

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AGROINDUSTRIAL



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**“Caracterización del aceite microencapsulado de anchoveta
(*Engraulis Ringens*) con encapsulantes conformados por:
maltodextrina - goma arábica y caseína - lactosa”**

**Tesis para obtener el título profesional de
Ingeniero Agroindustrial**

Autores:

Bach. Matta Valdiviezo, Leslie Katherine

Bach. Moreno Castañeda, Patricia Gladys

Asesor:

Ms. Eusebio Lara, Saúl

DNI N°46357183

Código ORCID: 0000-0001-6875-240X

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente tesis para título ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento con el objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando en cuadro dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa de acuerdo a la denominación siguiente

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AGROINDUSTRIAL

“CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE MICROENCAPSULADO DE
ANCHOVETA (ENGRAULIS RINGENS) CON ENCAPSULANTES
CONFORMADAS POR: MALTODEXTRINA - GOMA ARÁBIGA Y CASEÍNA -
LACTOSA”

AUTORES:

Bach. Matta Valdiviezo Leslie Katherine

Bach. Moreno Castañeda Patricia Gladys

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Saul', is written over a horizontal line.

Msc. Saul Marco Eusebio Lara
ASESOR

DNI N° 46357183

Código ORCID: 0000-0002-2434-4663

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



CARTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO

El presente trabajo de Tesis titulado: **“CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE MICROENCAPSULADO DE ANCHOVETA (ENGRAULIS RINGENS) CON ENCAPSULANTES CONFORMADAS POR: MALTODEXTRINA - GOMA ARÁBIGA Y CASEÍNA - LACTOSA”**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial, presentado por los bachilleres: Matta Valdiviezo Leslie Katherine, con código de matrícula 0200712013 y Moreno Castañeda Patricia Gladys, con código de matrícula 0200812033 que tienen como asesor al M.Sc. Saúl Eusebio Lara, según T. Resolución Decanacal N° 093-2002-UNS-FI. Ha sido revisado y evaluado por el siguiente jurado evaluador, designado mediante T7Resolución N°081-2025-UNS-CFI.

Dr. Williams Esteward Castillo Martinez
Presidente
DNI N° 40169364
Código ORCID: 0000-0001-6917-1009

Msc. Saul Marco Eusebio Lara
Secretario
DNI N° 46357183
Código ORCID: 0000-0002-2434-4663

Dr. Daniel Sanchez Vaca
Integrante
DNI N° 18146173
Código ORCID: 0000-0003-4326-1852

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:00 horas del día veintiséis de agosto del año dos mil veinticinco, se instalaron en el aula multimedia de la EPIA – 1er piso, el Jurado Evaluador, designado mediante T/Resolución N° 081-2025-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **Dr. Williams Esteward Castillo Martinez** (Presidente)
- **Msc. Saúl Marco Eusebio Lara** (Secretario)
- **Dr. Daniel Angel Sanchez Vaca** (Integrante)

Para dar inicio a la Sustentación del Informe Final de Tesis titulado: "**CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE MICROENCAPSULADO DE ANCHOVETA (*Engraulis Ringens*) CON ENCAPSULANTES CONFORMADOS POR MALTODEXTRINA - GOMA ARABIGA Y CASEÍNA - LACTOSA**", elaborado por los Bachilleres en Ingeniería Agroindustrial:

- MATTA VALDIVIEZO LESLIE KATHERINE
- MORENO CASTAÑEDA PATRICIA GLADYS

Asimismo, tienen como Asesor al docente: **Msc. Saúl Marco Eusebio Lara**

Finalizada la sustentación, los Tesista respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado Evaluador.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Artículo 103° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

NOMBRES Y APELLIDOS	NOTA VIGESIMAL	CONDICIÓN
MATTA VALDIVIEZO LESLIE KATHERINE	19	Excelente

Siendo las 12:00 horas del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el Jurado Evaluador.

