



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

POSGRADO EN CIENCIAS EN BIOPROCESOS

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE VEHÍCULOS COMESTIBLES
PARA EL EXTRACTO NATURAL DE VAINILLA**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN BIOPROCESOS

PRESENTA:

Bárcenas Manzanares Mariana

Director de Tesis: **Dr. Jaime David Pérez Martínez**

Codirector de Tesis: **Dr. Pedro Aguilar Zárate**



UASLP-Sistema de bibliotecas

Repositorio Institucional Tesis Digitales Restricciones de Uso

DERECHOS RESERVADOS

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en este Trabajo Terminal está protegido por la Ley Federal de Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos.

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo, mencionando el autor o autores.

Cualquier uso distinto o con fines de lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Desarrollo y evaluación de vehículos comestibles para el extracto natural de vainilla © 2026 por Mariana Bárcenas Manzanares se distribuye bajo una licencia de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International.

Este proyecto se realizó en el Laboratorio de Biopolímeros Alimentarios de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el Laboratorio Nacional CONAHCYT de apoyo a la evaluación de productos bióticos (LaNAEPBi) en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, en el periodo comprendido de octubre agosto 2024 y agosto 2026, bajo la dirección del Dr. Jaime David Pérez Martínez y el Dr. Pedro Aguilar Zárate.

El programa de Maestría en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí pertenece al Sistema Nacional de Posgrados de Calidad (SNP) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), registro 000588. Número de la beca otorgada por SECIHTI: 00058. Número de CVU:2045152

Los datos del trabajo titulado “Desarrollo y evaluación de vehículos comestibles para el extracto natural de vainilla” se encuentran bajo el resguardo de la Facultad de Ciencias Químicas y pertenecen a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

El presente proyecto de investigación forma parte de las actividades del Proyecto ApoyoLN_2025-C-21 Bioprospección de recursos etnoflorísticos y coproductos agroindustriales con potencial aplicación biomédica y tecnofuncional en el Laboratorio Nacional CONAHCYT de Apoyo a la Evaluación de Productos Bióticos.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Bioprocesos
Programa de Maestría

Formato M12

Aprobación de Tema de Tesis

San Luis Potosí SLP a 10/ 05 /2026

**Director de Tesis
Presente**

Por este conducto le informo a usted que el tema de Tesis de maestría:
DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE VEHÍCULOS COMESTIBLES PARA EL EXTRACTO
NATURAL DE VAINILLA

Que desarrollará la persona estudiante: Mariana Bárcenas Mazanares, que se llevará a cabo en el laboratorio de Biopolímeros alimentarios de la Facultad de Ciencias Químicas, ha sido APROBADO.

Sin más por el momento, quedo de Uds.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias en Bioprocesos

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE VEHÍCULOS COMESTIBLES PARA EL EXTRACTO NATURAL DE VAINILLA

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Bioprocesos

Presenta:

Bárcenas Manzanares Mariana

SINODALES:

Presidente: Dra. Elena Dibildox Alvarado

Secretario: Dr. Pedro Aguilar Zárate

Vocal: Dr. Jaime David Pérez Martínez

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

FECHA: octubre 2026

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL ACADÉMICO

Dr. Jaime David Pérez Martínez: Director de tesis. Adscrito al Posgrado en Ciencias en Bioprocesos en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Dr. Pedro Aguilar Zárate: Codirector de tesis. Adscrito al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, S.L.P.

Dra. Elena Dibildox Alvarado: Asesora de tesis. Adscrita al Posgrado en Ciencias en Bioprocesos en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

Facultad de Ciencias Químicas

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Posgrado en Ciencias en Bioprocesos

Programa de Maestría

Formato M5

Carta Cesión de Derechos

San Luis Potosí SLP a 10/ 01 /2026

En la ciudad de San Luis Potosí el día 01 del mes de octubre del año 2026

El que suscribe Mariana Bárcenas Manzanares Alumno(a) del programa de posgrado Ciencias en Bioprocesos adscrito a Facultad de Ciencias Químicas manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo terminal, realizado bajo la dirección de: Dr. Jaime David Pérez Martínez y cede los derechos del trabajo titulado Desarrollo y evaluación de vehículos comestibles para el extracto natural de vainilla a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir de forma total o parcial texto, gráficas, imágenes o cualquier contenido del trabajo si el permiso expreso del o los autores. Éste, puede ser obtenido directamente con el autor o autores escribiendo a la siguiente dirección marianab13m@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Bioprocesos
Programa de Maestría

Formato M28

Carta de Análisis de Similitud

San Luis Potosí SLP a 30/09/2026

LB. María Zita Acosta Nava
Biblioteca de Posgrado
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Asunto: Reporte de porcentaje de similitud de tesis de grado

Por este medio me permito informarle el porcentaje de similitud obtenido mediante Ithenticate para la tesis titulada "DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE VEHÍCULOS COMESTIBLES PARA EL EXTRACTO NATURAL DE VAINILLA", presentada por la autora Mariana Bárcenas Manzanares. La tesis es requisito para obtener el grado de Maestría en el Posgrado en Ciencias en Bioprocesos. El análisis reveló un porcentaje de similitud de 5% excluyendo referencias y metodología.

Agradezco sinceramente su valioso tiempo y dedicación para llevar a cabo una exhaustiva revisión de la tesis. Quedo a su disposición para cualquier consulta o inquietud que pueda surgir en el proceso.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

Agradecimientos académicos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores de tesis, el Dr. Jaime David Pérez Martínez y el Dr. Pedro Aguilar Zárate, por su guía, paciencia y valiosas aportaciones durante el desarrollo de este trabajo. Su acompañamiento académico y humano fue fundamental para la culminación de este proyecto.

A mi comité tutorial, el Dr. Jaime David Pérez Martínez, el Dr. Pedro Aguilar Zárate y la Dra. Elena Dibildox Alvarado, quienes me acompañaron durante el desarrollo de esta tesis. Su constante seguimiento en cada uno de los seminarios, así como las valiosas observaciones y retroalimentaciones brindadas a lo largo del proceso, fueron fundamentales para fortalecer mi formación académica y enriquecer la calidad de este trabajo.

Así mismo, agradezco al jurado de examen, integrado por los mismos doctores junto con la Dra. Mariela Ramona Michel Michel, cuya participación y aportaciones resultaron igualmente valiosas, sus observaciones críticas y recomendaciones enriquecieron de manera significativa el presente trabajo.

A la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y al Laboratorio Nacional CONAHCYT de apoyo a la evaluación de productos bióticos (LaNAEPBi), por brindarme los espacios, recursos y apoyo técnico necesarios para la realización de los experimentos.

Agradecimientos personales

A mis compañeros de laboratorio y colegas del posgrado, quienes con su colaboración, consejos y amistad hicieron más enriquecedor este proceso de investigación.

Finalmente, agradezco profundamente a mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y aliento constante. Su confianza y cariño fueron el motor que me impulsó a superar cada reto y alcanzar esta meta.

