimientos estándar de la AOAC (2002), determinando el contenido de proteína por el método Kjeldahl (AOAC 954.01), extracto etéreo por el método de Soxhlet (AOAC 920.39), porcentaje de cenizas (AOAC 942.05) y fibra cruda (AOAC 991.42). El contenido de carbohidratos se calculó por la diferencia de los demás componentes en las harinas como se muestra en la Ecuación 1.

Carbohidratos (%) = $100 - \text{Proteína (\%)} - \text{Cenizas (\%)} - \text{Lípidos (\%)} - \text{Fibra (\%)} \dots$ **(Ec. 1)**

3.3.2.3 Elaboración de microcápsulas de alginato-cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*)

Las microcápsulas de alginato (A) y cáscara de tuna (HCT) se prepararon siguiendo el procedimiento descrito por Serrano-Casas et al. (2017) con ligeras modificaciones. Inicialmente se preparó una solución alginato al 2 % (p/v) junto con soluciones de harina de cáscara de tuna al 0.06, 0.12 y 0.25 % (p/v) y se mantuvieron en agitación magnética para después preparar el material de pared. Después, se tomó una muestra de la mezcla con una jeringa de 5 mL (aguja con 0.55 mm de diámetro) para después gotear en una solución de CaCl_2 al 4 % (p/v). Posteriormente, se dejaron reposar las cápsulas en la solución de CaCl_2 en

agitación magnética durante 45 minutos, se filtraron y enjuagaron 3 veces con agua destilada para finalmente almacenarlas a 4 °C hasta su caracterización.

3.3.3 Caracterización de las microcápsulas

3.3.3.1 Diámetro y esfericidad

Se calculó el diámetro de 30 cápsulas seleccionadas aleatoriamente utilizando el software de análisis de imágenes Imagen-Pro Plus versión 6.0 (Media Cybernetics, Silver Springs, MD, EE. UU.) a partir de las micrografías tomadas con una cámara digital Camedia C-3030 (Olympus Optical Co. LTD, Japón) a una magnificación de 4x (Sandoval Castilla, 2010).

3.3.3.2 Espectroscopía FT-IR

Los espectros de infrarrojo de las HCT y cápsulas a diferentes concentraciones se determinaron utilizando un espectrofotómetro (ALPHA II, Bruker, Bruker Optics Inc., Billerica, Massachusetts, EUA.). El espectro FTIR se registró en un espectrómetro. Las mediciones se realizaron a 25 °C y con el registro de 4000 a 400 cm^{-1} a una velocidad de barrido de 40 barridos con una resolución espectral de 4 cm^{-1} (Gheribi et al., 2019).

3.3.3.3 Microestructura

Para llevar a cabo el análisis de microestructura se siguió la metodología de Sandoval-Castilla et al. (2010) con ligeras modificaciones. Se tomaron 0.3 g de cápsulas y fueron fijadas en una solución de glutaraldehído al 2 % (v/v) en tampón fosfato (0.1 M, pH 7.2) durante 6 h. Posteriormente, se deshidrataron en disoluciones de etanol de concentraciones crecientes (50, 60, 70, 80, 90 y 100 %), permaneciendo 30 min en cada concentración y posteriormente en etanol absoluto durante 24 horas. Luego, las muestras se secaron a punto crítico en un CPA II Technics Critical Point Dryer (Tousimis, Rockville, MD, EUA). Cada cápsula se fracturó con el objetivo de exponer la estructura interior; luego se montaron en soportes de aluminio y finalmente se cubrieron con una capa fina de oro en un Fine Coat Ion Sputter JFC 1100 (Jeol Ltd., Akishima, Japón). Las

cápsulas fracturadas se observaron en un microscopio Electrónico de Barrido (MEB) (JEOL Scanning Electron Microscope JMS-035, Jeol Ltd., Akishima, Japón), operado a 20 kV, a una amplificación de 1 000 x para examinar la morfología superficial e interna de la capsula.

3.3.4 Análisis estadístico

Todos las mediciones se realizaron por triplicado, expresando los resultados como media $\pm$ desviación estándar. Los datos se sometieron a análisis de varianza, estableciendo una significancia en $p \leq 0.05$ y la comparación entre medias se determinó mediante la prueba de Tukey. El análisis de datos se realizó en el software Minitab 18 (Minitab Inc., Pensilvania, EUA).

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Composición química proximal de la harina de cáscara de tuna (CT)

Con los resultados obtenidos a partir del análisis químico proximal de la harina de cáscara de tuna, se proporciona información valiosa sobre su composición química y nutricional para identificar las posibles aplicaciones en alimentos. Estos valores se muestran en el cuadro 2, mostrando que valores medios con diferentes superíndices dentro de una fila son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

El contenido de proteína en cáscara de tuna mostró ser mayor que lo reportado por Borchani et al. (2022) con un contenido de 2.73 % menor al reportado por Bouzazi et al. (2020) y Parafati et al. (2020) de 3.3 y 3.58 % respectivamente, mientras que el valor presentado por El-Beltagi et al. (2023) fue mayor en un 3.69 %. En cuanto al contenido de cenizas, Borchani et al. (2022) evidenciaron valores de 18.15 %, mencionando que las cáscaras de tuna variedad “Cristalina” representan una fuente importante de minerales como calcio y potasio. El valor reportado por Manzur-Valdespino et al. (2022) fue menor a los resultados reportados (3.05 %); esta diferencia se ve influenciada por el suelo y el clima de la región en donde se cultiva la planta.

El contenido de humedad en cáscara de tuna presentó un valor similar al encontrado por Arafa et al. (2023) (4.27 %) y menor al reportado por Ettalibi et al. (2023) (16.72 %). Esta variación se puede deber al método de secado empleado.

El contenido total de carbohidratos en harina de cáscara de tuna ha sido reportado por diversos autores como El-Beltagi et al. (2020) quienes reportaron valores en carbohidratos de 49.93 %, comparable con lo obtenido en la presente investigación, sin embargo, Parafati et al. (2020) y Valero-Galván et al. (2021) presentaron el mayor contenido de carbohidratos (73.41 y 65.59 %, respectivamente), demostrando que la cáscara es una fuente importante de fibra que contribuir a una salud intestinal.

En general, estas diferencias encontradas en la composición química proximal podrían estar influenciadas por factores como la variedad de la tuna, el grado de madurez, las condiciones de cultivo, región y tipo de suelo donde fueron cultivadas.

Cuadro 2 Contenido químico proximal de harina de cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*)

Parámetro ^z	(%) ^y
Humedad	4.35 ± 0.03
Proteína cruda	5.90 ± 0.01
Extracto etéreo	1.83 ± 0.01
Cenizas	18.39 ± 0.09
Fibra cruda	13.61 ± 0.18
Carbohidratos*	55.92 ± 0.03

*Los carbohidratos fueron calculados por la diferencia de la suma de los componentes - 100.

z: Media ± desviación estándar

y: Base seca

3.4.2 Diámetro y esfericidad

El diámetro de las microcápsulas en el tratamiento de control fue menor al reportado por Zhang et al. (2016), donde las microcápsulas mostraron un diámetro entre 2 y 3 mm. Sin embargo, Ćujić et al. (2016) reportaron un diámetro significativamente menor (0.16 mm) al del presente estudio. Esta variación en el tamaño puede atribuirse a la naturaleza de los polisacáridos presentes en la harina de cáscara de tuna. Diaz-Vela et al. (2013), mencionan que la harina al presentar un mayor contenido de fibras solubles (pectina y mucílago), estas se integran homogéneamente con el alginato, reduciendo así el tamaño de las microcápsulas.

La esfericidad de las microcápsulas se calculó a partir de los diámetros mayor y menor de cada tratamiento, donde un valor cercano a 1 indica una forma perfectamente esférica. En la figura 7, se puede observar que, al aumentar la concentración de harina en las microcápsulas, su esfericidad disminuye, mostrando formas tanto esféricas como ligeramente ovaladas, en forma de “lágrima” o “pera” (Sandoval-Castilla et al. 2010; Toprakçı et al. 2022). Los biopolímeros que componen la pared de las microcápsulas definen la geometría resultante de estas. Dadwal et al. (2021), mencionan que la esfericidad puede verse afectada por la fuerza ejercida durante la extrusión debido a la viscosidad de las soluciones. En este estudio, se observó que las microcápsulas en los tratamiento CT_{0.12} y CT_{0.25} fueron ligeramente ovaladas, reflejado lo anterior en sus valores de esfericidad.

Algunos autores han reportado que una estructura mayormente esférica se debe a la reticulación del alginato por los iones calcio, que sucede de manera más rápida y eficiente (Afzaal et al. 2020; Sharifi et al. 2023). Además, las condiciones de extrusión que incluyen la concentración de la solución de cloruro de calcio, los polímeros que actúan como material de pared, así como el diámetro de la aguja y distancia de goteo, son factores que pueden influir en el tamaño de las microcápsulas.

Cuadro 3 Valores de las características morfológicas de las microcápsulas

Tratamiento	Diámetro ^z (mm)	Esfericidad (0-1)
CT ₀	1.85 ± 0.65 ^d	0.91 ± 0.08 ^d
CT _{0.06}	1.42 ± 0.20 ^a	0.90 ± 0.08 ^c
CT _{0.12}	1.67 ± 0.21 ^c	0.88 ± 0.09 ^b
CT _{0.25}	1.58 ± 0.26 ^b	0.86 ± 0.08 ^a

^zValores de medias ± desviación estándar con diferentes superíndices en la misma fila (^{a, b, c, d}) indican que difieren significativamente ($p \leq 0.05$) entre variaciones de cápsulas.

CT: Concentración de harina de cáscara de tuna. CT₀: control; CT_{0.06}, CT_{0.12} y CT_{0.25}, microcápsulas de alginato conteniendo 0.25 %, 0.12 % y 0.06 % p/p de harina de cáscara de tuna, respectivamente.

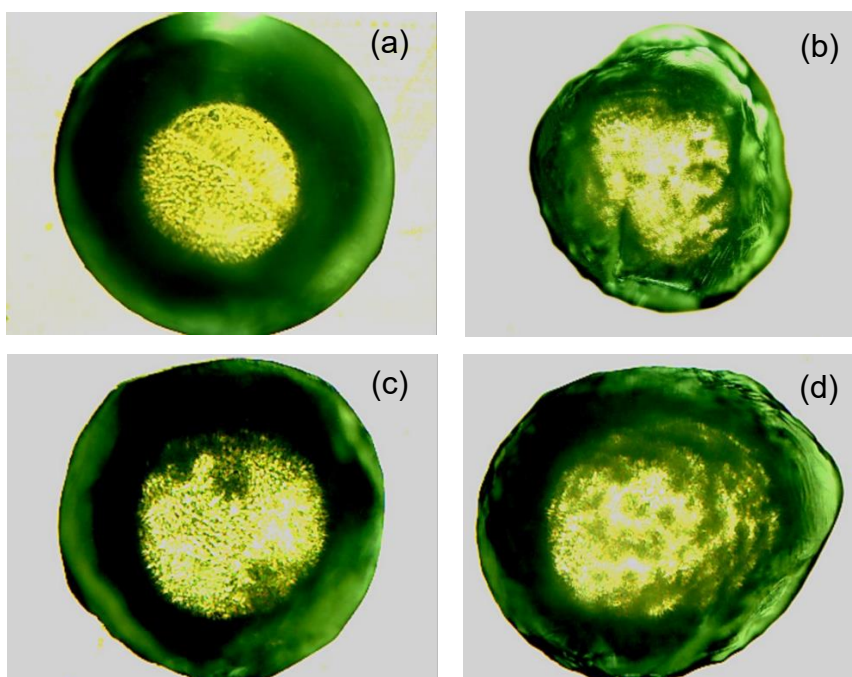


Figura 7 Micrografías representativas de las variaciones de cápsulas tomadas en un microscopio óptico. (a) CT₀; (b) CT_{0.06}; (c) CT_{0.12} y (d) CT_{0.25}.