Nuevo Chimbote, 26 de agosto del 2025



Dr. Williams Esteward Castillo Martinez
Presidente



Msc. Saul Marco Eusebio Lara
Secretario



Dr. Daniel Sánchez Vaca
Integrante

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:00 horas del día veintiséis de agosto del año dos mil veinticinco, se instalaron en el aula multimedia de la EPIA – 1er piso, el Jurado Evaluador, designado mediante T/Resolución N° 081-2025-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **Dr. Williams Esteward Castillo Martinez** (Presidente)
- **Msc. Saúl Marco Eusebio Lara** (Secretario)
- **Dr. Daniel Angel Sanchez Vaca** (Integrante)

Para dar inicio a la Sustentación del Informe Final de Tesis titulado: "**CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE MICROENCAPSULADO DE ANCHOVETA (*Engraulis Ringens*) CON ENCAPSULANTES CONFORMADOS POR MALTODEXTRINA - GOMA ARABIGA Y CASEÍNA - LACTOSA**", elaborado por los Bachilleres en Ingeniería Agroindustrial:

- MATTA VALDIVIEZO LESLIE KATHERINE
- MORENO CASTAÑEDA PATRICIA GLADYS

Asimismo, tienen como Asesor al docente: **Msc. Saúl Marco Eusebio Lara**

Finalizada la sustentación, los Tesista respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado Evaluador.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Artículo 103° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

NOMBRES Y APELLIDOS	NOTA VIGESIMAL	CONDICIÓN
MORENO CASTAÑEDA PATRICIA GLADYS	19	Excelente

Siendo las 12:00 horas del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el Jurado Evaluador.

Nuevo Chimbote, 26 de agosto del 2025



Dr. Williams Esteward Castillo Martinez
Presidente



Msc. Saul Marco Eusebio Lara
Secretario



Dr. Daniel Sánchez Vaca
Integrante



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Saul Eusebio
Título del ejercicio: Informe final de Tesis UNS
Título de la entrega: Caracterización del aceite microencapsulado de anchoveta (En...
Nombre del archivo: ncapsulado_de_anchoveta_Engraulis_Ringens_con_encapsulan...
Tamaño del archivo: 4.43M
Total páginas: 104
Total de palabras: 28,681
Total de caracteres: 164,493
Fecha de entrega: 11-mar-2025 12:04p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2611778295



Caracterización del aceite microencapsulado de anchoveta (Engraulis Ringens) con encapsulantes conformados por maltodextrina - goma arábica y caseína - lactosa

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

4%

2

es.scribd.com

Fuente de Internet

1%

3

repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

www.dspace.uce.edu.ec

Fuente de Internet

1%

5

bdigital.dgse.uaa.mx:8080

Fuente de Internet

<1%

6

repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080

Fuente de Internet

<1%

7

repositorio.unprg.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

8

Submitted to uncedu

Trabajo del estudiante

<1%

9

digibug.ugr.es

Fuente de Internet

<1%

10

www.authorstream.com

Fuente de Internet

<1%

11

accesoabierto.uh.cu

Fuente de Internet

<1%

12

repositorio.unp.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

ÍNDICE

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEORICO	4
2.1. ANTECEDENTES	4
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	12
2.2.1. <i>Aceite de Anchoveta (Engraulis ringens)</i>	12
2.2.1.1. Características generales de la materia prima.....	12
2.2.1.2. Características del aceite de anchoveta.	14
2.2.1.3. Composición y perfil de ácidos grasos	15
2.2.1.4. Factores que afectan su calidad	20
2.2.1.5. Beneficios nutricionales y funcionales.....	23
2.2.1.6. Producción del aceite de pescado	23
2.2.1.7. Usos del aceite de anchoveta	25
2.2.2. <i>Microencapsulación de aceites</i>	26
2.2.2.1. Definición y principios de la microencapsulación.....	26
2.2.2.2. Ventajas de la microencapsulación de aceites	29
2.2.3. <i>Materiales encapsulantes en la Microencapsulación</i>	30
2.2.3.1. Características de los materiales encapsulantes.....	30
2.2.3.2. Proteínas como agentes encapsulantes	32
2.2.3.3. Carbohidratos como agentes encapsulantes	33
2.2.4. <i>Técnicas de microencapsulación aplicadas a aceites</i>	35
2.2.4.1. Secado por aspersión.....	35
2.2.4.2. Liofilización.....	36
2.2.4.3. Coacervación compleja.	37
III. METODOLOGIA	38
3.1. MÉTODO.....	38
3.2. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	38
3.3. VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN	39
3.3.1. <i>Variables Independientes</i>	39
3.3.2. <i>Variables Dependientes</i>	40
3.4. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO	41