RESUMEN

Se obtuvieron vehículos comestibles para el extracto natural de vainilla mediante la evaluación de dos metodologías de encapsulación: secado por aspersión y gelificación iónica. En el secado por aspersión se evaluaron cuatro factores experimentales: flujo de alimentación, temperatura de entrada, flujo de aire y la concentración de maltodextrina. La eficiencia de encapsulación (EE) de los tratamientos osciló entre $29.66 \pm 0.09\%$ - $69.95 \pm 0.06\%$, mostrando una relación positiva con la concentración de maltodextrina y un efecto inverso con la temperatura de entrada. Las pruebas de actividad antioxidante alcanzaron valores óptimos de inhibición de inhibición ABTS de $92.75 \pm 2.78\%$ (0.120 mg/mL vainillina) y un IC_{50} de 0.02 mg/mL de vainillina, confirmando la preservación de compuestos fenólicos. Las microcápsulas presentaron fluidez aceptable (ángulo de reposo $< 40^\circ$), densidades adecuadas, humedad de $3.94 \pm 0.29 \%$, actividad de agua de 0.32 ± 0.03 y una temperatura de transición vítrea de $55.4 \pm 0.58 \text{ }^\circ\text{C}$, sugiriendo estabilidad al almacenamiento. En la gelificación iónica, se evaluaron concentración de alginato, dextrosa anhidra, y CaCl_2 , y tiempo de residencia en la solución de reticulación. La EE alcanzó valores de 99.82 - $99.95 \pm 0.00\%$, la retención de líquido (RL) varió entre $41.36 \pm 0.83\%$ y $82.45 \pm 0.46\%$, siendo la concentración de alginato el factor más determinante para ambas. Las perlas mostraron resistencia térmica hasta $60 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que la textura instrumental indicó dureza ($1278.8 \pm 362 \text{ g}$), resiliencia (0.3 ± 0.0), fracturabilidad ($195.3 \pm 48.4 \text{ g}$) y adhesividad (87.7 ± 8.6) adecuadas para aplicaciones alimentarias.

Palabras clave: vainilla, encapsulación, secado por aspersión, gelificación iónica

ABSTRACT

Edible vehicles for natural vanilla extract were obtained through the evaluation of two encapsulation methodologies: spray drying and ionic gelation. In spray drying, four experimental factors were assessed: feed flow, inlet temperature, air flow, and maltodextrina concentration. The encapsulation efficiency (EE) of the treatments ranged from $29.66 \pm 0.09\%$ - $69.95 \pm 0.06\%$, showing a positive relationship with maltodextrina concentration and an inverse effect with inlet temperature. Antioxidant activity test reached optimal ABTS inhibition values of $92.75 \pm 2.78\%$ (0.120 mg/mL vanillin) and an IC_{50} of 0.02 mg/mL vanillin, confirming the preservation of phenolic compounds. The microcapsules exhibited acceptable flowability (angle of repose $<40^\circ$), adequate densities, moisture content of $3.94 \pm 0.29\%$, water activity of 0.32 ± 0.03 , and a glass transition temperature of $55.4 \pm 0.58^\circ\text{C}$, suggesting storage stability. In ionic gelation, alginate concentration, anhydrous dextrose, CaCl_2 concentration, and residence time in the crosslinking solution were evaluated. EE values reached $99.82 - 99.95 \pm 00.00\%$, while liquid retention (LR) varied between $41.36 \pm 0.83\%$ and $82.45 \pm 0.46\%$, with alginate concentration being the most determinant factor for both responses. The beads showed thermal resistance up to 60°C , while instrumental texture analysis indicated hardness ($1278.8 \pm 362\text{g}$), resilience (0.3 ± 0.0), fracturability (195.3 ± 48.4), and adhesiveness (87.7 ± 8.6) suitable for food applications.

Keywords: vanilla, encapsulation, spray drying, ionic gelation

Índice

1. Introducción	1
1.1. Vainilla: aspectos generales	1
1.1.1. Producción y consumo	1
1.1.2. Clasificación y comercialización	2
1.2. Encapsulación	3
2. Antecedentes	4
2.1. Secado por aspersión	4
2.1.1. Formulación de la materia prima	4
2.1.2. Materiales de encapsulación	5
2.1.3. Solubilidad	6
2.1.4. Temperatura de transición vítrea	7
2.1.5. Modificación de la viscosidad	8
2.1.6. Características físicas y funcionales	9
2.1.7. Actividad superficial	11
2.2. Gelificación iónica y extrusión	12
2.2.1. Composición de la matriz encapsulante	13
2.2.2. Efecto del pH y la temperatura	14
2.2.3. Composición de la solución de gelificación	15
2.2.4. Tiempo de reacción	16
3. Justificación	18
4. Hipótesis	18
5. Objetivos	19
5.1. Objetivo general	19
5.2. Objetivos específicos	19
6. Materiales y métodos	20
6.1. Materiales	20
6.2. Cuantificación de vainillina	20
6.3. Microencapsulación vía secado por aspersión	21
6.3.1. Eficiencia de encapsulación	21
6.3.2. Actividad antioxidante	22
6.3.2.1. Ensayo ABTS	22

6.3.2.2	Ensayo DPPH	22
6.3.2.3	Inhibición de la oxidación lipídica	23
6.3.3	Indicadores de fluidez y manejabilidad de las microcápsulas	24
6.3.3.1	Ángulo de reposo	24
6.3.3.2	Densidad aparente.....	24
6.3.3.3	Densidad compactada.....	24
6.3.3.4	Porcentaje de compresibilidad e índice de Hausner	25
6.3.4	Indicadores de estabilidad al almacenamiento.....	25
6.3.4.1	Contenido de humedad	25
6.3.4.2	Actividad de agua	25
6.3.4.3	Temperatura de transición vítrea	25
6.4.	Encapsulación por gelificación iónica	26
6.4.1	Eficiencia de encapsulación.....	26
6.4.2	Capacidad de retención de líquido	27
6.4.3	Evaluación de estabilidad térmica.....	27
6.4.4	Evaluación de textura instrumental	27
6.5.	Análisis estadístico.....	28
7.	Resultados y discusión	29
7.1.	Microencapsulación vía secado por aspersión	29
7.1.1.	Eficiencia de encapsulación	29
7.1.2.	Análisis de Taguchi para las condiciones óptimas de encapsulación ...	37
7.1.3.	Actividad antioxidante	37
7.1.4.	Indicadores de fluidez y manejabilidad de las microcápsulas	40
7.1.5.	Indicadores de estabilidad al almacenamiento	41
7.2.	Encapsulación por gelificación iónica.....	43
7.2.1.	Capacidad de retención de líquido	43
7.2.2.	Eficiencia de encapsulación	51
7.2.3.	Análisis de Taguchi para las condiciones óptimas de encapsulación ...	56
7.2.4.	Evaluación de estabilidad térmica	57
7.2.5.	Evaluación de textura instrumental	59
8.	Conclusiones	61
9.	Referencias bibliográficas	63

10. Análisis de similitud.....	71
---------------------------------------	-----------

1. Introducción

1.1. Vainilla: aspectos generales

La vainilla (*Vanilla planifolia Andrews*) es una orquídea trepadora tropical originaria de Mesoamérica, especialmente en zonas boscosas tropicales como lo es México (Luis-Rojas et al., 2020). Es reconocida por la producción de vainas aromáticas que contienen compuestos volátiles de alto valor comercial, entre ellos la vainillina, la principal responsable de su característico aroma (Herrera-Cabrera et al., 2022).

Esta especie ha sido cultivada desde tiempos prehispánicos en México; particularmente el estado de Veracruz es considerado el lugar de origen de su domesticación (Enríquez García et al., 2025; Luis-Rojas et al., 2020). Esta orquídea requiere de condiciones agroclimáticas específicas para su crecimiento y tiene un periodo de maduración de 8 a 9 meses (Rodríguez-Deméneghi et al., 2023).

En México, el estado de Veracruz encabeza la lista de estados productores con un 76.4% del volumen total de producción (417 toneladas), seguido por Puebla, con un 11.8% y después el estado de Oaxaca, con un 10.2% (Luis-Rojas et al., 2020). Adicional a estos, es relevante mencionar que la Huasteca Potosina también contribuye a la producción nacional con un porcentaje de 1.3%. Estas producciones son obtenidas principalmente por pequeños productores (Enríquez García et al., 2025; Luis-Rojas et al., 2020).