3.4.3 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía (FTIR) es una técnica analítica que permite identificar y caracterizar la estructura química de diversos componentes químicos. En el contexto de la encapsulación, los estudios de FTIR nos muestran las

interacciones entre el polímero encapsulante y los iones o biopolímeros que lo componen.

En la Figura 8 se pueden identificar los grupos funcionales presentes en los componentes individuales y totales de las microcápsulas mediante la identificación de las vibraciones de los enlaces químicos. El alginato presentó espectros con una banda principal de estiramiento de 3000 a 3500 cm^{-1} , estiramiento de los enlaces O-H, perteneciente a la estructura del alginato, además, presentaron bandas entre 1419.43 y 1298.48 cm^{-1} , atribuidos a iones carboxilato, seguido de C-O entre 1050.20 y 828 cm^{-1} correspondiente al alginato puro, similar a la literatura reportada por Belščak-Cvitanović et al. (2017) y Dadwal et al. (2021).

El espectro de harina de cáscara de tuna exhibió una banda amplia correspondiente al estiramiento del O-H en el grupo carboxílico a 3235 cm^{-1} , lo cual indica la presencia de grupos alcohol y fenol (Hashem et al. 2022); los enlaces alifáticos de estiramiento C-H se muestran en la banda 2904 cm^{-1} (Al-Zahrani et al. 2023). Las bandas presentadas a 1613 cm^{-1} se deben a la presencia de enlaces C=O en el ácido carboxílico; la banda presentada a 1310 cm^{-1} se debió al estiramiento del C-O en ésteres y éteres, mostrando una banda C-O-C a 1018 cm^{-1} (Abdelkarim et al., 2017).

Los espectros de los diferentes tratamientos mostraron un cambio en la vibración de los enlaces químicos presentes en la muestra, esto causado por las interacciones intermoleculares entre los iones calcio (Ca^{2+}) y el alginato. Una amplia banda principal de O-H con una vibración de estiramiento entre 3354.96 y 2153.15 cm^{-1} sugiere que existe una mayor interacción intermolecular debido a la presencia de iones calcio con el alginato para la formación de las microcápsulas (Gorbunova et al., 2018).

El espectro mostrado en 1616.28 cm^{-1} es atribuido a la presencia de enlaces C=O de grupos carboxilato (Abdelkarim et al., 2017). Finalmente, se observó una fuerte asimetría en el estiramiento de COO^- a 1428.49 cm^{-1} y la intensidad del pico disminuye en el tratamiento de la gráfica (c) (1027.74 cm^{-1}), posiblemente

debido a la presencia de un enlace entre el grupo COO^- del alginato y el Ca^{2+} (Gorbunova et al., 2018).

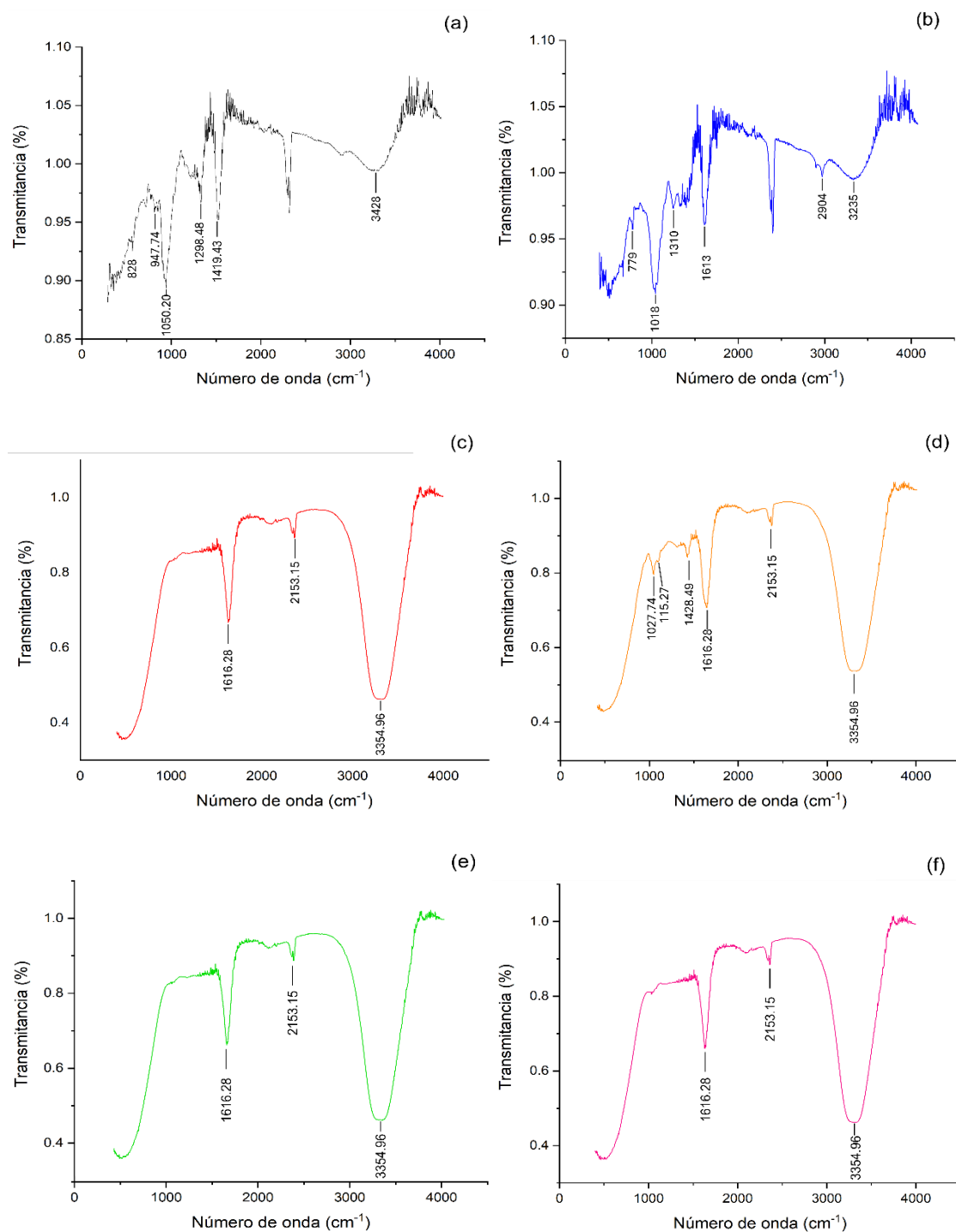


Figura 8 Espectro FTIR de alginato (A) (a), harina de cáscara de tuna (HCT) (b) y los tratamientos de las microcápsulas de alginato y cáscara de tuna (CT) a diferentes concentraciones. CT0, control (c); CT0.06, cáscara de tuna al 0.06, cáscara de tuna al 0.06 % (d); CT_{0.12}, cáscara de tuna al 0.12 % (e); CT_{0.25}, cáscara de tuna al 0.25 % (f).

3.4.4 Microestructura de las microcápsulas de alginato-cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*)

La morfología superficial de las microcápsulas se observó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). En la Figura 1 (A3), se muestran las micrografías obtenidas para CT₀, se observa una superficie suave con ligeras rugosidades, además de presentar una geometría ovalada con hundimientos y protuberancias. Por otra parte, la superficie de las microcápsulas adicionadas con cáscara de tuna (HCT) mostró cavidades, fisuras, superficies rugosas y bordes irregulares (Fig. 1, B-D 3).

En CT_{0.06} (Fig. 1, B3) se muestra un colapso y deformación en la geometría de la microcápsula, sin embargo, se reduce con la adición de HCT (Fig. 1, C y D 2) (Isailovi et al., 2012). Es posible observar que la geometría de las microcápsulas en todos los tratamientos fue ovalada y a medida que se incrementaba la concentración de HCT añadida, la superficie se volvía tortuosa y mayormente rugosa (Fig. 1, D3). Este comportamiento puede a diversos factores dentro del proceso de encapsulación, como la viscosidad y proporción de los materiales de pared en las formulaciones, el caudal de la solución polimérica, diámetro de la aguja y la concentración de la solución de reticulación (Ca²⁺) (Sandoval-Castilla et al. 2010; Arriola et al., 2019; Martinović et al., 2023). Asimismo, Kuçuk et al. (2024) mencionan que la pérdida de una geometría esférica en las microcápsulas se puede deber a la ruptura de la red agua-gel que se produce durante el proceso de secado, provocando también un cambio en su superficie, pasando de lisa a rugosa.

Las micrografías presentadas en 500x mostraron que la adición de 0.25 % (p/p) de HCT tendieron a mostrar cavidades, mientras que para la adición de HCT al 0.12 % p/p se mostró una superficie conformada por ligeras porosidades. Dallabona et al. (2020) mencionan los métodos de secado o deshidratación de las microcápsulas pueden provocar grietas en la superficie, lo que puede aumentar la inestabilidad de su microestructura. Estos hallazgos muestran que la suavidad de la superficie aumenta por la interacción entre los iones de calcio con la superficie de alginato, sugiriendo que la HCT ocupa un espacio en las cavidades de la matriz,

provocando así la reducción de la porosidad y por lo tanto estabiliza la microestructura de la microcápsula (Pasukamonset et al., 2016).