3.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	41
3.6.	PROCEDIMIENTO	43
3.6.1.	<i>Preparación de las soluciones encapsulantes.....</i>	43
3.6.2.	<i>Procedimiento de obtención de aceites micro encapsulados.....</i>	45
3.7.	MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS.....	49
3.7.1.	<i>Caracterización de la Materia Prima</i>	49
3.7.2.	<i>Caracterización de los aceites microencapsulados</i>	51
3.8.	TÉCNICA DE ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
3.9.	ASPECTOS ÉTICOS (DE ACUERDO AL CÓDIGO DE ÉTICA DE LA UNS)	55
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	56
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	56
4.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES MICROENCAPSULADOS	60
4.2.1.	<i>Eficiencia de Encapsulación</i>	60
4.2.2.	<i>Densidad y compresibilidad.....</i>	69
4.2.3.	<i>Humedad</i>	77
4.2.4.	<i>Solubilidad</i>	81
4.2.5.	<i>Evaluación del Índice de Peróxido.....</i>	85
4.2.6.	<i>Evaluación de la anisidina.....</i>	89
V.	CONCLUSIONES.....	94
VI.	RECOMENDACIONES	95
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Anchoveta (<i>Engraulis ringens</i>).....	12
Figura 2: Dieta de la Anchoveta, en términos de contenido de carbono	13
Figura 3: Aceite de pescado.....	14
Figura 4: Tipos de ácidos grasos	15
Figura 5: Estructura de un ácido graso saturado	15
Figura 6: Estructura de un ácido graso insaturado	16
Figura 7: Principales grupos de ácidos grasos	16
Figura 8: Ubicación del doble enlace, ω -3 y ω -6.....	17
Figura 9: Factores que influyen en la oxidación de lípidos	21
Figura 10: Fases del Proceso de oxidación.....	22
Figura 11: Producción de aceite de pescado, 2023	24
Figura 12: Exportaciones de aceite de pescado según país de destino	25
Figura 13: Usos del aceite de anchoveta.....	26
Figura 14: Estructura general de una microcápsula	26
Figura 15: Aplicaciones de la microencapsulación	28
Figura 16: Preparación de aceites microencapsulados	29
Figura 17: Diferentes procesos de microencapsulación	35
Figura 18: Microencapsulación mediante secado por atomización.....	36
Figura 19: Esquema experimental utilizado en el trabajo de investigación.....	48
Figura 20: A. Comportamiento matriz Goma Arábica – Maltodextrina. B. Comportamiento matriz Caseína - Lactosa	62
Figura 21: Influencia de la matriz en la eficiencia de encapsulación.....	64
Figura 22: Influencia del tipo de matriz en la Densidad.....	70
Figura 23: Influencia de las matrices en el Aire Intersticial	71
Figura 24: Influencia de las matrices en la Compresibilidad.....	72
Figura 25: Solubilidad de las muestras de aceites microencapsulados	82
Figura 26: Índice de Peróxidos de los aceites microencapsulados	87
Figura 27: Índice de anisidina de los de aceites microencapsulados.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ácidos grasos más comunes.....	17
Tabla 2: Contenido de EPA y DHA del aceite de diferentes especies marinas.....	18
Tabla 3: Composición de ácidos grasos del aceite de anchoveta	19
Tabla 4: Ácidos Grasos ω -6 importantes a nivel nutricional.....	20
Tabla 5: Ácidos Grasos ω -3 importantes a nivel nutricional.....	20
Tabla 6: Materiales que actualmente se emplean en microcápsulas	27
Tabla 7: Concentraciones de los componentes de las matrices	44
Tabla 8: Nomenclatura utilizada para cada formulación	44
Tabla 9: Caracterización del aceite de Anchoveta	56
Tabla 10: Composición en ácidos grasos.....	58
Tabla 11: Distribución lipídica y Eficiencia de Encapsulación	60
Tabla 12: Análisis de varianza para la Eficiencia de Encapsulación, aceite extraído total y aceite extraído libre.....	65
Tabla 13: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Aceite extraído Total.....	66
Tabla 14: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de aceite extraído libre.....	67
Tabla 15: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Eficiencia de encapsulación.....	67
Tabla 16: Valores de densidad y contenido de aire intersticial	69
Tabla 17: Análisis de varianza para la Densidad aireada, densidad compactada, aire intersticial y compresibilidad.....	73
Tabla 18: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de la Densidad aireada	74
Tabla 19: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de la densidad compactada	75
Tabla 20: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples del aire intersticial.....	76