1.1.1. Producción y consumo

En México, entre los años 2017 y 2021, se tuvo una producción promedio de 546 toneladas de vainilla entera por año, lo que representa una cantidad de \$426 000 000 anuales, con una tasa media de 4.3% de crecimiento anual, posicionando al país en el tercer lugar de producción de vainilla a nivel mundial, con un 7.8% de la producción total en el año (Enríquez García et al., 2025; Luis-Rojas et al., 2020). En cuanto a la demanda internacional de la vainilla, Estados Unidos encabeza la lista de países

consumidores, con un 40% del total de las ventas, seguido por Francia (22.9% de las ventas) y Alemania (8.5% del total de las ventas) (Rodríguez-Deméneghi et al., 2023).

1.1.2. Clasificación y comercialización

Una vez que la vainilla es cosechada, las vainas se clasifican de acuerdo a su tamaño y características físicas, para determinar su mercado (Herrera-Cabrera et al., 2022). Las vainas que poseen un tamaño de 12 cm o más, una flexibilidad adecuada y una apariencia sin defectos estéticos, se destinan para su venta como vainas de calidad premium y gourmet, teniendo aplicaciones culinarias de alta gama. Por su parte, las vainas que presentan tamaños menores a 12 cm y con defectos estéticos, serán procesadas para ser utilizadas en los extractos y concentrados (NMX-FF-074-SCFI-2009, Secretaría de Economía, 2009).

Posterior a su cosecha, las vainas se someten a un proceso de curado para la extracción de sus componentes aromáticos, el cual se compone por 4 etapas principales: escaldado, sudado, secado y reposo (Herrera-Cabrera et al., 2022; Xochipa-Morante et al., 2016). Todas estas etapas conllevan un periodo de tiempo de 6 meses aproximadamente y el rendimiento que se obtiene es bajo debido a la pérdida de los compuestos aromáticos durante el curado de las vainas, lo que conlleva a una elevación de su precio al momento de venderse (Herrera-Cabrera et al., 2022; NMX-FF-074-SCFI-2011, Secretaría de Economía, 2011; Xochipa-Morante et al., 2016) . Las vainas que no presentan calidad premium o gourmet después del curado, son destinadas a la producción de extractos y concentrados. Para este proceso, las vainas curadas son inmersas en etanol de grado alimenticio (30%-50%) durante semanas a temperaturas de entre 50°C y 70°C. Posteriormente, el extracto es filtrado y embotellado (NMX-FF-074-SCFI-2011, Secretaría de Economía, 2011).

Este proceso presenta desventajas significativas, como lo es el contenido residual de alcohol en el extracto (aprox. 35%), la susceptibilidad a la oxidación del mismo, el gran volumen de almacenamiento que implica una formulación en estado líquido, los bajos rendimientos que conllevan a elevados costos y la competencia con la vainilla sintética

(Enríquez García et al., 2025; Herrera-Cabrera et al., 2022.).

1.2. Encapsulación

La encapsulación de compuestos aromáticos y saborizantes representa una estrategia clave frente a esta serie de desventajas. Esta técnica consiste en encerrar ingredientes bioactivos en una matriz sólida o líquida, brindando protección ambiental, estabilidad, funcionalidad, mejorando la solubilidad y controlando la liberación del compuesto de interés, en este caso, la vainilla (Ocampo-Salinas et al., 2020; Hernández-Fernández et al., 2020; Calva-Estrada et al., 2018).

Existen diferentes métodos de encapsulamiento, como lo son el secado por aspersión, la coacervación compleja, la liofilización, la gelificación iónica, entre otros. Para este estudio, se evaluarán 2 de estos métodos de encapsulamiento: secado por aspersión y gelificación iónica.

2. Antecedentes

2.1. Secado por aspersión

El secado por aspersión es una técnica ampliamente utilizada en las industrias alimentaria, farmacéutica y química para transformar materias primas líquidas en polvos mediante la atomización en microgotas que entran en contacto con una corriente de aire caliente, lo que provoca la rápida evaporación del disolvente y la formación de partículas secas (Nik Abd Rahman et al., 2024; Santos et al., 2018) . Este proceso permite conservar los compuestos biológicos sensibles al calor, mantiene la integridad de los componentes bioactivos en condiciones térmicas más agresivas, mejora la estabilidad de los ingredientes funcionales y facilita su manipulación y almacenamiento (Piñón-Balderrama et al., 2020; García Carvajal y Espinosa-Andrews, 2017).

Gracias a su capacidad para lograr un secado rápido, continuo y eficiente, el secado por atomización ha adquirido especial relevancia en el desarrollo a escala industrial de productos de valor añadido, como alimentos funcionales, suplementos nutricionales y aromas encapsulados (Kandasamy y Naveen, 2022; Shishir y Chen, 2017; Piñón-Balderrama et al., 2020).

2.1.1. Formulación de la materia prima

La preparación y estandarización de la materia prima líquida constituye la etapa inicial del proceso. Dado que la técnica puede aplicarse a soluciones, suspensiones o emulsiones, esta etapa puede implicar diferentes operaciones preparatorias (Santos et al., 2018; Nik Abd Rahman et al., 2024). Tras su producción, extracción o purificación, los productos biológicos pueden requerir una pre-concentración, emulsificación, reducción del tamaño de las partículas, ajuste del pH e incorporación de materiales de encapsulación o aditivos estabilizadores para mejorar su biodisponibilidad y vida útil (Nik Abd Rahman et al., 2024; Kandasamy y Naveen, 2022; Shishir y Chen, 2017; Santos et al., 2018).

En particular, las suspensiones y emulsiones deben formularse adecuadamente para evitar fenómenos como la floculación de partículas, la agregación, la sedimentación, la separación en capas y la separación de fases durante la etapa de alimentación, debido a que pueden provocar variabilidad en la composición del polvo resultante, la obstrucción de las boquillas, ocasionando la interrupción del proceso (Kandasamy y Naveen, 2022; Santos et al., 2018; Piñón-Balderrama et al., 2020). Aunque algunos de estos problemas pueden mitigarse mediante la agitación continua dentro del recipiente de alimentación, la agitación mecánica por sí sola suele ser insuficiente para prevenir por completo la inestabilidad, especialmente en sistemas con un alto contenido de fase dispersa o una estabilización interfacial débil (Nik Abd Rahman et al., 2024; García Carvajal y Espinosa-Andrews, 2017).

2.1.2. Materiales de encapsulación

Los materiales de encapsulación, comúnmente denominados excipientes o materiales de pared, forman una matriz protectora alrededor del compuesto activo, lo que limita su exposición a factores ambientales como el oxígeno, la luz y la humedad, y mejora la estabilidad durante el procesamiento y el almacenamiento (Díaz-Montes, 2023).

Más allá de su función protectora, estos materiales pueden utilizarse para diseñar vectores de administración funcionales. En concreto, los biopolímeros pueden emplearse para producir polvos vítreos y de flujo libre que se caracterizan por una movilidad molecular reducida (Shishir y Chen, 2017; Kandasamy y Naveen, 2022). La formación de una matriz vítrea restringe las reacciones impulsadas por la difusión, lo que ralentiza los procesos de degradación y mejora la estabilidad de almacenamiento de los compuestos biológicos (Piñón-Balderrama et al., 2020; Nik Abd Rahman et al., 2024; Santos et al., 2018). Al mismo tiempo, estas matrices pueden adaptarse para facilitar la liberación de los compuestos encapsulados al entrar en contacto con el medio de administración (Kandasamy y Naveen, 2022; Nik Abd Rahman et al., 2024).