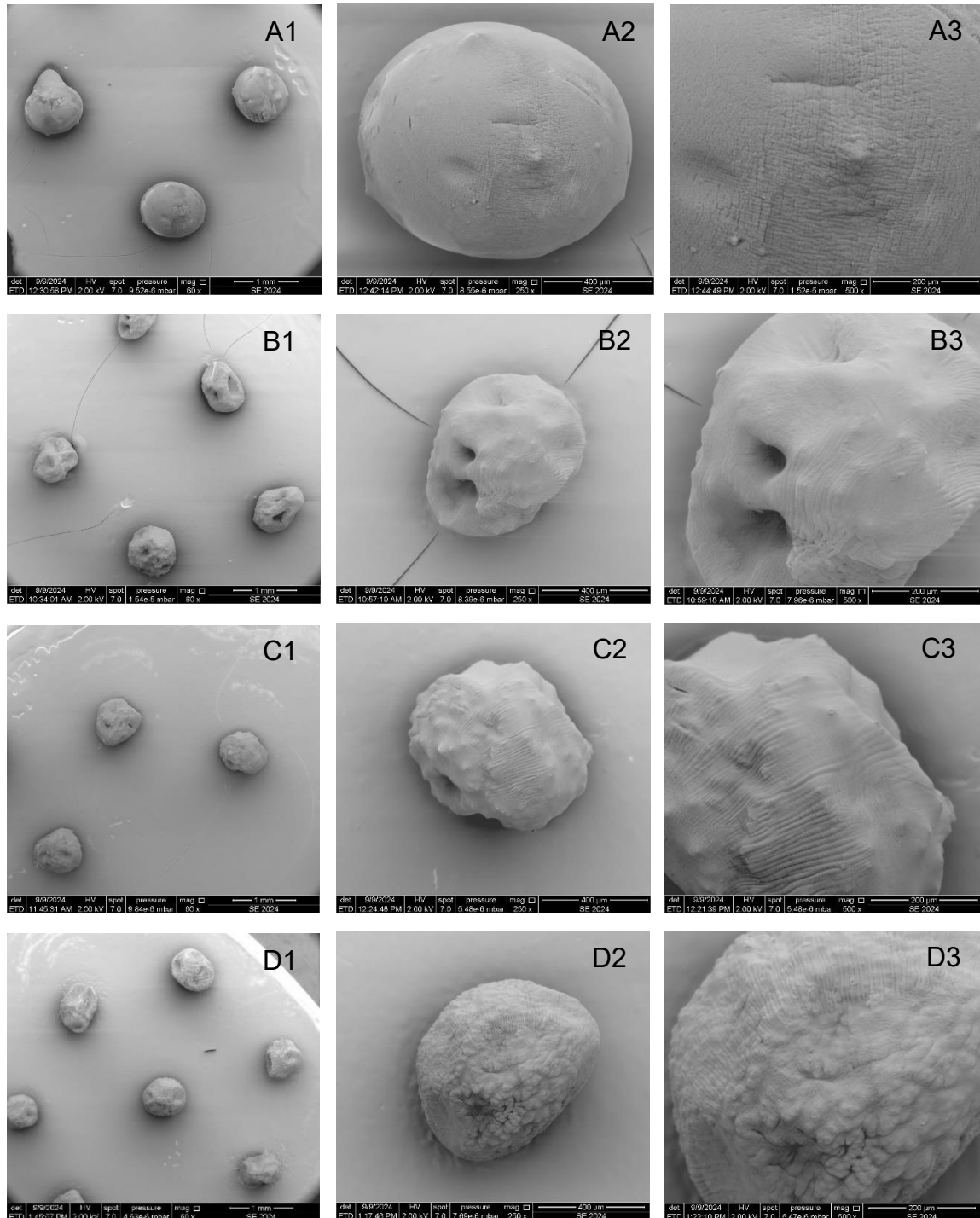


Figura 9 Micrografías MEB de microcápsulas de alginato-cáscara de tuna (CT: Concentración de harina de cáscara de tuna. CT₀: control (A); CT_{0.06} (B), CT_{0.12} (C) y CT_{0.25} (D), microcápsulas de alginato conteniendo 0.06, 0.12 y 0.25 % p/p de harina de cáscara de tuna, respectivamente. Aumento del panel izquierdo de 60x (1); Aumento del panel central de 250x (2); Aumento del panel derecho de 500x (3).

3.5 Conclusiones

Los resultados de este estudio mostraron que la harina producida a partir de cáscara de tuna representa una excelente fuente de carbohidratos, proteínas, cenizas y fibra cruda (55.92 ± 0.03 , 5.90 ± 0.01 , 18.39 ± 0.09 y 13.61 ± 0.18 , respectivamente). La adición de harina de cáscara de tuna influyó en las características morfológicas de las microcápsulas, mostrando mayor esfericidad (0.88 ± 0.09) para CT_{0.12}. El análisis FTIR evidenció, mediante el aumento en el intervalo 3354.96 cm^{-1} y 2153.15 cm^{-1} , la interacción entre los grupos O-H de los polifenoles y la matriz de alginato. A través de las micrografías obtenidas por el análisis de MEB, se observó que la superficie de los tratamientos adicionados con harina de cáscara de tuna se volvía tortuosa y mayormente rugosa conforme aumentaba la concentración de harina de cáscara de tuna añadida.

3.6 Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado durante los dos años de estudio, al Departamento de Preparatoria Agrícola y al Departamento de Ingeniería Agroindustrial por facilitar los materiales requeridos en esa investigación, al Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal (LANISAF) y al Laboratorio de Síntesis y Caracterización de Materiales Avanzados y Tecnología para Aplicaciones de Energía y Medioambiente (MATEA) por el equipo y apoyo técnico para el análisis microestructural y la caracterización espectroscópica por FTIR de las microcápsulas de AS-HCT.

3.7 Literatura citada

- Abdelkarim, S., Mohammed, H., & Nouredine, B. (2017). Sorption of Methylene Blue Dye from Aqueous Solution Using an Agricultural Waste. Trends in Green Chemistry, 03(01). <https://doi.org/10.21767/2471-9889.100017>
- Afzaal, M., Saeed, F., Saeed, M., Azam, M., Hussain, S., Mohamed, A. A., Alamri, M. S., & Anjum, F. M. (2020). Survival and stability of free and encapsulated probiotic bacteria under simulated gastrointestinal and thermal conditions. International Journal of Food Properties, 23(1), 1899–1912. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1826513>

- Alexandre, E. M. C., Coelho, M. C., Ozcan, K., Pinto, C. A., Teixeira, J. A., Saraiva, J. A., & Pintado, M. (2021). Emergent Technologies for the Extraction of Antioxidants from Prickly Pear Peel and Their Antimicrobial Activity. *Foods*, 10(3), 570. <https://doi.org/10.3390/foods10030570>
- Alu'datt, M. H., Alrosan, M., Gammoh, S., Tranchant, C. C., Alhamad, M. N., Rababah, T., Zghoul, R., Alzoubi, H., Ghatasheh, S., Ghazlan, K., & Tan, T. (2022). Encapsulation-based technologies for bioactive compounds and their application in the food industry: A roadmap for food-derived functional and health-promoting ingredients. *Food Bioscience*, 50, 101971. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101971>
- Al-Zahrani, F. a. M., Al-Shehri, B. M., & El-Shishtawy, R. M. (2023). Removal of Dye from Aqueous Solution Using Ectodermis of Prickly Pear Fruits-Based Bioadsorbent. *Sustainability*, 15(6), 4700. <https://doi.org/10.3390/su15064700>
- Arafa, S., Badawy, W., El-Bana, M., & Mohamed, A. (2023). Utilization of Prickly Pear By-Products to improve the nutritional value of balady bread. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 14(4), 99–107. <https://doi.org/10.21608/jfds.2023.200826.1104>
- Belščak-Cvitanović, A., Jurić, S., Đorđević, V., Barišić, L., Komes, D., Ježek, D., Bugarski, B., & Nedović, V. (2017). Chemometric evaluation of binary mixtures of alginate and polysaccharide biopolymers as carriers for microencapsulation of green tea polyphenols. *International Journal of Food Properties*, 20(9), 1971–1986. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1225762>
- Borchani, M., Masmoudi, M., Amira, A. B., Besbes, S., Blecker, C., & Attia, H. (2022). Physicochemical, thermal and rheological properties of prickly pear peel flours and fibers. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(5), 3557-3567. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01467-2>
- Bouazizi, S., Montevecchi, G., Antonelli, A., & Hamdi, M. (2020). Effects of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) peel flour as an innovative ingredient in biscuits formulation. *LWT*, 124, 109155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109155>
- Ćujić, N., Trifković, K., Bugarski, B., Ibrić, S., Pljevljakušić, D., & Šavikin, K. (2016). Chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) extract loaded in alginate and alginate/inulin system. *Industrial Crops and Products*, 86, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.045>
- Dadwal, V., Joshi, R., & Gupta, M. (2021). Formulation, characterization and in vitro digestion of polysaccharide reinforced Ca-alginate microbeads encapsulating *Citrus medica* L. phenolics. *LWT*, 152, 112290. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112290>

- Diaz-Vela, J., Totosa, A., Cruz-Guerrero, A. E., & De Lourdes Pérez-Chabela, M. (2013). In vitro evaluation of the fermentation of added-value agroindustrial by-products: cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.) peel and pineapple (*Ananas comosus*) peel as functional ingredients. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(7), 1460–1467. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12113>
- El-Beltagi, H. S., Ahmed, A., Mohamed, H. I., Al-Otaibi, H. H., Ramadan, K. M., & Elkhatry, H. O. (2023). Utilization of prickly pear peels flour as a natural source of minerals, dietary fiber and antioxidants: Effect on cakes production. *Agronomy*, 13(2), 439. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020439>
- El-Hassan, A. A., El-Montaleb, H. A., & Rabee, L. (2022). Utilization of prickly pear peels as antioxidants, dietary fiber and functional ingredients for production of a healthy yoghurt drink. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 13(12), 193–202. <https://doi.org/10.21608/jfds.2022.179425.1086>
- Ettalibi, F., Elmahdaoui, H., Amzil, J., Gadhi, C., & Harrak, H. (2020). Drying impact on physicochemical and biochemical criteria of prickly pear fruit peels of three varieties of *Opuntia* spp. *Materials Today Proceedings*, 27, 3243–3248. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.726>
- Fabela-Morón, M. F., Pérez-Ruiz, R. V., Ruiz-Hernández, R., Arce-Vázquez, M. B., Aguilar-Toalá, J. E., Jiménez-Guzmán, J., & García-Garibay, J. M. (2022). Encapsulation of bioactive compounds of food interest: applications, current advances, challenges, and opportunities. *Agro Productividad*, 15(11), 31–43. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i10.2407>
- Gheribi, R., Habibi, Y., & Khwaldia, K. (2019). Prickly pear peels as a valuable resource of added-value polysaccharide: Study of structural, functional and film forming properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.228>
- Gorbunova, N., Bannikova, A., Evteev, A., Evdokimov, I., & Kasapis, S. (2018). Alginate-based encapsulation of extracts from beta Vulgaris cv. beet greens: Stability and controlled release under simulated gastrointestinal conditions. *LWT*, 93, 442–449. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.075>
- Hashem, A. H., Selim, T. A., Alruhaili, M. H., Selim, S., Alkhalifah, D. H. M., Jaouni, S. K. A., & Salem, S. S. (2022). Unveiling antimicrobial and insecticidal activities of biosynthesized selenium nanoparticles using prickly pear peel waste. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(3), 112. <https://doi.org/10.3390/jfb13030112>
- Holkovičová, T., Kohajdová, Z., Lauková, M., & Minarovičová, L. (2023). Utilization of *Opuntia* as an alternative ingredient in value added bread and pasta products. *Acta Chimica Slovaca*, 16(1), 47–61. <https://doi.org/10.2478/acs-2023-0005>