Tabla 21: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de la compresibilidad.....	76
Tabla 22: Valores iniciales de humedad	78
Tabla 23: Análisis de varianza para la Humedad	79
Tabla 24: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Humedad	80
Tabla 25: Valores de tiempos para alcanzar la solubilidad.....	81
Tabla 26: Análisis de varianza para la Solubilidad	83
Tabla 27: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Solubilidad	84
Tabla 28: Parámetros Oxidativos en las muestras de aceites microencapsulados	85
Tabla 29: Análisis de varianza para el índice de peróxidos.....	87
Tabla 30: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Índice de peróxidos.....	88
Tabla 31: Contenido de Anisidina en muestras de aceites microencapsulados	89
Tabla 32: Análisis de varianza para la anisidina	91
Tabla 33: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de anisidina	92
Tabla 34: Resumen.....	93

RESUMEN

La estabilidad oxidativa de los aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados, como el aceite de anchoveta, representa un desafío clave en la industria alimentaria. La microencapsulación se ha identificado como una estrategia eficaz para proteger estos compuestos bioactivos, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS 3 (Salud y bienestar) al promover el consumo de alimentos funcionales, y el ODS 12 (Producción y consumo responsables) al mejorar la estabilidad y reducir el desperdicio de productos lipídicos de alto valor. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de encapsulación y la estabilidad oxidativa del aceite de anchoveta microencapsulado con matrices de Maltodextrina - Goma Arábica (M1) y Caseína - Lactosa (M2), con el fin de determinar la formulación más adecuada para aplicaciones alimentarias. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo experimental y diseño completamente aleatorizado. La muestra estuvo constituida por aceite de anchoveta, el cual fue sometido a microencapsulación mediante secado por aspersión. Se evaluaron seis formulaciones (GM1-GM3 y CL1-CL3), variando la matriz encapsulante y las proporciones de sus componentes. Las técnicas e instrumentos de recolección de datos incluyeron análisis fisicoquímicos (eficiencia de encapsulación, densidad, compresibilidad, solubilidad, humedad, índice de peróxidos e índice de anisidina), aplicando metodologías establecidas por la AOAC y normativas internacionales. Los resultados evidenciaron que la formulación GM3 (M1) presentó la mayor eficiencia de encapsulación (69.55%), menor índice de peróxidos (2.32 meq/kg) y anisidina (13.40), así como mejor solubilidad en agua (187 s), lo que la posiciona como la más adecuada para garantizar la estabilidad del aceite de anchoveta. En contraste, la formulación CL3 (M2) mostró la menor eficiencia de encapsulación (43.67%), mayor índice de peróxidos (3.75 meq/kg) y anisidina (14.83), y el tiempo de solubilidad más prolongado (332 s), lo que indica una menor estabilidad oxidativa y funcionalidad en aplicaciones acuosas. Se concluye que la microencapsulación con Maltodextrina - Goma Arábica (M1) es la alternativa más efectiva para proteger el aceite de anchoveta frente a la oxidación, favoreciendo su aplicación en productos funcionales.

Palabras clave: aceite de pescado, microencapsulación, maltodextrina, goma arábica, caseína, lactosa.

ABSTRACT

The oxidative stability of oils rich in polyunsaturated fatty acids, such as anchoveta oil, represents a key challenge in the food and nutraceutical industry. Microencapsulation has been identified as an effective strategy to protect these bioactive compounds, aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs), specifically SDG 3 (Health and well-being) by promoting the consumption of functional foods, and SDG 12 (Responsible production and consumption) by improving stability and reducing waste of high-value lipid products. In this context, the present study aimed to evaluate the encapsulation efficiency and oxidative stability of anchoveta oil microencapsulated with Maltodextrin - Gum Arabic (M1) and Casein - Lactose (M2) matrices, in order to determine the most suitable formulation for food applications. The study was developed under a quantitative approach, experimental type and completely randomized design. The sample consisted of anchovy oil, which was subjected to microencapsulation by spray drying. Six formulations (GM1-GM3 and CL1-CL3) were evaluated, varying the encapsulating matrix and the proportions of their components. Data collection techniques and instruments included physicochemical analyses (encapsulation efficiency, density, compressibility, solubility, humidity, peroxide index and anisidine index), applying methodologies established by the AOAC and international standards. The results showed that formulation GM3 (M1) presented the highest encapsulation efficiency (69.55%), the lowest peroxide index (2.32 meq/kg) and anisidine (13.40), as well as the best solubility in water (187 s), which positions it as the most adequate to guarantee the stability of anchovy oil. In contrast, formulation CL3 (M2) showed the lowest encapsulation efficiency (43.67%), higher peroxides (3.75 meq/kg) and anisidine (14.83), and the longest solubility time (332 s), indicating lower oxidative stability and functionality in aqueous applications. It is concluded that microencapsulation with Maltodextrin-Arabic Gum (M1) is the most effective alternative to protect anchoveta oil against oxidation, favoring its application in functional and nutraceutical products.