La selección de los materiales de encapsulación depende de varios criterios fisicoquímicos y tecnológicos, entre los que se incluyen:

- Alta solubilidad en el medio que contiene el compuesto biológico
- Alta temperatura de transición vítrea (T_g)
- Baja viscosidad a la concentración de sólidos requerida
- Compatibilidad fisicoquímica con el compuesto biológico (p. ej., polaridad similar o interacciones electrostáticas favorables)
- Actividad superficial o capacidad emulsionante cuando están presentes tanto fases hidrofílicas como lipofílicas
- Estabilidad en condiciones térmicas y oxidativas

Teniendo en cuenta que el secado por aspersión de productos biológicos suele requerir formulaciones de alimentación con un contenido de sólidos totales del 35 al 45% (Ocampo-Salinas et al., 2020), en las que el material de encapsulación representa la fracción principal, es esencial garantizar que el material de la pared seleccionado se adapte de forma óptima a la aplicación prevista en lo que respecta a los parámetros mencionados anteriormente.

2.1.3. Solubilidad

El material de encapsulación debe ser totalmente soluble en la fase continua y permanecer estable en el medio (Shishir y Chen, 2017; Nik Abd Rahman et al., 2024; Díaz-Montes, 2023). La fase continua suele ser acuosa; sin embargo, también puede contener co-solventes como el etanol o el glicerol, así como concentraciones variables de ácidos orgánicos y sales, que pueden favorecer la precipitación de ciertas fracciones del material de encapsulación (Shishir y Chen, 2017). Por ejemplo, la maltodextrina y la goma arábica se utilizan ampliamente en sistemas acuosos porque se disuelven fácilmente y mantienen la estabilidad durante el secado por aspersión (Kandasamy y Naveen, 2022; Piñón-Balderrama et al., 2020; Hernández-Fernández et al., 2020).

Por el contrario, proteínas como el caseinato de sodio o el aislado de proteína de suero pueden perder solubilidad cuando la concentración de etanol supera el 20 %, lo que provoca la agregación y la precipitación parcial (Calva-Estrada et al., 2018; Kandasamy y Naveen, 2022; Aguirre-Alonso et al., 2019). Del mismo modo, el alginato y la pectina pueden precipitar en presencia de sales divalentes como el cloruro de calcio (Shishir y Chen, 2017; Bennacef et al., 2021; Lee y Rogers, 2012), mientras que el carragenina puede desestabilizarse en medios ácidos ($\text{pH} < 4$), formando geles en lugar de permanecer soluble (Díaz-Montes, 2023).

2.1.4. Temperatura de transición vítrea

Los polvos secados por atomización suelen ser sólidos amorfos, que pueden encontrarse tanto en estado vítreo, como en estado gomoso. Los polvos en estado vítreo fluyen con facilidad, se mantienen estables y pueden transportarse mediante sistemas neumáticos, mientras que los polvos en estado gomoso pierden fluidez, se adhieren a las paredes de los recipientes y forman aglomeraciones. Para que un material amorfo permanezca en estado vítreo, debe almacenarse por debajo de su T_g , ya que las temperaturas superiores a la T_g favorecen la transición al estado elastomérico, lo que aumenta la pegajosidad y la estabilidad (Nik Abd Rahman et al., 2024; Shishir y Chen, 2017).

La T_g de los materiales de las paredes depende de varios factores. Un mayor peso molecular del agente encapsulante suele aumentar la T_g , mientras que la presencia de plastificantes como el glicerol, el sorbitol o el agua la reduce al mejorar la movilidad molecular. El contenido de humedad desempeña un papel fundamental, ya que el agua absorbida actúa como un potente plastificante que reduce la T_g de forma significativa. Además, la composición química del material de la pared influye en su T_g intrínseca, ya que los hidratos de carbono, las proteínas y las gomas presentan un comportamiento térmico diferente.

Por último, las interacciones con solutos como sales, ácidos o cosolventes pueden modificar la Tg en función de su afinidad con la matriz. Debe tenerse muy en cuenta la presencia y la estabilidad de los compuestos no volátiles en la formulación, ya que los solutos de bajo peso molecular pueden reducir la Tg de la matriz encapsulante, lo que aumenta la movilidad molecular y compromete la estabilidad física del polvo resultante (Nik Abd Rahman et al., 2024; Shishir y Chen, 2017).

Una reducción de la Tg puede favorecer la pegajosidad, la aglomeración de partículas, el colapso estructural y la degradación química acelerada durante el almacenamiento (Nik Abd Rahman et al., 2024; Mochizuki et al., 2021; Shishir y Chen, 2017). Por ejemplo, cuando se incorpora glicerol a matrices a base de maltodextrina, su naturaleza higroscópica y plastificante reduce significativamente la Tg. Esta reducción de la Tg aumenta la movilidad molecular, lo que conduce a una mayor pegajosidad y aglomeración del polvo durante el almacenamiento (Nik Abd Rahman et al., 2024; Shishir y Chen, 2017). En los sistemas de secado por atomización, la maltodextrina por sí sola puede presentar una Tg superior a 100 °C, pero la adición de glicerol puede reducirla por debajo de los 60 °C, lo que hace que el polvo sea más propenso al colapso y a la degradación química en condiciones ambientales (Roos y Drusch, 2015; Roussanova et al., 2014; Mochizuki et al., 2021; García-Coronado et al., 2020).

2.1.5. Modificación de la viscosidad

También debe tenerse en cuenta el impacto de los biopolímeros de alto peso molecular en la viscosidad de la materia prima para cumplir con los límites operativos del sistema de bombeo y del equipo de atomización utilizado en el secador por pulverización (Shishir y Chen, 2017; Kandasamy y Naveen, 2022). Por ejemplo, en equipos a escala de laboratorio como el secador por aspersión Büchi Mini B-290 el fabricante especifica que las viscosidades de la materia prima superiores a aproximadamente 370 mPa·s comprometen la eficiencia de atomización y aumentan el riesgo de obstrucción de las boquillas. Por el contrario, estudios a escala piloto han indicado que se pueden procesar viscosidades de hasta 500 mPa·s con sistemas de atomización

especializados, aunque con una estabilidad reducida y una mayor demanda energética (Ballesteros Martínez y Gaukel, 2025; Gharsallaoui et al., 2007).

Además, la viscosidad de la materia prima influye considerablemente en la morfología del polvo y en el rendimiento del secado (Santos et al., 2018). Las viscosidades elevadas, que suelen considerarse por encima de 300-500 mPa-s, favorecen la formación de gotas más grandes, lo que aumenta el riesgo de un secado incompleto y la presencia de partículas húmedas. Por el contrario, las viscosidades muy bajas, normalmente por debajo de 50-100 mPa-s, suelen ser óptimas para los secadores por atomización a escala de laboratorio y piloto, ya que equilibran la eficiencia de atomización con la estabilidad del polvo, produciendo gotas más pequeñas que pueden ser arrastradas por el flujo de aire de secado, lo que reduce la recuperación del polvo y el rendimiento del proceso (Santos et al., 2018; Kandasamy y Naveen, 2022). Además, el aumento de la viscosidad de la materia prima suele ir acompañado de una reducción de la temperatura del aire de salida, lo que refleja la mayor carga térmica del sistema (Santos et al., 2018; Kandasamy y Naveen, 2022).

2.1.6. Características físicas y funcionales

Los materiales de encapsulación más utilizados son los polisacáridos, como la maltodextrina, el almidón modificado, el alginato, el quitosano, la goma arábica, la goma karaya, la goma xantana, la pectina y la carragenina, debido a su alta solubilidad en agua, su baja viscosidad y su capacidad para formar polvos con una densidad aparente relativamente alta (Shishir y Chen, 2017). Se emplean principalmente para encapsular aromas, compuestos fenólicos y vitaminas, aportando estabilidad térmica y una buena dispersión en las matrices alimentarias (Caliskan y Dirim, 2016). Además, muchos polisacáridos presentan una gran capacidad para formar películas y geles (Díaz-Montes, 2023; Shishir y Chen, 2017), lo que aporta propiedades de viscosidad y estructurales que favorecen la liberación controlada de compuestos bioactivos (Díaz-Montes, 2023).