- Li, Y., Zhang, H., Zhao, Y., Lv, H., & Liu, K. (2024). Encapsulation and characterization of proanthocyanidin microcapsules by sodium alginate and carboxymethyl cellulose. *Foods*, 13(5), 740. <https://doi.org/10.3390/foods13050740>
- Lira-Ortiz, A. L., Reséndiz-Vega, F., Ríos-Leal, E., Contreras-Esquivel, J. C., Chavarría-Hernández, N., Vargas-Torres, A., & Rodríguez-Hernández, A. I. (2014). Pectins from waste of prickly pear fruits (*Opuntia albicarpa* Scheinvar 'Reyna'): Chemical and rheological properties. *Food Hydrocolloids*, 37, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.10.018>
- Manzur-Valdespino, S., Arias-Rico, J., Ramírez-Moreno, E., De Cortes Sánchez-Mata, M., Jaramillo-Morales, O. A., Angel-García, J., Zafra-Rojas, Q. Y., Barrera-Gálvez, R., & Del Socorro Cruz-Cansino, N. (2022). Applications and Pharmacological Properties of Cactus Pear (*Opuntia* spp.) Peel: A Review. *Life*, 12(11), 1903. <https://doi.org/10.3390/life12111903>
- Ochoa-Velasco, C. E., Palestina-Rivera, J., Ávila-Sosa, R., Navarro-Cruz, A. R., Vera-López, O., Lazcano-Hernández, M., & Hernández-Carranza, P. (2022). Use of green (*Opuntia megacantha*) and red (*Opuntia ficus-indica* L.) cactus pear peels for developing a supplement rich in antioxidants, fiber, and *Lactobacillus rhamnosus*. *Food Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.101421>
- Ortiz-Romero, N., Ochoa-Martínez, L. A., González-Herrera, S. M., Rutiaga-Quñones, O. M., & Gallegos-Infante, J. A. (2021). Avances en las investigaciones sobre la encapsulación mediante gelación iónica: una revisión sistemática. *TecnoLógicas*, 24(52), e1962. <https://doi.org/10.22430/22565337.1962>
- Parafati, L., Restuccia, C., Palmeri, R., Fallico, B., & Arena, E. (2020). Characterization of prickly pear peel flour as a bioactive and functional ingredient in bread preparation. *Foods*, 9(9), 1189. <https://doi.org/10.3390/foods9091189>
- Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., García-Galindo, H., Alvarez-Ramírez, J., & Vernon-Carter, E. (2010). Textural properties of alginate–pectin beads and survivability of entrapped *Lb. casei* in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt. *Food Research International*, 43(1), 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.010>
- Serrano-Casas, V., Pérez-Chabela, M. L., Cortés-Barberena, E., & Totosaús, A. (2017). Improvement of lactic acid bacteria viability in acid conditions employing agroindustrial co-products as prebiotic on alginate ionotropic gel matrix co-encapsulation. *Journal of Functional Foods*, 38, 293–297. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.048>
- Sharifi, Z., Javan, A. J., Hesarinejad, M. A., & Parsaeimehr, M. (2023). Application of carrot waste extract and *Lactobacillus plantarum* in *Alyssum homalocarpum* seed gum-alginate beads to create a functional synbiotic

yogurt. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1).
<https://doi.org/10.1186/s40538-022-00377-1>

- Toprakçı, İ., Torun, M., & Şahin, S. (2022). Development of an Encapsulation Method for Trapping the Active Materials from Sour Cherry Biowaste in Alginate Microcapsules. *Foods*, 12(1), 130.
<https://doi.org/10.3390/foods12010130>
- Tsirigotis-Maniecka, M. (2020). Alginate-, carboxymethyl cellulose-, and K-Carrageenan-Based microparticles as storage vehicles for cranberry extract. *Molecules*, 25(17), 3998.
<https://doi.org/10.3390/molecules25173998>
- Valero-Galván, J., González-Fernández, R., Sigala-Hernández, A., Núñez-Gastélum, J. A., Ruiz-May, E., Rodrigo-García, J., Larqué-Saavedra, A., & Del Rocío Martínez-Ruiz, N. (2021). Sensory attributes, physicochemical and antioxidant characteristics, and protein profile of wild prickly pear fruits (*O. macrocentra* Engelm., *O. phaeacantha* Engelm., and *O. engelmannii* Salm-Dyck ex Engelm.) and commercial prickly pear fruits (*O. ficus-indica* (L.) Mill.). *Food Research International*, 140, 109909.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109909>
- Zhang, X., Zhao, Y., Wu, X., Liu, J., Zhang, Y., Shi, Q., & Fang, Z. (2021). Ultrasonic-assisted extraction, calcium alginate encapsulation and storage stability of mulberry pomace phenolics. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 15(5), 4517–4529. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01021-6>

4 PROPIEDADES ANTIOXIDANTES DE MICROCÁPSULAS ALGINATO-CÁSCARA DE TUNA (*Opuntia ficus-indica*) SOMETIDAS A CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y GASTROINTESTINALES SIMULADAS

4.1 Resumen

La encapsulación de compuestos bioactivos mediante gelificación iónica puede permitir la obtención de microcápsulas reforzadas con biopolímeros incluidos en la harina de cáscara de tuna, con el fin de estabilizar y proteger compuestos bioactivos que se encuentran en la harina durante condiciones de almacenamiento y durante su exposición a condiciones gastrointestinales simuladas. En este estudio se evaluaron el contenido fenólico total (CFT) y la capacidad antioxidante mediante ensayos de DPPH y ABTS en las microcápsulas. Durante el periodo de almacenamiento al día 7, las microcápsulas con 0.12 y 0.25 % p/p de harina de cáscara de tuna (HCT) añadida, presentaron el mayor CFT (16.38 ± 0.06 y 16.47 ± 0.03 mg EAG/g), porcentaje de inhibición en el ensayo DPPH (76.09 ± 0.21 y 88.96 ± 0.53 %) y en ABTS (35.42 ± 0.14 y 70.31 ± 0.45 %). La actividad antioxidante después de ser sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas durante la fase intestinal, las microcápsulas con 0.25 % p/p de HCT mostraron un mayor CFT (16.73 ± 0.02 mg EAG/g), porcentaje de inhibición para DPPH (76.21 ± 0.60 %) y ABTS (74.15 ± 1.07 %). Por lo tanto, se demostró que la adición de HCT a la matriz de alginato protege los compuestos antioxidantes hasta su liberación en sales biliares. Este estudio establece una guía para la aplicación de harina de cáscara de tuna como material de pared en las microcápsulas y el aprovechamiento de sus compuestos antioxidantes beneficiosos para la salud.

Palabras clave: microcápsulas, harina, cáscara, *Opuntia ficus-indica*, propiedades antioxidantes, tiempo de almacenamiento, sistema gastrointestinal simulado.

Tesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Guadalupe Somera Cisneros

Directora de Tesis: Dra. Landy Hernández Rodríguez

ANTIOXIDANT PROPERTIES OF ALGINATE-PRICKLY PEAR SHELL (*Opuntia ficus-indica*) MICROCAPSULES SUBJECTED TO SIMULATED STORAGE AND GASTROINTESTINAL CONDITIONS

Abstract

The encapsulation of bioactive compounds by ionic gelation can allow the obtaining of microcapsules reinforced with biopolymers included in prickly pear flour to stabilize and protect bioactive compounds found in the meal during storage conditions and its exposure to simulated gastrointestinal conditions. This study evaluated total phenolic content (TFC) and antioxidant capacity by DPPH and ABTS assays in microcapsules. During the storage period to day 7, microcapsules with 0.12 and 0.25 % w/w of prickly pear flour (HCT) added presented the highest CFT (16.38 ± 0.06 and 16.47 ± 0.03 mg EAG/g), percentage of inhibition in the DPPH assay (76.09 ± 0.21 and 88.96 ± 0.53 %) and in ABTS (35.42 ± 0.14 and 70.31 ± 0.45 %). Antioxidant activity after being subjected to simulated gastrointestinal conditions during the intestinal phase, microcapsules with 0.25 % w/w HCT showed higher CFT (16.73 ± 0.02 mg EAG/g), percentage inhibition for DPPH (76.21 ± 0.60 %), and ABTS (74.15 ± 1.07 %). Therefore, adding HCT to the alginate matrix was shown to protect the antioxidant compounds until their release into bile salts. This study establishes a guideline for applying prickly pear flour as a wall material in microcapsules and using its antioxidant compounds that are beneficial to health.

Keywords: microcapsules, flour, peel, *Opuntia ficus-indica*, antioxidant properties, storage time, simulated gastrointestinal system.

Thesis. "Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo" ("al UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO")

Author: Guadalupe Somera Cisneros

Advisor: Dra. Landy Hernández Rodríguez

4.2 Introducción

Dentro de la industria de los alimentos se ha incrementado la demanda de productos que cumplan con propiedades nutricionales, creando estrategias para enriquecerlos a través de compuestos bioactivos extraídos a partir de diversos subproductos agrícolas, entre ellos, la cáscara de tuna (Panza et al., 2022). En diversos estudios se ha propuesto la valorización de cáscaras de tuna por su alto contenido de polifenoles (17.1 ± 0.9 mg GAE/g) asociado con compuestos como el ácido ascórbico y fibra dietética, entre otros, los cuales muestran efectos beneficiosos en la disminución de riesgo de cáncer, enfermedades cardiovasculares, coronarias, diabetes tipo II y mejora de la salud intestinal (Mahloko et al., 2019; Parafati et al., 2020).

La encapsulación de compuestos fenólicos mediante gelificación iónica ha sido una técnica útil para su protección, incrementando su estabilidad en condiciones de almacenamiento, o bien sometidas a condiciones gastrointestinales (Flammini et al., 2020). En esta técnica el alginato actúa como material de pared para producir las microcápsulas y recubrir los compuestos bioactivos, sin embargo una de las limitaciones del alginato es su alta porosidad, implicando la adición de materiales de pared para reforzar las microcápsulas y así aumentar la biodisponibilidad de los compuestos contenidos (Madziva et al., 2005; Toprakçi et al., 2022).

Por lo tanto, en el presente estudio se evaluó el contenido fenólico total (CFT), mediante el ensayo de Folin-Ciocalteu y la capacidad antioxidante mediante ensayos de eliminación de radicales DPPH y ABTS en las microcápsulas de alginato-cáscara de tuna a diferentes concentraciones (0, 0.06, 0.12 y 0.25 % p/p) durante condiciones de almacenamiento (1, 7 y 14 días) y después de ser sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas.

Con base en lo anterior, los objetivos de este capítulo fueron: (a) Elaborar microcápsulas de alginato-cáscara de tuna, (b) evaluar el contenido fenólico total de las microcápsulas mediante el ensayo de Folin-Ciocalteu en los días 1, 7 y 14, (c) evaluar la capacidad antioxidante de las microcápsulas mediante el ensayo

de eliminación de radicales DPPH y ABTS en los días 1, 7 y 14, (d) evaluar el contenido fenólico total de las microcápsulas mediante el ensayo de Folin-Ciocalteu después de someterlas a condiciones gastrointestinales simuladas y (e) evaluar la capacidad antioxidante de las microcápsulas mediante el ensayo de eliminación de radicales DPPH y ABTS después de someterlas a condiciones gastrointestinales simuladas.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Ubicación del trabajo

El trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Tecnología de los Alimentos, ubicado en el Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

4.3.2 Materiales y reactivos

Los frutos maduros de tunas se colectaron en el municipio de San Martín de las Pirámides, Teotihuacán, Estado de México, México ($19^{\circ}42'36''\text{N}$, $-98^{\circ}49'14''\text{O}$), adquiridos por “Productora y comercializadora Pirámides Tuna”. Los reactivos analíticos utilizados fueron Trolox, ácido gálico, Folin-Ciocalteu y persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$), ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) (ABTS), 2,2-difenil-1-picrylhydrazyl (DPPH), adquiridos de Sigma-Aldrich (Toluca, Estado de México, México). Los reactivos analíticos, metanol (CH_3OH) y etanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) se adquirieron de Química Meyer® (Química Suastes S.A. de C.V., CDMX, México). Todas las evaluaciones y determinaciones se llevaron a cabo por triplicado y los resultados se reportaron como media $\pm$ desviación estándar. Para la evaluación de actividad antioxidante, se elaboraron las curvas de calibración: Ácido Gálico para contenido fenólico total (CFT) (Figura 10) y Trolox para los ensayos de DPPH (Figura 11) y ABTS (Figura 12).