Keywords: fish oil, microencapsulation, maltodextrin, gum arabic, casein, lactose.

I. INTRODUCCIÓN

La anchoveta (*Engraulis ringens*) es una especie clave en la industria pesquera mundial, representando una porción significativa de la producción global de harina y aceite de pescado. Además, es uno de los recursos pesqueros más abundantes y estratégicos del Perú, con un gran potencial para el desarrollo de productos de alto valor agregado (Yang et al., 2023). En 2024, la segunda temporada de pesca en la zona centro-norte del Perú culminó con más del 96% de la cuota asignada, lo que refleja una recuperación notable tras los desafíos presentados por fenómenos climáticos como El Niño en años anteriores (The Marine Ingredients Organisation, 2025). Este repunte en la captura de anchoveta no solo fortalece la economía pesquera peruana, sino que también subraya la necesidad de optimizar el uso de sus derivados, especialmente el aceite de anchoveta, reconocido por su alto contenido de ácidos grasos omega-3.

El aceite de anchoveta (*Engraulis ringens*) es ampliamente reconocido por su alto contenido de ácidos grasos omega-3, especialmente el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA), los cuales poseen beneficios comprobados para la salud humana, tales como la prevención de enfermedades cardiovasculares, trastornos inflamatorios y neurológicos (Chen et al., 2022; Peng et al., 2024; Xiao & Ahn, 2023). Sin embargo, la aplicación directa de este aceite en alimentos funcionales enfrenta limitaciones debido a su alta susceptibilidad a la oxidación, lo que genera olores y sabores desagradables y pérdida de sus propiedades nutricionales (Ahmad et al., 2025). Este fenómeno de oxidación se intensifica por factores como la exposición al oxígeno, la luz y el calor, lo que dificulta su almacenamiento y comercialización. (W. Zhang et al., 2024)

La microencapsulación se presenta como una estrategia tecnológica eficaz para superar estas limitaciones, protegiendo al aceite de procesos de degradación, oxidación y facilitando su incorporación en matrices alimentarias (Donmez et al., 2024a). La encapsulación es una herramienta popular para proteger y entregar compuestos bioactivos ambientalmente sensibles como el aceite de pescado (Z. K. Zhang et al., 2020). Este proceso consiste en envolver pequeñas gotas de aceite en una matriz protectora, lo que no solo mejora la estabilidad oxidativa, sino también permite la liberación controlada del aceite en el organismo, mejorando su biodisponibilidad (Peng et al., 2024). Diversos enfoques de microencapsulación han sido documentados

en la literatura, incluyendo técnicas como secado por atomización, liofilización y procesamiento electrohidrodinámico, así como la aplicación de diferentes compuestos encapsulantes, entre ellos proteínas y polisacáridos. Las investigaciones sugieren que la formación de complejos entre estos biopolímeros, a través de interacciones específicas, favorece una mayor eficiencia de encapsulación (EE) y mejora la estabilidad frente a la oxidación en comparación con el uso de un solo material encapsulante (Debbarma et al., 2023; Khoshnoudi-Nia et al., 2022).