Las proteínas, como el caseinato de sodio, el aislado de proteína de suero y la gelatina, ofrecen propiedades gelificantes, emulsionantes y espumantes, lo que facilita la formación de matrices rígidas (Díaz-Montes, 2023). Las ceras se emplean en la encapsulación debido a su alta resistencia a la degradación hidrolítica y a su hidrofobicidad (Díaz-Montes, 2023). Estos materiales también presentan limitaciones relacionadas con el coste operativo, la sensibilidad a la humedad y las condiciones de almacenamiento, así como posibles interacciones con el compuesto encapsulado que pueden alterar su funcionalidad. Por lo tanto, la selección de un agente encapsulante adecuado es crucial para la eficiencia del proceso (Kandasamy y Naveen, 2022; Shishir y Chen, 2017; Santos et al., 2018).

En este contexto, el secado por aspersión representa una técnica con un potencial significativo para la encapsulación de compuestos como la vainilla, cuyos componentes aromáticos son altamente volátiles y termolábiles (Calva-Estrada et al., 2018; Hernández-Fernández et al., 2020; Aguirre-Alonso et al., 2019; Ocampo-Salinas et al., 2020). El secado por aspersión permite proteger estos compuestos, conservar su perfil aromático y mejorar su estabilidad durante el almacenamiento, lo que facilita su aplicación en diversas matrices alimentarias, como bebidas, productos de panadería y confitería (Aguirre-Alonso et al., 2019; Calva-Estrada et al., 2018; Ocampo-Salinas et al., 2020). Además, la combinación de diferentes biopolímeros con funcionalidades complementarias puede mejorar la eficiencia de la encapsulación y permitir la liberación controlada de compuestos bioactivos (Piñón-Balderrama et al., 2020; Nik Abd Rahman et al., 2024; Díaz-Montes, 2023; Shishir y Chen, 2017).

Una vez homogeneizada, la solución se expone al aire caliente durante un breve periodo, lo que permite la evaporación del agua al tiempo que se mantiene una temperatura baja en el producto final. Tanto la corriente de aire como la solución se introducen simultáneamente en el sistema, ya sea en configuraciones paralelas, a contracorriente o mixtas, con un filtro y un calentador. El material sólido resultante se aísla posteriormente mediante separadores ciclónicos y/o filtros para evitar que los

polvos finos sean arrastrados por la corriente de aire (Shishir y Chen, 2017; Santos et al., 2018).

Los principios que subyacen al proceso se basan en fenómenos de transferencia de calor y masa, en los que factores como la temperatura del aire de entrada y salida, el caudal de aire, la composición de la mezcla y el caudal de alimentación influyen en la eficiencia del secado y en las características del producto final (Shishir y Chen, 2017; Nik Abd Rahman et al., 2024; Santos et al., 2018). Sin embargo, estas no son las únicas variables que influyen en el resultado; las especificaciones de la materia prima y otros parámetros del proceso confieren características distintivas al producto resultante, lo que afecta directamente a su morfología, tamaño y contenido de humedad residual. Por lo tanto, es esencial comprender a fondo estas variables para optimizar el proceso (Santos et al., 2018).

2.1.7. Actividad superficial

La actividad superficial de los materiales de recubrimiento se refiere a su capacidad para reducir la tensión interfacial entre fases con diferentes niveles de hidrofobicidad. Los materiales con actividad superficial pueden emplearse para estabilizar mezclas que contengan una fase hidrofóbica, como las emulsiones de aceite en agua (Díaz-Montes, 2023; Nik Abd Rahman et al., 2024; Santos et al., 2018; Shishir & Chen, 2017). Entre los ejemplos típicos de biomateriales con actividad superficial se incluyen las proteínas (ej., aislado de proteína de suero, caseinato de sodio, gelatina) (Díaz-Montes, 2023; Santos et al., 2018). En estos casos, es esencial analizar la calidad y la estabilidad de las emulsiones para evitar variaciones en las propiedades de los polvos resultantes (Díaz-Montes, 2023; Nik Abd Rahman et al., 2024; Piñón-Balderrama et al., 2020; Santos et al., 2018; Shishir & Chen, 2017).

Pueden ser necesarios procesos adicionales, como la homogeneización a alta presión o la ultrasonificación, para garantizar la uniformidad de las gotas y la estabilidad a largo plazo (Díaz-Montes, 2023; Piñón-Balderrama et al., 2020; Santos et al., 2018). Una

tensión superficial excesivamente alta dificulta la atomización y da lugar a la formación de gotas grandes, mientras que una tensión superficial excesivamente baja puede provocar inestabilidad en la formación de partículas (Díaz-Montes, 2023; Nik Abd Rahman et al., 2024; Santos et al., 2018; Shishir & Chen, 2017).

Los materiales de las paredes con actividad superficial también pueden tener el efecto secundario de favorecer la formación de espuma, no solo durante la agitación, sino también durante las operaciones de bombeo, ya que el cizallamiento mecánico y la turbulencia pueden atrapar aire en la solución de alimentación (Díaz-Montes, 2023; Shishir & Chen, 2017). Por ejemplo, se sabe que el caseinato de sodio y el aislado de proteína de suero generan espumas estables bajo agitación mecánica, mientras que la goma arábiga también puede contribuir a la formación de espuma en sistemas emulsionados (Díaz-Montes, 2023). Si este fenómeno se produce de forma inmediata durante el proceso, se recomienda emplear materiales de pared sin actividad superficial, como la maltodextrina o las ciclodextrinas, o bien utilizar agentes antiespumantes para controlar la formación excesiva de espuma (Díaz-Montes, 2023; Nik Abd Rahman et al., 2024; Piñón-Balderrama et al., 2020; Santos et al., 2018; Shishir & Chen, 2017).

2.2. Gelificación iónica y extrusión

Técnicas físicas como la extrusión y la gelificación iónica se consolidaron como alternativas suaves al secado por aspersión, gracias a su capacidad de preservar probióticos y compuestos termolábiles (Sun et al., 2024; Bubin et al., 2019; Bennacef et al., 2021; Arriola et al., 2019; Sa et al., 2018; Lee y Rogers, 2012; Julián-Flores et al., 2025). Estas metodologías se basan en la formación de hidrogeles poliméricos, redes tridimensionales capaces de retener agua y atrapar moléculas bioactivas, cuya estabilidad depende de la interacción entre biopolímeros polianiónicos y cationes divalentes (Bennacef et al., 2021; Bubin et al., 2019; Arriola et al., 2019; Sun et al., 2024).

En la extrusión electrostática, gotas de soluciones poliméricas que contienen el compuesto activo se liberan en un baño de gelificación, donde ocurre el entrecruzamiento iónico, generando perlas de tamaño y morfología controlados (Frakolaki et al., 2022). La gelificación iónica, de manera similar, aprovecha la afinidad entre polímeros polianiónicos y iones calcio para formar redes de hidrogel que proporcionan integridad estructural y protección (Arriola et al., 2019; Bennacef et al., 2021).

2.2.1. Composición de la matriz encapsulante

La preparación de la mezcla que se va a encapsular constituye una fase decisiva en el éxito de la extrusión y la gelificación iónica, ya que de ella depende la eficiencia de encapsulación, la estabilidad del compuesto activo y la calidad sensorial del producto final (Bennacef et al., 2021; Julián-Flores et al., 2025). En primer lugar, se debe considerar la naturaleza del compuesto activo: probióticos, prebióticos, polifenoles, aromas, vitaminas o lípidos. Estos compuestos presentan diferentes sensibilidades frente a temperatura, pH y oxígeno, por ejemplo, la vainillina es altamente volátil y termolábil, lo que sugiere a trabajar en condiciones suaves y con polímeros capaces de reducir fugas (Bennacef et al., 2021; Lee & Rogers, 2012; Sa et al., 2018; Sun et al., 2024). La selección del polímero encapsulante es un aspecto fundamental en la preparación de la solución a encapsular.