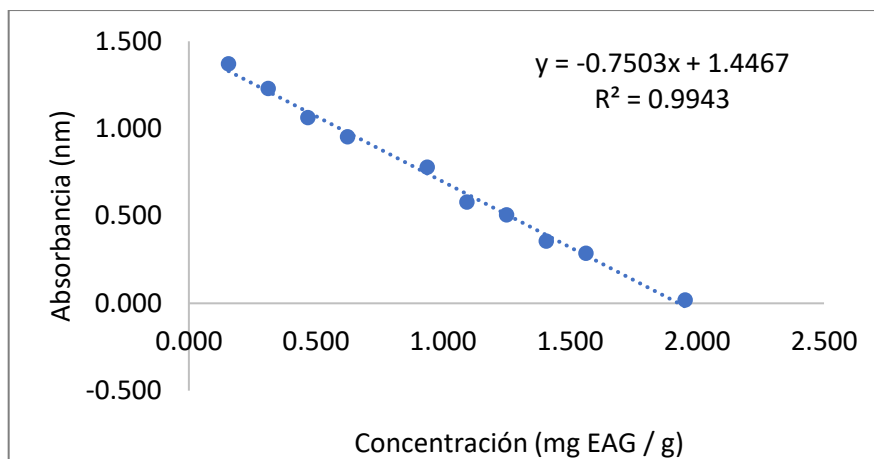


Figura 10 Curva de calibración de Ácido Gálico

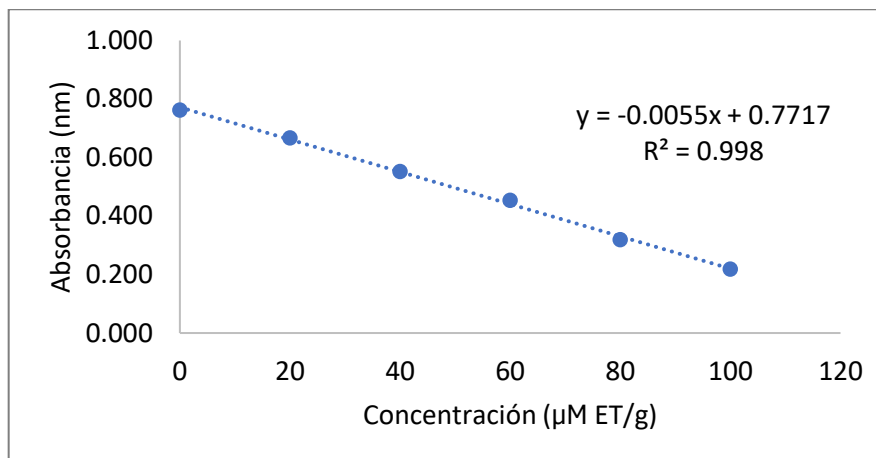


Figura 11 Curva de calibración de Trolox por el método DPPH

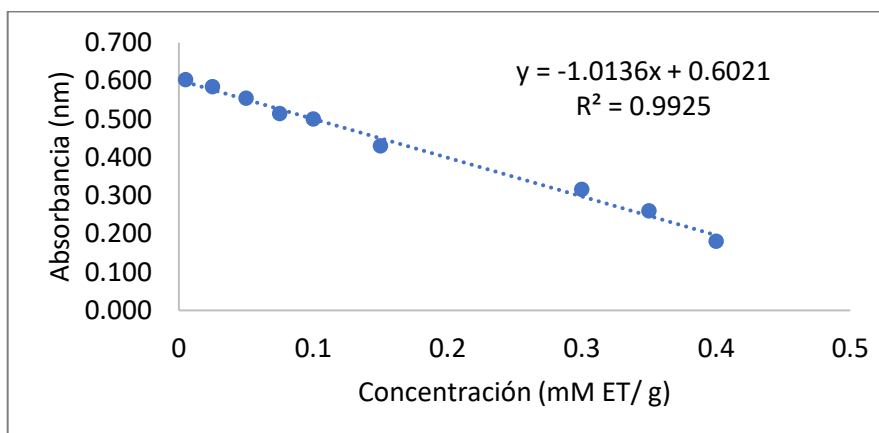


Figura 12 Curva de calibración de Trolox por el método ABTS

4.3.3 Evaluación de contenido fenólico y actividad antioxidante de las microcápsulas

4.3.3.1 Preparación de los extractos de las microcápsulas

Para la obtención de los extractos de los encapsulados se utilizó la metodología reportada por Polanía et al. (2023) con ligeras modificaciones. Se dispersaron diferentes gramos de microcápsulas a diferentes concentraciones y se disolvieron en agitación con Vórtex durante 3 minutos. Esta suspensión se dejó en oscuridad durante 6, 60 y 120 minutos para ABTS, DPPH y CFT, respectivamente, y posteriormente se filtró el extracto a través de un papel de filtro con un tamaño de poro de 0.45 μm .

4.3.3.2 Contenido fenólico total (TPC)

Se utilizó la metodología descrita por Polanía et al. (2023) con ligeras modificaciones. Brevemente, se tomaron 1.5 g de microcápsulas y se depositaron en un tubo de ensayo, se añadieron 422 μL de reactivo Folin-Ciocalteu y se agitó la mezcla, dejándose reposar durante 6 minutos. Posteriormente, se introdujeron 1054 μL de carbonato de sodio (7 % p/v) y se volvió a dejar reposar durante 90 minutos. Las muestras se leyeron a una absorbancia de 760 nm en un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS (Thermo Fisher Scientific, Massachusetts, Estados Unidos).

4.3.3.3 Actividad antioxidante por DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo)

Se siguió la metodología de Topracki et al. (2023) con ligeras modificaciones para determinar la capacidad antioxidante por DPPH. Brevemente, se añadieron 1800 μL de solución de DPPH a 0.4 gramos de microcápsulas, se mezclaron y se dejaron en oscuridad durante 60 minutos. Las muestras se leyeron a una absorbancia de 514 nm en un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS (Thermo Fisher Scientific, Massachusetts, Estados Unidos).

4.3.3.4 Actividad antioxidante por ABTS (ácido 2,20-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico))

Se siguió la metodología de Polanía et al. (2023) para determinar la capacidad antioxidante por ABTS. Se preparó el radical ABTS utilizando persulfato de potasio para dejar reposar durante 16 horas la reacción de oxidación en oscuridad. Posteriormente se ajustó la absorbancia de la solución ABTS a 0.70 ± 0.02 a una longitud de onda de 734 nm. Para cuantificar las muestras, se utilizaron 0.56 g de microcápsulas añadiendo 3240 μL de la solución ABTS. Las muestras se dejaron en la oscuridad durante 6 minutos y se leyeron en un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS (Thermo Fisher Scientific, Massachusetts, Estados Unidos).

4.3.4 Condiciones gastrointestinales simuladas

Para el modelo *in vitro* se siguió la metodología de Bruno et al. (2022) y Sandoval-Castilla et al., (2010) con ligeras modificaciones. Para determinar el efecto de las condiciones gástricas simuladas en las cápsulas, se colocó 1 g de cada tratamiento de cápsulas en tubos conteniendo 9 ml de solución gástrica simulada estéril (pH de 3.0) con ácido clorhídrico 0.1 N. Posteriormente, las muestras se incubaron a 37 °C durante 3 h en un baño de agua con agitación (Precision 360 Scientific Orbital, West Cortland St., Chicago, IL, EUA) (Sandoval-Castilla, 2010). Después, las cápsulas se filtraron y enjuagaron para determinar inmediatamente la actividad antioxidante por los métodos descritos anteriormente.

Para determinar el efecto del jugo gástrico simulado y sales biliares en las cápsulas, se colocó 1 g de cada tratamiento de cápsulas en tubos conteniendo 9 ml de solución gástrica simulada estéril (pH de 3.0) con ácido clorhídrico 0.1 N. Las muestras se incubaron a 37 °C durante 3 h. Posteriormente, las cápsulas se filtraron, enjuagaron con solución salina y colocaron en tubos conteniendo 9 ml de extracto de bilis de porcino (B8631, Sigma-Aldrich Chemical Co., St Louis, MO, EUA) al 1 % (p/v) y pH 6.4. Las muestras se incubaron a 37 °C por 3 h con agitación suave. Al finalizar el periodo de incubación, se determinó la actividad antioxidante en las cápsulas por el procedimiento descrito en 1.1.4.

4.3.5 Análisis estadístico

Todos las mediciones se realizaron por triplicado, expresando los resultados como media $\pm$ desviación estándar. Los datos se sometieron a análisis de varianza, estableciendo una significancia en $p \leq 0.05$ y la comparación entre medias se determinó mediante la prueba de Tukey. El análisis de datos se realizó en el software Minitab 18 (Minitab Inc., Pensilvania, EUA).

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Propiedades antioxidantes de las microcápsulas en condiciones de almacenamiento

4.4.1.1 Contenido fenólico total

Los compuestos fenólicos presentan propiedades antioxidantes como la eliminación e inhibición de especies reactivas de oxígeno, la eliminación de electrófilos y la quelación de metales. Por lo tanto, el contenido fenólico total (CFT) es uno de los atributos utilizados para evaluar la actividad antioxidante de ciertos en extractos de plantas (Kobo et al., 2022).

En el Cuadro 4 se presentan los valores del contenido fenólico total de las microcápsulas que se encuentran entre los valores reportados por Andreu et al. (2017) y Amaya-Cruz et al. (2019) en el contenido fenólico en harina de cáscara de tuna variedad “Cristalina” (18.2 y 12.28 mg EAG/g de muestra seca, respectivamente). Las microcápsulas presentaron un aumento de CFT proporcional a la concentración de harina añadida, registrando los valores más altos al día 7, mismos que disminuyeron gradualmente al día 14, lo anterior se puede deber a que en el día 7 la polaridad y difusión de los antioxidantes liberados en las microcápsulas tienen una mejor interacción, sin embargo para el día 14 la sobreexposición al medio gelificante puede resultar en una difusión excesiva en la que los antioxidantes se dispersan y su concentración en el medio activo se reduce, disminuyendo así la actividad antioxidante (Casadey et al., 2020; Abtahi et al., 2024).

El tratamiento CT_{0.25} mostró un aumento del CFT con una diferencia estadística ($p \leq 0.05$) entre los demás tratamientos (CT_{0.12}, CT_{0.06} y CT₀), ya que se encuentra protegida por la matriz de alginato, permitiendo una liberación más controlada en condiciones de almacenamiento (X. Zhang et al. 2021), evidenciando una tendencia creciente en el CFT respecto a la concentración de harina incorporada. Cujic et al. (2021) mencionan que la interacción entre compuestos fenólicos y grupos carboxilatos del alginato brindan mayor estabilidad y una menor pérdida de dichos compuestos durante la reticulación.