El alginato es un polisacárido aniónico formado por bloques de ácido D-manurónico (M) y ácido L-gulurónico (G), que se organizan en secuencias homopoliméricas y heteropoliméricas, capaces de formar geles mediante enlaces iónicos con cationes divalentes como el calcio (Bennacef et al., 2021). Este polisacárido es el más utilizado en la extrusión y gelificación iónica debido a su biocompatibilidad y capacidad de formar geles, además de que puede combinarse con pectina, carragenina, quitosano o proteínas para mejorar resistencia mecánica y controlar la liberación (Arriola et al., 2019; Bennacef et al., 2021; Sun et al., 2024).

La concentración del polímero debe mantenerse en rangos óptimos, se ha estudiado que concentraciones menores al 1% generan perlas frágiles y permeables, mientras que concentraciones mayores 3% producen mezclas demasiado viscosas y difíciles de extruir (Bennacef et al., 2021; Sa et al., 2018). En la literatura, Frakolaki et al. (2022) destacan que un 2% de alginato es adecuado para la encapsulación de probióticos, mientras que en el estudio realizado por Sa et al. (2018) encontraron que la concentración de alginato que presenta mejores resultados en la encapsulación de saborizante de mango fue la de 3%.

2.2.2. Efecto del pH y la temperatura

El pH y la temperatura del medio son factores determinantes en la formación y estabilidad de los geles de alginato, ya que influyen directamente en la solubilidad del polímero, la interacción con los iones divalentes y la microestructura final de las esferas (Bennacef et al., 2021). Bennacef et al. (2021) señalan que el pH impacta la solubilidad del alginato y su capacidad de unión con los iones, debido a que regula las cargas electrostáticas de las unidades M y G. Debido a que estas unidades presentan valores de pKa de 3.38 y 3.65, respectivamente, los alginatos con alto contenido de secuencias MG son más solubles a pH bajos y precipitan alrededor de pH 2.6–2.7, mientras que aquellos con alto contenido de unidades G precipitan a pH cercano a 3.25 (Bennacef et al., 2021). Zazzali et al. (2019) mencionan que al presentarse valores de pH mayores a 10.5, los enlaces glucosídicos del gel de alginato comienzan a debilitarse y romperse, conduciendo a una degradación estructural progresiva.

La temperatura de gelificación también ejerce un efecto significativo sobre la viscosidad del alginato, la morfología de las esferas y la resistencia mecánica del gel. (Jeong et al., 2020) reportaron que un aumento en la temperatura de gelificación reduce la viscosidad del alginato y el tamaño de las esferas, incrementando su esfericidad. En cuanto a la temperatura de la reacción, se ha demostrado que regula la difusión de los iones de calcio en la red de alginato y, por tanto, la velocidad y el orden de la gelificación. Bennacef et al. (2021) presentan que a temperaturas altas, la

difusión de los iones acelera y la formación del gel ocurre más rápido, mientras que, a temperaturas bajas, el proceso se ralentiza, permitiendo la generación de redes ordenadas y regulares. Una vez estructurados, los geles de alginato presentan estabilidad térmica en el rango de 0–100 °C, la presencia de unidades G incrementa su resistencia térmica, sin embargo, al superar los 100 °C, la estructura comienza a despolimerizarse y al superar los 180 °C se encuentra totalmente destruida (Bennacef et al., 2021). Por lo anterior, tanto el pH como la temperatura deben mantenerse dentro de rangos específicos para asegurar la formación de geles de alginato con propiedades mecánicas adecuadas y estabilidad durante almacenamiento.

2.2.3. Composición de la solución de gelificación

La composición y concentración de la solución de gelificación es otro de los factores más determinantes en la formación, dureza y estabilidad de las esferas (Bennacef et al., 2021; Lee & Rogers, 2012). El tipo de catión divalente y su concentración regulan la velocidad de entrecruzamiento iónico, la morfología de las esferas y la resistencia mecánica del gel (Bennacef et al., 2021). Lee-Rogers (2012) explican que típicamente se utiliza cloruro de calcio como agente de gelificación porque reacciona rápidamente con el alginato formando puentes salinos divalentes. La concentración de iones calcio no solo afecta la dureza, sino también la cinética de gelificación (Bennacef et al., 2021; Lee & Rogers, 2012).

Bennacef et al. (2021) estudiaron que el incremento en la concentración de Ca^{2+} acelera la tasa de entrecruzamiento, generando una difusión más rápida de los iones en la red polimérica, favoreciendo una formación de geles con mayor viscosidad, elasticidad y estabilidad, efecto se explica mediante la relación entre la concentración de iones de calcio y la concentración de grupos carboxilo presentes en la estructura del alginato. Sin embargo, concentraciones excesivas de calcio pueden inducir cargas positivas excesivas que segregan las cadenas de alginato, provocando la desintegración del gel (Bennacef et al., 2021; Lee & Rogers, 2012). Lo anterior puede atribuirse a que, durante el proceso de entrecruzamiento de los iones de Ca^{2+} y las

cadenas en la superficie de la gota, se genera una película menos permeable que ralentiza la difusión hacia el interior, implicando que estas altas concentraciones de los iones pueden endurecer excesivamente la superficie, limitando la penetración uniforme de los iones y generando estructuras heterogéneas (Chan et al., 2006).

2.2.4. Tiempo de reacción

El tiempo de residencia en el baño de gelificación es un parámetro crítico que define el grado de entrecruzamiento iónico y la porosidad de las esferas de alginato (Bennacef et al., 2021; Chan et al., 2006; Lee & Rogers, 2012; Sa et al., 2018). Bennacef et al, (2021) definen como tiempo de reacción al periodo durante el cual las gotas de alginato permanecen en contacto con los iones calcio, los cuales migran desde la superficie hacia el núcleo de la perla, generando una red polimérica progresivamente más densa y estable.

Sa et al. (2018) observaron que las propiedades físicas de las esferas, como el diámetro y el grosor de la membrana de gel, varían significativamente en función de la concentración de alginato y del tiempo de gelificación. A medida que aumenta tanto la concentración de alginato (de 1 a 5% p/v) como el tiempo de residencia (de 3 a 12 minutos), el diámetro de las esferas se incrementa de manera notable, pasando de 3.08 a 4.86 cm, mientras que el grosor de la membrana aumenta de 1.32 a 2.04 cm. Los autores Lee-Rogers (2013) atribuyeron este fenómeno a la difusión de los iones calcio en la solución de alginato, un proceso directamente proporcional a la concentración de alginato y al tiempo de exposición.

Sin embargo, el efecto del tiempo de residencia no siempre es lineal, Bennacef et al. (2021) reportan que después de 30 minutos de exposición, las muestras sometidas a diferentes concentraciones de calcio mostraron comportamientos similares, sugiriendo la existencia de un límite a partir del cual el tiempo adicional no modifica significativamente las propiedades del gel. Así mismo, se ha demostrado que la esfericidad de los encapsulados no se ve afectada por el tiempo de residencia, lo que

indica que este parámetro influye principalmente en la densidad y el grosor de la membrana, más que en la morfología externa (Cuadros et al., 2012).

3. Justificación

El extracto natural de vainilla es una solución hidroalcohólica que contiene compuestos aromáticos (ej. vainillina) y bioactivos que le confieren sus apreciadas propiedades sensoriales y funcionales. Sin embargo, su presentación líquida se caracteriza por ocupar volúmenes considerables que complican su almacenamiento, transporte, dosificación e incorporación en ciertas matrices alimentarias, especialmente en productos con bajo contenido de humedad o incompatibles con la presencia de agua y etanol. Adicionalmente, los compuestos aromáticos y bioactivos del extracto de vainilla pueden perderse o degradarse durante el procesamiento y almacenamiento debido a su volatilidad y sensibilidad a factores como la temperatura, el oxígeno y la radiación. Estas características justifican el desarrollo de sistemas de encapsulación que reduzcan el volumen requerido para su almacenamiento y transporte, faciliten su incorporación en diversas matrices alimentarias y, al mismo tiempo, preserven sus componentes y su funcionalidad.