Cuadro 4 Contenido fenólico total (CFT) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato en condiciones de almacenamiento

Tratamiento	CFT (mg EAG/g)		
	Día 1	Día 7	Día 14
CT ₀	12.703 ± 0.095 ^{aA}	16.155 ± 0.078 ^{cA}	13.570 ± 0.008 ^{bA}
CT _{0.06}	14.360 ± 0.755 ^{bB}	16.354 ± 0.074 ^{cB}	13.699 ± 0.124 ^{aB}
CT _{0.12}	15.439 ± 0.072 ^{bC}	16.389 ± 0.065 ^{cC}	15.021 ± 0.020 ^{aC}
CT _{0.25}	16.409 ± 0.069 ^{aD}	16.475 ± 0.031 ^{bD}	16.737 ± 0.024 ^{cD}

Valores de medias ± desviación estándar con diferentes superíndices en la misma fila (^{a, b, c}) y en la misma columna (^{A, B, C, D}), indican que difieren significativamente ($p \leq 0.05$), durante el tiempo de almacenamiento y entre variaciones de cápsulas, respectivamente.

CT: Concentración de harina de cáscara de tuna. CT₀: control; CT_{0.06}, CT_{0.12} y CT_{0.25}, microcápsulas de alginato conteniendo 0.25 %, 0.12 % y 0.06 % p/p de harina de cáscara de tuna, respectivamente.

4.4.1.2 Ensayo DPPH

El ensayo DPPH evalúa la capacidad de un antioxidante para reducir el radical libre de DPPH, que al cambiar de tonalidad violeta a amarillo indica la neutralización del radical, donando electrones o átomos de hidrógenos por parte del compuesto antioxidante, el cual se puede determinar a través de la disminución de la absorbancia por espectrofotometría (Gulcin & Alwasel, 2023). En el Cuadro 5 se muestran los resultados de la actividad antioxidante de las microcápsulas durante los 14 días de almacenamiento.

Para el día 1, en CT_{0.06} y CT_{0.12} no se observó diferencia estadística, evidenciando que, en dichas concentraciones de harina su capacidad para eliminar los radicales DPPH son similares, sin embargo, CT_{0.25} presentó un porcentaje de

inhibición superior respecto CT_0 , $CT_{0.06}$ y $CT_{0.12}$ (6.40, 4.27 y 3.29 %, respectivamente), lo cual se puede atribuir a la mayor concentración de harina de cáscara de tuna añadida. La diferencia estadística observada en el día 7 muestra que $CT_{0.25}$ y $CT_{0.12}$ tuvieron un efecto inhibitor en comparación con $CT_{0.06}$ y CT_0 , ya que a medida que se mantienen en condiciones de almacenamiento se liberan gradualmente los compuestos antioxidantes, siendo más estables durante este periodo de tiempo en comparación con las concentraciones más bajas (0.06 y 0 %) (Sharayei et al., 2019; Abtahi et al., 2024). Por otro lado, el porcentaje de inhibición disminuyó significativamente al día 14, mostrando una tendencia decreciente para los tratamientos $CT_{0.25}$ y $CT_{0.12}$ (39.12 y 29.82 %) en comparación con los tratamientos $CT_{0.06}$ y CT_0 (7.73 y 2.83 %).

Durante el periodo de almacenamiento, se observó un aumento en los primeros 7 días, probablemente debido a la formación o liberación de compuestos antioxidantes que se encuentran en la matriz de alginato – harina, sin embargo, se muestra una disminución del porcentaje de inhibición al final de los 14 días, lo que sugiere que dichos compuestos comienzan a degradarse (Zhang et al., 2021) o bien, la matriz comienza a desestabilizarse ante el daño inducido por diversos factores que ocurren durante el almacenamiento como la actividad de agua, temperatura, oxígeno o exposición a la luz (Otálora et al., 2018).

Mar et al. (2021) mencionan que la adición de diferentes biopolímeros en microcápsulas de alginato mejora la estabilidad de los compuestos antioxidantes en comparación a la adición de alginato como único biopolímero; adicionalmente, evidencian que una mayor concentración de material co-encapsulante utilizado (inulina) puede disminuir la estabilidad de compuestos antioxidantes, sin embargo, los resultados en el presente estudio, mostraron que $CT_{0.25}$ favorece la formación de un gel más estable, lo cual podría

atribuirse a las propiedades fisicoquímicas de la harina, como su capacidad de retención de agua (Majdoub et al., 2010), la cual permite reforzar la estructura de las microcápsulas.

Cuadro 5 Actividad de eliminación de radicales DPPH (2,2-Difenil picrilhidrazilo) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato en condiciones de almacenamiento

Tratamiento	Porcentaje de inhibición de DPPH		
	Día 1	Día 7	Día 14
CT ₀	39.433 ± 1.327 ^{bA}	40.165 ± 0.557 ^{bA}	37.327 ± 0.384 ^{aA}
CT _{0.06}	41.110 ± 1.031 ^{aB}	49.314 ± 0.242 ^{cB}	41.583 ± 0.300 ^{bB}
CT _{0.12}	42.543 ± 1.039 ^{aB}	76.090 ± 0.211 ^{cC}	46.264 ± 0.190 ^{bC}
CT _{0.25}	45.837 ± 0.749 ^{aD}	88.960 ± 0.536 ^{cD}	49.832 ± 0.370 ^{bD}

Valores de medias ± desviación estándar con diferentes superíndices en la misma fila (^{a, b, c}) y en la misma columna (^{A, B, C, D}), indican que difieren significativamente ($p \leq 0.05$), durante el tiempo de almacenamiento y entre variaciones de cápsulas, respectivamente.

CT: Concentración de harina de cáscara de tuna. CT₀: control; CT_{0.06}, CT_{0.12} y CT_{0.25}, microcápsulas de alginato conteniendo 0.25 %, 0.12 % y 0.06 % p/p de harina de cáscara de tuna, respectivamente.

4.4.1.3 ABTS

La actividad antioxidante se puede evaluar a través de técnicas que determinen la capacidad de los compuestos fenólicos para estabilizar radicales sintéticos como: DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo) y ABTS (2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) (Martínez, 2023). El estudio de los compuestos antioxidantes durante su almacenamiento nos permite entender su comportamiento con el fin de garantizar y maximizar su estabilidad a través del tiempo (Nedovic et al., 2011).

En el Cuadro 6 se puede observar que las microcápsulas mostraron estabilidad en su actividad antioxidante durante los 14 días del periodo de almacenamiento, sugiriendo que la interacción entre el alginato y la harina de cáscara de tuna proporcionaron un efecto protector sobre los compuestos de las microcápsulas. En el caso de las microcápsulas sin harina de cáscara de tuna añadida, se observó un incremento significativo para el día 14, sin embargo, en los tratamientos con adición de harina de cáscara, el aumento fue aún mayor (22.93 %). La tendencia del porcentaje de inhibición del día 1 al 14 mostró un incremento

de acuerdo con la concentración de harina en cada tratamiento, CT_{0.25} presentó un mayor porcentaje en comparación a CT_{0.06} y CT₀.

En el día 7 CT_{0.25} mostró un porcentaje de inhibición significativamente mayor a CT₀, CT_{0.06} y CT_{0.12} (43.8, 40.1 y 34.8 %, respectivamente) mostrando que una concentración de 0.25 % de harina, presentó una mayor actividad antioxidante. En el estudio realizado por Rehan et al. (2019) mencionan que al evaluar la actividad antioxidante de encapsulados de alginato, almidón y extracto de hoja de guayaba, estos mostraron un alto porcentaje de inhibición (28.2 %), lo cual se atribuye a una mayor concentración del extracto protegido, gracias a la eficaz interacción entre el alginato y los polisacáridos de almidón que estabilizan los antioxidantes de las hojas de guayaba.

Durante los periodos de tiempo de almacenamiento evaluados (1, 7 y 14) se observó una tendencia creciente en el porcentaje de inhibición atribuida a la incorporación de harina de cáscara de tuna en la matriz de alginato. Su adición puede implicar la modificación de la estructura de las microcápsulas en condiciones de almacenamiento reduciendo así la porosidad de la matriz, promoviendo la interacción entre los compuestos antioxidantes y biopolímeros. Estas características promueven que la combinación del alginato de y harina de cáscara de tuna sea significativa para su uso en productos alimentarios (Duan, et al., 2021).

Cuadro 6 Actividad de eliminación de radicales ABTS (2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato en condiciones de almacenamiento

Tratamiento	Porcentaje de inhibición de ABTS		
	Día 1	Día 7	Día 14
CT ₀	24.087 ± 2.685 ^{aA}	26.462 ± 0.267 ^{bA}	52.124 ± 3.098 ^{cC}
CT _{0.06}	27.454 ± 0.142 ^{aB}	30.173 ± 0.120 ^{bB}	51.239 ± 0.531 ^{cB}
CT _{0.12}	34.424 ± 0.142 ^{aC}	35.420 ± 0.142 ^{bC}	37.962 ± 0.162 ^{cA}
CT _{0.25}	41.726 ± 1.910 ^{aD}	70.318 ± 0.457 ^{cD}	64.656 ± 2.705 ^{bD}

Valores de medias ± desviación estándar con diferentes superíndices en la misma fila (^{a, b, c}) y en la misma columna (^{A, B, C, D}), indican que difieren significativamente ($p \leq 0.05$), durante el tiempo de almacenamiento y entre variaciones de cápsulas, respectivamente.

CT: Concentración de harina de cáscara de tuna. CT₀: control; CT_{0.06}, CT_{0.12} y CT_{0.25}, microcápsulas de alginato conteniendo 0.25 %, 0.12 % y 0.06 % p/p de harina de cáscara de tuna, respectivamente.

4.4.2 Propiedades antioxidantes de las microcápsulas sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas

4.4.2.1 Contenido fenólico total

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran la actividad antioxidante de las microcápsulas después de someterlas a las fases del proceso gastrointestinal simulado (gástrica e intestinal). La mezcla de harina de cáscara de tuna con alginato puede tener un impacto en la estructura de las microcápsulas al actuar como refuerzo dentro del material de pared y retardar la liberación de los compuestos antioxidantes presentes en la harina.

Durante la fase gástrica los resultados sugirieron que el CFT de los tratamientos, son liberados lentamente en las microcápsulas con respecto al tiempo cero evidenciando que sólo en el tratamiento CT_{0.25} se presenta una disminución en la liberación de CFT, que puede atribuirse a una saturación de compuestos fenólicos dentro de la matriz de alginato que debido al medio ácido pueden ser expuestos en condiciones ácidas (pH = 1.5) como resultado del tiempo de incubación o contacto con el medio ácido, produciendo erosión de los materiales de pared, debido a la hidrólisis de polisacáridos inducida por el HCl de la fase gástrica (3 horas) (Lozano-Vazquez et al., 2015; Amorim et al., 2023). Para los tratamientos CT_{0.12} y CT_{0.06} presentan un CFT diferente estadísticamente ($p \leq 0.05$) del tratamiento CT_{0.25} (Wongverawattanakul et al., 2022). Vallejo-Castillo et al. (2020) reportan que este efecto puede indicar que los compuestos bioactivos, que se encuentran en la superficie de las microcápsulas y, los que se encuentran absorbidos dentro de esta matriz, pueden ser completamente liberados cuando se cambian de medio, es decir, de un pH en fase gástrica a un pH cercano a la neutralidad.