4. Hipótesis

Mediante la selección adecuada de materiales de pared y condiciones de proceso, será posible encapsular el extracto natural de vainilla mediante secado por aspersión y gelificación iónica con elevada eficiencia, obteniendo materiales con propiedades físicas y funcionales adecuadas para su potencial incorporación en matrices alimentarias.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Desarrollar, optimizar y caracterizar sistemas de encapsulación de extracto de vainilla natural mediante secado por aspersión y gelación iónica que posean funcionalidad adecuada para su incorporación en alimentos.

5.2 Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la concentración de maltodextrina y de las condiciones de secado por aspersión sobre la eficiencia de encapsulación del extracto natural de vainilla para seleccionar y validar, mediante la metodología de Taguchi, las condiciones de secado por aspersión que maximicen la eficiencia de encapsulación.
- Caracterizar la actividad antioxidante, las propiedades de flujo y los indicadores de estabilidad física del polvo obtenido bajo las condiciones optimizadas, con el propósito de identificar sus posibilidades y limitaciones de aplicación en matrices alimentarias.
- Determinar el efecto de las concentraciones de dextrosa, alginato de sodio y cloruro de calcio, así como del tiempo de gelificación, sobre la eficiencia de encapsulación y la capacidad de retención de líquido de las perlas de hidrogel para seleccionar y validar la formulación y las condiciones de gelificación iónica que maximicen la eficiencia de encapsulación del extracto natural de vainilla.
- Caracterizar la estabilidad térmica y las propiedades mecánicas de las perlas obtenidas bajo las condiciones optimizadas, con el propósito de identificar sus posibilidades y limitaciones de aplicación en matrices alimentarias.

9. Referencias bibliográficas

- Aguirre-Alonso, R. O., Huesca-Osorio, C. A., Salgado-Cervantes, M. A., Tejero-Andrade, J. M., Rodríguez-Jimenes, G. C., & García-Alvarado, M. A. (2019). State-space thermodynamic modeling of vanilla ethanolic extract spray drying with heat pump and N₂. *Journal of Food Engineering*, 243, 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.004>
- Arriola, N. D. A., Chater, P. I., Wilcox, M., Lucini, L., Rocchetti, G., 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>
- Association of Official Analytical Chemists. (1990). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. 2 (K. Helrich, Ed.; 15th. ed). AOAC.
- Ballesteros Martínez, M. Á., & Gaukel, V. (2025). Spray drying of highly viscous feeds: Modeling the internal flow of an ACLR atomizer for non-Newtonian liquid feeds with high dry-matter contents. *Drying Technology*, 43(11-12), 1824-1832. <https://doi.org/10.1080/07373937.2025.2534037>
- Bennacef, C., Desobry-Banon, S., Probst, L., & Desobry, S. (2021). Advances on alginate use for spherification to encapsulate biomolecules. *Food Hydrocolloids*, 118, 106782. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106782>
- Bezerra, D. P., Soares, A. K. N., & De Sousa, D. P. (2016). Overview of the Role of Vanillin on Redox Status and Cancer Development. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016(1), 9734816. <https://doi.org/10.1155/2016/9734816>

- Bubin, S. F. A., Mat Ali, S., Shukri, R., Wan Ibadullah, W. Z., Ramli, N. S., Mustapha, N. A., & Mohammad Rashedi, I. F. (2019a). Characterization and stability of pitaya pearls from hydrocolloids by reverse spherification. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1353-1364. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1647234>
- Bubin, S. F. A., Mat Ali, S., Shukri, R., Wan Ibadullah, W. Z., Ramli, N. S., Mustapha, N. A., & Mohammad Rashedi, I. F. (2019b). Characterization and stability of pitaya pearls from hydrocolloids by reverse spherification. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1353-1364. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1647234>
- Caliskan, G., & Dirim, S. N. (2016). The effect of different drying processes and the amounts of maltodextrin addition on the powder properties of sumac extract powders. *Powder Technology*, 287, 308-314. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.019>
- Calva-Estrada, S. J., Mendoza, M. R., García, O., Jiménez-Fernández, V. M., & Jiménez, M. (2018). Microencapsulation of vanilla (*Vanilla planifolia* Andrews) and powder characterization. *Powder Technology*, 323, 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.035>
- Chan, L. W., Lee, H. Y., & Heng, P. W. S. (2006). Mechanisms of external and internal gelation and their impact on the functions of alginate as a coat and delivery system. *Carbohydrate Polymers*, 63(2), 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.07.033>
- Cuadros, T. R., Skurtys, O., & Aguilera, J. M. (2012). Mechanical properties of calcium alginate fibers produced with a microfluidic device. *Carbohydrate Polymers*, 89(4), 1198-1206. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.03.094>
- Descamps, N., Palzer, S., & Zuercher, U. (2009). The amorphous state of spray-dried maltodextrin: Sub-sub-Tg enthalpy relaxation and impact of temperature and water annealing. *Carbohydrate Research*, 344(1), 85-90. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2008.06.033>

- Díaz-Montes, E. (2023). Wall Materials for Encapsulating Bioactive Compounds via Spray-Drying: A Review. *Polymers*, 15(12), 2659. <https://doi.org/10.3390/polym15122659>
- Enríquez García, F., Villarreal Ramírez, V. H., González Cerdeña, E., Aguirre-Avilés, E. J., & Terrazas-Gómez, M. I. (2025). Vainilla (*Vanilla planifolia* L.): Una revisión para generar un análisis a nivel nacional. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 13(1), 234-251. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v13i1.625>
- European pharmacopoeia* (6th ed). (2007). Council Of Europe.
- Frakolaki, G., Kekes, T., Lympaki, F., Giannou, V., & Tzia, C. (2022). Use of encapsulated *Bifidobacterium animalis* subsp. *Lactis* through extrusion or emulsification for the production of probiotic yogurt. *Journal of Food Process Engineering*, 45(7), e13792. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13792>
- García Carvajal, Z. Y., & Espinosa-Andrews, H. (2017). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 9(17), 117-129. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2016.17.58159>
- García-Coronado, P., Flores-Ramírez, A., Grajales-Lagunes, A., Godínez-Hernández, C., Abud-Archila, M., González-García, R., & Ruiz-Cabrera, M. A. (2020). The Influence of Maltodextrin on the Thermal Transitions and State Diagrams of Fruit Juice Model Systems. *Polymers*, 12(9), 2077. <https://doi.org/10.3390/polym12092077>
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107-1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>

- Hernández-Fernández, M. Á., García-Pinilla, S., Ocampo-Salinas, O. I., Gutiérrez-López, G. F., Hernández-Sánchez, H., Cornejo-Mazón, M., Perea-Flores, M. D. J., & Dávila-Ortiz, G. (2020). Microencapsulation of Vanilla Oleoresin (*V. planifolia* Andrews) by Complex Coacervation and Spray Drying: Physicochemical and Microstructural Characterization. *Foods*, 9(10), 1375. <https://doi.org/10.3390/foods9101375>
- Herrera-Cabrera, B. E., Garciglia, R. S., Higuera, V. M. O., Barrales-Cureño, H. J., Alvarado, A. D., Montiel-Montoya, J., Diaz-Bautista, M., & Albino, R. A. (s. f.). *Producción y caracterización de vainilla (Vanilla planifolia) en función de la concentración de vainillina*.
- Jeong, C., Kim, S., Lee, C., Cho, S., & Kim, S.-B. (2020). Changes in the Physical Properties of Calcium Alginate Gel Beads under a Wide Range of Gelation Temperature Conditions. *Foods*, 9(2), 180. <https://doi.org/10.3390/foods9020180>
- Julián-Flores, A., Michel, M. R., Aguilar, C. N., Da Silva, T. G., Torres-León, C., Ascacio-Valdés, J. A., Sepúlveda, L., Aguilar-Zárate, P., & Chávez-González, M. L. (2025). Encapsulation and Digestive Evaluation of Infusion Extracts from Semi-Desert Mexican Plants: Phytochemical Profiling and Bioactivities. *Plants*, 14(22), 3448. <https://doi.org/10.3390/plants14223448>
- Kandasamy, S., & Naveen, R. (2022). A review on the encapsulation of bioactive components using spray-drying and freeze-drying techniques. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14059. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14059>
- Lee, P., & Rogers, M. A. (2012a). Effect of calcium source and exposure-time on basic caviar spherification using sodium alginate. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1(2), 96-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2013.06.003>

- Lee, P., & Rogers, M. A. (2012b). Effect of calcium source and exposure-time on basic caviar spherification using sodium alginate. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1(2), 96-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2013.06.003>
- Luis-Rojas, S., Ramírez-Valverde, B., Díaz-Bautista, M., Pizano-Calderón, J., & Rodríguez-López, C. (2020). *La producción de vainilla (Vanilla planifolia) en México: Análisis y pronóstico*. 11.
- Mochizuki, T., Alvino Granados, A. E., Sogabe, T., & Kawai, K. (2021). Effects of Glass Transition, Operating Process, and Crystalline Additives on the Hardness of Thermally Compressed Maltodextrin. *Food Engineering Reviews*, 13(1), 215-224. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09236-x>
- Nik Abd Rahman, N. F. N., Zubairi, S. I., Hashim, H., & Yaakob, H. (2024). Revolutionizing Spray Drying: An In-Depth Analysis of Surface Stickiness Trends and the Role of Physicochemical Innovations in Boosting Productivity. *Journal of Food Quality*, 2024(1), 8929464. <https://doi.org/10.1155/2024/8929464>
- Ocampo-Salinas, I. O., Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., Vargas-León, E. A., Guzmán-Ortiz, F. A., Calcáneo-Martínez, N., & Falfán-Cortés, R. N. (2020). Development of wall material for the microencapsulation of natural vanilla extract by spray drying. *Cereal Chemistry*, 97(3), 555-565. <https://doi.org/10.1002/cche.10269>
- Piñón-Balderrama, C. I., Leyva-Porras, C., Terán-Figueroa, Y., Espinosa-Solís, V., Álvarez-Salas, C., & Saavedra-Leos, M. Z. (2020). Encapsulation of Active Ingredients in Food Industry by Spray-Drying and Nano Spray-Drying Technologies. *Processes*, 8(8), 889. <https://doi.org/10.3390/pr8080889>
- Rodríguez-Deméneghi, M. V., Aguilar-Rivera, N., Gheno-Heredia, Y. A., & Armas-Silva, A. A. (2023). Vanilla cultivation in Mexico: Typology, characteristics, production, agroindustrial prospective

- and biotechnological innovations as a sustainability strategy. *Scientia Agropecuaria*, 14(1), 93-109. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.009>
- Roldan, C. T. (s. f.). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-182-SCFI-2011, VAINILLA DE PAPANTLA, EXTRACTOS Y DERIVADOS-ESPECIFICACIONES, INFORMACION COMERCIAL Y METODOS DE ENSAYO (PRUEBA)*.
- Roos, Y. H., & Drusch, S. (2015). *Phase Transitions in Foods* (2nd ed). Academic Press [Imprint] Elsevier Science & Technology Books.
- Roussanova, M., Andrieux, J.-C., Alam, M. A., & Ubbink, J. (2014). Hydrogen bonding in maltooligomer–glycerol–water matrices: Relation to physical state and molecular free volume. *Carbohydrate Polymers*, 102, 566-575. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.003>
- Sa, G., Aa, K., & Tr, S. (s. f.). Characterization of flavoured sweet water balls prepared by basic spherification technique. *International Journal of Chemical Studies*.
- Saavedra–Leos, M. Z., Leyva-Porras, C., Alvarez-Salas, C., Longoria-Rodríguez, F., López-Pablos, A. L., González-García, R., & Pérez-Urizar, J. T. (2018). Obtaining orange juice–maltodextrin powders without structure collapse based on the glass transition temperature and degree of polymerization. *CyTA - Journal of Food*, 16(1), 61-69. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1337048>
- Saavedra-Leos, Z., Leyva-Porras, C., Araujo-Díaz, S., Toxqui-Terán, A., & Borrás-Enríquez, A. (2015). Technological Application of Maltodextrins According to the Degree of Polymerization. *Molecules*, 20(12), 21067-21081. <https://doi.org/10.3390/molecules201219746>

- Santos, D., Maurício, A. C., Sencadas, V., Santos, J. D., Fernandes, M. H., & Gomes, P. S. (2018). Spray Drying: An Overview. En R. Pignatello & T. Musumeci (Eds.), *Biomaterials—Physics and Chemistry—New Edition*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72247>
- Shishir, M. R. I., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, 65, 49-67.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>
- Sun, G., Li, B., Li, Y., & McClements, D. J. (2024). Construction of biopolymer-based hydrogel beads for encapsulation, retention, and colonic delivery of tributyrin: Development of functional beverages (fortified bubble tea). *Food Research International*, 197, 115165.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115165>
- Tai, A., Sawano, T., Yazama, F., & Ito, H. (2011). Evaluation of antioxidant activity of vanillin by using multiple antioxidant assays. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1810(2), 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2010.11.004>
- Vázquez-Núñez, M. D. L. Á., Aguilar-Zárate, M., Gómez-García, R., Reyes-Luna, C., Aguilar-Zárate, P., & Michel, M. R. (2023). The Specific Encapsulation of Procyanidins from Litchi Peel and Coffee Pulp Extracts via Spray-Drying Using Green Polymers. *Polymers*, 15(18), 3823.
<https://doi.org/10.3390/polym15183823>
- Xochipa-Morante, R. C., Delgado-Alvarado, A., Herrera-Cabrera, B. E., Escobedo-Garrido, J. S., & Arévalo-Galarza, L. (s. f.). *Influencia del proceso de beneficiado tradicional mexicano en los compuestos del aroma de vanilla planifolia jacks*. Ex andrews. Unknown.
<https://doi.org/10.22004/AG.ECON.352421>

Xu, F., Shi, Y., Li, B., Liu, C., Zhang, Y., & Zhong, J. (2024). Characterization, Stability and Antioxidant Activity of Vanilla Nano-Emulsion and Its Complex Essential Oil. *Foods*, 13(5), 801.

<https://doi.org/10.3390/foods13050801>

Zazzali, I., Aguirre Calvo, T. R., Pizones Ruíz-Henestrosa, V. M., Santagapita, P. R., & Perullini, M. (2019). Effects of pH, extrusion tip size and storage protocol on the structural properties of Ca(II)-alginate beads. *Carbohydrate Polymers*, 206, 749-756.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.051>

10. Análisis de similitud



Página 1 de 84 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::3117:631797407

Tesis_Bárcenas Manzanares_280926.pdf

 Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:631797407

Fecha de entrega

29 sep 2026, 2:20 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

29 sep 2026, 2:27 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Tesis_Bárcenas Manzanares_280926.pdf

Tamaño del archivo

1.5 MB

78 páginas

21.266 palabras

116.462 caracteres



Página 1 de 84 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::3117:631797407

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)
- Abstract
- Methods and Materials

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
139 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.