Después de la fase gástrica, las microcápsulas son expuestas a fluidos intestinales simulados (sales biliares), donde el pH del fluido provoca un

agrietamiento, liberando el CFT evidenciando un incremento respecto al tiempo cero. Para cada tratamiento, el CFT incrementó un 28.37, 14.62, 8.01 y 2.43 % para los tratamientos CT₀, CT_{0.06}, CT_{0.12} y CT_{0.25}, respectivamente, del tiempo cero a su exposición a sales biliares (Martinović et al., 2023). Esta liberación de compuestos es producida debido al choque iónico que afecta la interacción entre el calcio, el alginato y la harina de cáscara de tuna debido al cambio de condiciones ácidas a neutras y a la diferente solubilidad del alginato en medios ácidos y alcalinos, disolviendo la estructura de las microcápsulas progresivamente durante el periodo de incubación por la interacción de los iones Ca²⁺ y Na⁺ que se encuentran en los fluidos de la fase intestinal (Sathyabama et al., 2014; Vallejo-Castillo et al., 2020; Martinović et al., 2023). Así, se muestra que la interacción entre los fluidos gastrointestinales simulados y las microcápsulas pueden existir factores que afectan la liberación de compuestos de la estructura encapsulada.

Cuadro 7 Contenido fenólico total (CFT) de cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas

Tratamiento	CFT (mg EAG/g)		
	T ₀	Fase gástrica	Sales biliares
CT ₀	12.703 ± 0.095 ^{aA}	15.072 ± 0.018 ^{bA}	16.307 ± 0.041 ^{cA}
CT _{0.06}	14.360 ± 0.755 ^{aB}	15.772 ± 0.012 ^{bB}	16.460 ± 0.113 ^{cB}
CT _{0.12}	15.439 ± 0.072 ^{aC}	15.811 ± 0.127 ^{bC}	16.675 ± 0.031 ^{cC}
CT _{0.25}	16.409 ± 0.069 ^{bD}	16.374 ± 0.078 ^{aD}	16.808 ± 0.054 ^{cD}

Valores de medias ± desviación estándar con diferentes superíndices en la misma fila (^{a, b, c}) y en la misma columna (^{A, B, C, D}), indican que difieren significativamente ($p \leq 0.05$), durante el tiempo de almacenamiento y entre variaciones de cápsulas, respectivamente.

CT: Concentración de harina de cáscara de tuna. CT₀: control; CT_{0.06}, CT_{0.12} y CT_{0.25}, microcápsulas de alginato conteniendo 0.25 %, 0.12 % y 0.06 % p/p de harina de cáscara de tuna, respectivamente.

4.4.2.2 Ensayo DPPH

Los resultados del comportamiento de las microcápsulas en los fluidos gástricos e intestinales simulados se muestran en el Cuadro 8. Estos revelaron que

durante el fluido gástrico simulado (FGS), CT_{0.25} mostró una diferencia de liberación de los compuestos antioxidantes mayor respecto al tiempo cero (10.4 %), donde CT_{0.06} y CT_{0.12} presentaron un comportamiento similar de liberación a partir del tiempo cero (4.59 y 4.22 %, respectivamente). De acuerdo con el estudio realizado por Fathordoobady, Jarzębski, Pratap-Singh, Guo & Abd-Manap (2021), este comportamiento se relaciona con la compresión de la pared de las microcápsulas que impide la migración de los compuestos, permitiendo su interacción con el FGS.

Por otra parte, el comportamiento de las microcápsulas en fluidos intestinales simulados (FIS) presentaron un incremento en la actividad antioxidante, donde CT_{0.25} tuvo una diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$) mayor con respecto a CT_{0.06} y CT_{0.12} (9.1 y 10.9 %), mostrando una relación de proporción entre el contenido de harina en los diferentes tratamientos (control, 0.06, 0.12 y 0.25 % p/p) y su actividad antioxidante liberada de la fase gástrica a la fase intestinal (3.84, 4.19, 3.42 y 19.92 % respectivamente) debido al cambio de pH en el FGS y FIS. Este comportamiento se explica por Pasukamonset et al. (2016) y Flammini et al. (2020) quienes describen que las microcápsulas de alginato en fluidos gástricos (pH 1) los grupos carboxilos se encuentran protonados (-COOH), facilitando el entrelazamiento de las cadenas de alginato y así formar una red más estable, mientras que en fluidos intestinales (pH 7.5) las microcápsulas se hinchan debido a que los grupos carboxilo comienzan a ionizarse (-COO⁻), generando cargas negativas que provocan la repulsión electrostática entre las cadenas de alginato y que por lo tanto debilitan su estructura provocando su desintegración y liberación de los compuestos bioactivos.

Cuadro 8 Actividad de eliminación de radicales DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato después de condiciones gastrointestinales simuladas

Tratamiento	Porcentaje de inhibición de DPPH		
	T ₀	Fase gástrica	Sales biliares
CT ₀	39.433 ± 1.327 ^{aA}	39.581 ± 0.419 ^{bA}	43.428 ± 1.668 ^{bA}
CT _{0.06}	41.110 ± 1.031 ^{aB}	45.331 ± 0.395 ^{bB}	49.527 ± 0.850 ^{cB}
CT _{0.12}	42.543 ± 1.039 ^{aB}	47.140 ± 0.447 ^{bB}	50.564 ± 0.699 ^{cB}
CT _{0.25}	45.837 ± 0.749 ^{aD}	56.286 ± 0.598 ^{bC}	76.212 ± 0.600 ^{cC}

Valores de medias ± desviación estándar con diferentes superíndices en la misma fila (^{a, b, c}) y en la misma columna (^{A, B, C, D}), indican que difieren significativamente ($p \leq 0.05$), durante el tiempo de almacenamiento y entre variaciones de cápsulas, respectivamente.

CT: Concentración de harina de cáscara de tuna. CT₀: control; CT_{0.06}, CT_{0.12} y CT_{0.25}, microcápsulas de alginato conteniendo 0.25 %, 0.12 % y 0.06 % p/p de harina de cáscara de tuna, respectivamente.

4.4.2.3 Ensayo ABTS

La actividad antioxidante de los tratamientos se asocia a la presencia de compuestos fenólicos contenidos en las microcápsulas. En el Cuadro 9 se muestra que el valor de CT_{0.25} mostró un aumento significativamente durante la fase gástrica (22.7 %), mientras que CT_{0.12}, CT_{0.06} y CT₀ mostraron un menor porcentaje de inhibición (4.4, 5.5 y 7.2 %, respectivamente) comparados respecto al tiempo cero, lo anterior se puede atribuir a la interacción entre el medio ácido de la fase gástrica y las microcápsulas durante el tiempo de incubación. Durante la fase gástrica respecto a CT₀ se presentaron diferencias significativas, CT_{0.06} (1.6 %), CT_{0.12} (7.5 %) y CT_{0.25} (33.1 %). En esta fase se pudo observar una liberación gradual seguida de una liberación continua en la fase intestinal.

En la fase intestinal, la interacción de las microcápsulas con el fluido de sales biliares, el porcentaje de inhibición de CT_{0.25} fue significativamente mayor a CT_{0.06} (35.9 %). Además, los valores para CT₀ y CT_{0.06} fueron similares (10.5 y 10.7 %) respecto al tiempo cero, lo que sugiere que tanto el alginato como la harina de cáscara de tuna, favorecen la protección de los compuestos antioxidantes en condiciones gástricas, además de poseer la capacidad de liberarlos durante la fase intestinal. De acuerdo con Martinović et al. (2023), este comportamiento está

relacionado con la concentración óptima del material de relleno utilizada (0.4 % p/p), la cual puede influir en su capacidad para interactuar con el alginato, que resulta en una red más estructurada que mejora la encapsulación y protección de los compuestos bioactivos así como su liberación en cada fase (gástrica e intestinal).

En los resultados obtenidos para el porcentaje de inhibición del ensayo ABTS se pudo observar que CT_{0.25} posee mayor actividad antioxidante, seguido por CT_{0.12}, CT_{0.06} y CT₀, indicando que a mayor concentración de harina, mayor es la capacidad antioxidante inicial. De igual manera, los compuestos bioactivos se pueden encontrar absorbidos en la superficie de la pared de alginato debido a la incorporación de harina de cáscara de tuna que actúa como material de relleno (Li et al., 2021), lo que tiene un efecto favorecedor al retrasar la desintegración total de la microcápsula durante la fase gástrica (Belščak-Cvitanović et al., 2015).

El comportamiento del porcentaje de inhibición en condiciones gastrointestinales mostró un aumento durante la fase gástrica e intestinal, lo que se debe a las altas concentraciones (18.2 mg EAG/g de muestra seca) de compuestos bioactivos que se liberan en gran medida en la fase intestinal donde son absorbidos (Cuvas-Limon et al., 2022).

Cuadro 9 Actividad de eliminación de radicales ABTS 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) en cápsulas elaboradas a partir de harina de cáscara de tuna y alginato después de condiciones gastrointestinales simuladas

Tratamiento	Porcentaje de inhibición de ABTS		
	T ₀	Fase gástrica	Sales biliares
CT ₀	24.087 ± 2.685 ^{aA}	31.294 ± 0.201 ^{bA}	34.614 ± 1.077 ^{cA}
CT _{0.06}	27.454 ± 0.142 ^{aB}	32.992 ± 0.783 ^{bB}	38.179 ± 0.444 ^{cB}
CT _{0.12}	34.424 ± 0.142 ^{aC}	38.881 ± 0.783 ^{bC}	63.727 ± 0.620 ^{cC}
CT _{0.25}	41.726 ± 1.910 ^{aD}	64.486 ± 2.546 ^{bD}	74.158 ± 1.077 ^{cD}

Valores de medias ± desviación estándar con diferentes superíndices en la misma fila (^{a, b, c}) y en la misma columna (^{A, B, C, D}), indican que difieren significativamente ($p \leq 0.05$), durante el tiempo de almacenamiento y entre variaciones de cápsulas, respectivamente.

CT: Concentración de harina de cáscara de tuna. CT₀: control; CT_{0.06}, CT_{0.12} y CT_{0.25}, microcápsulas de alginato conteniendo 0.25 %, 0.12 % y 0.06 % p/p de harina de cáscara de tuna, respectivamente.

4.5 Conclusiones

El uso de mezclas de alginato-cáscara de tuna permitió reforzar la estructura de las microcápsulas para proporcionar una mayor protección a los compuestos bioactivos que se encuentran en la harina.

Las microcápsulas adicionadas con 0.25 % (p/p) de harina de cáscara de tuna mostraron un mejor CFT (16.475 ± 0.031 mg EAG/g) y porcentaje de inhibición, tanto para DPPH (88.960 ± 0.536 %) como ABTS (70.318 ± 0.457 %), en comparación con los demás tratamientos durante condiciones de almacenamiento para el día 7, demostrando la viabilidad de su protección. Por otro lado, la actividad antioxidante de las microcápsulas sometidas a condiciones gastrointestinales simuladas incrementó para CT_{0.25} durante la fase intestinal, mostrando valores para CFT, DPPH y ABTS de 16.737 ± 0.024 mg EAG/g, 76.212 ± 0.600 y 74.158 ± 1.077 %, respectivamente, evidenciando su protección desde la fase gástrica hasta su exposición a sales biliares, donde pueden ser absorbidos los compuestos bioactivos para su aprovechamiento nutricional.

4.6 Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado durante los dos años de estudio, al Departamento de Preparatoria Agrícola y al Departamento de Ingeniería Agroindustrial por facilitar los materiales requeridos en esa investigación.

4.7 Literatura citada

- Abtahi, S. A., Khoshkhoo, Z., Khorshidian, N., & Mohammadi, M. (2024a). Alginate Microcapsules Loaded with Eryngium billardieri Extract and Its Application in Apple Juice. Journal of Food Quality, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/6858230>
- Abtahi, S. A., Khoshkhoo, Z., Khorshidian, N., & Mohammadi, M. (2024a). Alginate Microcapsules Loaded with Eryngium billardieri Extract and Its Application in Apple Juice. Journal of Food Quality, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/6858230>
- Amaya-Cruz, D. M., Pérez-Ramírez, I. F., García, J. D., Mondragón-Jacobo, C., Déctor, A., & Reynoso-Camacho, R. (2019). An integral profile of bioactive

compounds and functional properties of prickly pear (*Opuntia ficus indica* L.) peel with different tonalities. *Food Chemistry*, 278, 568-578. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.031>

- Amorim, T. A., Lima, M. D. S., De Souza, M. E. a. O., Albuquerque, N. M., Da Silva Figueiredo, L., Da Silva, A. B. M., De Oliveira Vilar, S. B., & De Brito Araújo Carvalho, A. J. (2023). Drying kinetics, extraction kinetics and microencapsulation of antioxidant bioactive compounds of pitaya (*Hylocereus undatus*) peel. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 17(4), 4073–4085. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01928-2>
- Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Carbonell-Barrachina, Á. A., Legua, P., & Hernández, F. (2017). Antioxidant properties and chemical characterization of Spanish *Opuntia ficus-indica* Mill. cladodes and fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1566–1573. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8628>
- Belščak-Cvitanović, A., Jurić, S., Đorđević, V., Barišić, L., Komes, D., Ježek, D., Bugarski, B., & Nedović, V. (2017). Chemometric evaluation of binary mixtures of alginate and polysaccharide biopolymers as carriers for microencapsulation of green tea polyphenols. *International Journal of Food Properties*, 20(9), 1971–1986. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1225762>
- Bruno Norcino, L., Farinassi Mendes, J., De Abreu Figueiredo, J., Leite Oliveira, N., Alvarenga Botrel, D., & Capparelli Mattoso, L. H. (2022). Development of alginate/pectin microcapsules by a dual process combining emulsification and ultrasonic gelation for encapsulation and controlled release of anthocyanins from grapes (*Vitis labrusca* L.). *Food Chemistry*, 391, 133256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133256>
- Casadey, R., Broglia, M., Barbero, C., Criado, S., & Rivarola, C. (2020). Controlled release systems of natural phenolic antioxidants encapsulated inside biocompatible hydrogels. *Reactive and Functional Polymers*, 156, 104729. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104729>
- Ćujić, N., Trifković, K., Bugarski, B., Ibrić, S., Pljevljakušić, D., & Šavikin, K. (2016a). Chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) extract loaded in alginate and alginate/inulin system. *Industrial Crops and Products*, 86, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.045>
- Cuvas-Limon, R. B., Ferreira-Santos, P., Cruz, M., Teixeira, J. A., Belmares, R., & Nobre, C. (2022). Effect of Gastrointestinal Digestion on the Bioaccessibility of Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Fermented *Aloe vera* Juices. *Antioxidants*, 11(12), 2479. <https://doi.org/10.3390/antiox11122479>
- Fathordoobady, F., Jarzębski, M., Pratap-Singh, A., Guo, Y., & Abd-Manap, Y. (2021). Encapsulation of betacyanins from the peel of red dragon fruit

- (*Hylocereus polyrhizus* L.) in alginate microbeads. *Food Hydrocolloids*, 113, 106535. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106535>
- Flamminii, F., Di Mattia, C. D., Nardella, M., Chiarini, M., Valbonetti, L., Neri, L., Difonzo, G., & Pittia, P. (2020). Structuring alginate beads with different biopolymers for the development of functional ingredients loaded with olive leaves phenolic extract. *Food Hydrocolloids*, 108, 105849. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105849>
- Flamminii, F., Di Mattia, C. D., Nardella, M., Chiarini, M., Valbonetti, L., Neri, L., Difonzo, G., & Pittia, P. (2020). Structuring alginate beads with different biopolymers for the development of functional ingredients loaded with olive leaves phenolic extract. *Food Hydrocolloids*, 108, 105849. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105849>
- Gulcin, İ., & Alwasel, S. H. (2023). DPPH radical scavenging assay. *Processes*, 11(8), 2248. <https://doi.org/10.3390/pr11082248>
- Kobo, G. K., Kaseke, T., & Fawole, O. A. (2022a). Micro-Encapsulation of phytochemicals in passion fruit peel waste generated on an organic farm: effect of carriers on the quality of encapsulated powders and potential for Value-Addition. *Antioxidants*, 11(8), 1579. <https://doi.org/10.3390/antiox11081579>
- Li, Q., Duan, M., Hou, D., Chen, X., Shi, J., & Zhou, W. (2021). Fabrication and characterization of Ca(II)-alginate-based beads combined with different polysaccharides as vehicles for delivery, release and storage of tea polyphenols. *Food Hydrocolloids*, 112, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106274>
- Lozano-Vazquez, G., Lobato-Calleros, C., Escalona-Buendía, H. B., Chavez, G., Alvarez-Ramirez, J., & Vernon-Carter, E. J. (2015). Effect of the weight ratio of alginate-modified tapioca starch on the physicochemical properties and release kinetics of chlorogenic acid containing beads. *Food Hydrocolloids*, 48, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.032>
- Madziva, H., Kailasapathy, K., & Phillips, M. (2005). Alginate–pectin microcapsules as a potential for folic acid delivery in foods. *Journal of Microencapsulation*, 22(4), 343–351. <https://doi.org/10.1080/02652040500100931>
- Mahloko, L. M., Silungwe, H., Mashau, M. E., & Kgatla, T. E. (2019). Bioactive compounds, antioxidant activity and physical characteristics of wheat-prickly pear and banana biscuits. *Heliyon*, 5(10), e02479. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02479>
- Mar, J. M., Da Silva, L. S., Da S Rabello, M., Biondo, M. M., Kinupp, V. F., Campelo, P. H., Bruginski, E., Campos, F. R., De Araújo Bezerra, J., & Sanches, E. A. (2021). Development of alginate/inulin carrier systems

- containing non-conventional Amazonian berry extracts. *Food Research International*, 139, 109838. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109838>
- Martinović, J., Lukinac, J., Jukić, M., Ambrus, R., Planinić, M., Šelo, G., Klarić, A., Perković, G., & Bucić-Kojić, A. (2023a). Physicochemical Characterization and Evaluation of Gastrointestinal In Vitro Behavior of Alginate-Based Microbeads with Encapsulated Grape Pomace Extracts. *Pharmaceutics*, 15(3), 980. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030980>
- Nedović, V., Kalušević, A., Manojlović, V., Lević, S., & Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. *Procedia Food Science*, 1, 1806–1815. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.265>
- Otálora, M. C., Carriazo, J. G., Osorio, C., & Nazareno, M. A. (2018a). Encapsulation of cactus (*Opuntia megacantha*) betaxanthins by ionic gelation and spray drying: A comparative study. *Food Research International*, 111, 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.058>
- Panza, O., Lacivita, V., Conte, A., & Del Nobile, M. A. (2022). Quality preservation of Ready-to-Eat Prickly Pears by Peels Recycling. *Foods*, 11(14), 2016. <https://doi.org/10.3390/foods11142016>
- Parafati, L., Restuccia, C., Palmeri, R., Fallico, B., & Arena, E. (2020a). Characterization of prickly pear peel flour as a bioactive and functional ingredient in bread preparation. *Foods*, 9(9), 1189. <https://doi.org/10.3390/foods9091189>
- Pasukamonset, P., Kwon, O., & Adisakwattana, S. (2016). Alginate-based encapsulation of polyphenols from *Clitoria ternatea* petal flower extract enhances stability and biological activity under simulated gastrointestinal conditions. *Food Hydrocolloids*, 61, 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.039>
- Polanía, A. M., Ramírez, C., Londoño, L., Bolívar, G., & Aguilar, C. N. (2023). Encapsulation of Pineapple Peel Extracts by Ionotropic Gelation Using Corn Starch, Weissella confusa Exopolysaccharide, and Sodium Alginate as Wall Materials. *Foods*, 12(15), 2943. <https://doi.org/10.3390/foods12152943>
- Rehan, M., Ahmed-Farid, O. A., Ibrahim, S. R., Hassan, A. A., Abdelrazek, A. M., Khafaga, N. I. M., & Khattab, T. A. (2019). Green and Sustainable Encapsulation of Guava Leaf Extracts (*Psidium guajava* L.) into Alginate/Starch Microcapsules for Multifunctional Finish over Cotton Gauze. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(22), 18612–18623. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04952>
- Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., García-Galindo, H., Alvarez-Ramírez, J., & Vernon-Carter, E. (2010). Textural properties of alginate–pectin beads and survivability of entrapped *Lb. casei* in simulated gastrointestinal

conditions and in yoghurt. *Food Research International*, 43(1), 111–117.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.010>

- Sathyabama, S., Kumar, M. R., Devi, P. B., Vijayabharathi, R., & Priyadharisini, V. B. (2014). Co-encapsulation of probiotics with prebiotics on alginate matrix and its effect on viability in simulated gastric environment. *LWT*, 57(1), 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.024>
- Toprakçı, İ., Torun, M., & Şahin, S. (2022a). Development of an Encapsulation Method for Trapping the Active Materials from Sour Cherry Biowaste in Alginate Microcapsules. *Foods*, 12(1), 130. <https://doi.org/10.3390/foods12010130>
- Vallejo-Castillo, V., Rodríguez-Stouvenel, A., Martínez, R., & Bernal, C. (2020). Development of alginate-pectin microcapsules by the extrusion for encapsulation and controlled release of polyphenols from papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Biochemistry*, 44(9). <https://doi.org/10.1111/jfbc.13331>
- Wongverawattanakul, C., Suklaew, P. O., Chusak, C., Adisakwattana, S., & Thilavech, T. (2022). Encapsulation of *Mesona chinensis* Benth Extract in Alginate Beads Enhances the Stability and Antioxidant Activity of Polyphenols under Simulated Gastrointestinal Digestion. *Foods*, 11(15), 2378. <https://doi.org/10.3390/foods11152378>
- Zhang, X., Zhao, Y., Wu, X., Liu, J., Zhang, Y., Shi, Q., & Fang, Z. (2021). Ultrasonic-assisted extraction, calcium alginate encapsulation and storage stability of mulberry pomace phenolics. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 15(5), 4517–4529. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01021-6>