A pesar del avance en las técnicas de microencapsulación, la selección de los encapsulantes sigue siendo un desafío crítico para garantizar la estabilidad, biodisponibilidad y aceptabilidad sensorial del aceite microencapsulado (Wardhani et al., 2024). Diversos estudios han explorado el uso de combinaciones de materiales, como maltodextrina y goma arábiga, por sus propiedades emulsionantes y estabilizantes, así como caseína y lactosa, debido a su capacidad para formar estructuras resistentes y proteger compuestos bioactivos (Hashim et al., 2023; Wang et al., 2024). Sin embargo, existe una brecha en el conocimiento sobre cómo estas combinaciones impactan de manera comparativa las propiedades fisicoquímicas y funcionales del aceite de anchoveta (Li et al., 2022)

En este estudio, se tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de las combinaciones de encapsulantes maltodextrina-goma arábiga y caseína-lactosa en la microencapsulación del aceite de anchoveta, con el fin de mejorar su estabilidad oxidativa y funcionalidad en aplicaciones alimentarias. Para ello, se evaluó el proceso de microencapsulación del aceite de pescado, considerando la eficiencia de encapsulación y el impacto de la matriz en parámetros clave como densidad, compresibilidad, solubilidad, humedad, índice de peróxidos e índice de anisidina. Así mismo, como hipótesis se plantea que las combinaciones de encapsulantes maltodextrina-goma arábiga y caseína-lactosa proporcionan una protección efectiva al aceite de anchoveta contra la oxidación, mejorando su estabilidad y facilitando su incorporación en matrices alimentarias sin comprometer su biodisponibilidad.

La importancia de esta investigación radica en desde una perspectiva social y de salud pública, la creciente demanda de alimentos funcionales ha impulsado la incorporación de ingredientes bioactivos en la dieta, siendo los ácidos grasos omega-3 unos de los compuestos más valorados por sus efectos positivos en la salud cardiovascular,

cognitiva y antiinflamatoria. No obstante, la sensibilidad de estos compuestos a la oxidación representa un obstáculo para su aplicación en matrices alimentarias. Por ello, estudiar nuevas combinaciones de encapsulantes, como maltodextrina-goma arábica y caseína-lactosa, permitirá desarrollar productos más estables y funcionales, con un impacto positivo en la mejora de la calidad nutricional de la población.

Desde el punto de vista económico e industrial, la diversificación del uso del aceite de anchoveta a través de su microencapsulación representa una oportunidad para incrementar su valor agregado y posicionarlo en mercados internacionales de alimentos funcionales y nutraceuticos. La aplicación de esta tecnología permitiría fortalecer la competitividad del sector pesquero y fomentar la innovación en la industria alimentaria. Además, la optimización del aprovechamiento de la anchoveta podría generar beneficios económicos al reducir la dependencia de su conversión en harina de pescado, abriendo nuevas oportunidades comerciales y contribuyendo al desarrollo sostenible del sector.

En términos ambientales, la transformación del aceite de anchoveta en un ingrediente funcional estable y versátil podría reducir el desperdicio de recursos pesqueros y mejorar su eficiencia de uso. La implementación de tecnologías de microencapsulación alineadas con principios de sostenibilidad favorecería una gestión más eficiente de los recursos marinos, promoviendo un modelo de economía circular dentro de la industria pesquera.

Finalmente, a nivel académico y científico, la encapsulación de aceites ricos en omega-3 ha sido ampliamente estudiada, pero existen brechas de conocimiento en relación con el impacto de distintas combinaciones de encapsulantes sobre la estabilidad y biodisponibilidad del aceite de anchoveta. Este estudio aporta información relevante sobre el uso de sistemas encapsulantes mixtos basados en proteínas y polisacáridos, contribuyendo al avance del conocimiento en tecnología de alimentos y encapsulación de compuestos bioactivos. Los hallazgos obtenidos no solo servirán como base para futuras investigaciones, sino que también podrán ser aplicados en el desarrollo de productos innovadores que respondan a las demandas del mercado y a las necesidades de la industria alimentaria y de la salud pública.

II. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes

La microencapsulación de aceites ricos en ácidos grasos omega-3 ha sido objeto de diversas investigaciones en los últimos años, enfocándose en la utilización de diferentes agentes encapsulantes para mejorar la estabilidad y funcionalidad de los aceites. A continuación, se presentan estudios relevantes publicados en revistas científicas.

En el estudio de Hashim et al., (2023) evaluaron la microencapsulación del aceite de pescado de Menhaden mediante secado por aspersión, analizando el efecto de distintos biopolímeros (maltodextrina combinada con goma arábiga, almidón, aislado de proteína de suero y caseinato de sodio), temperaturas de entrada del aire (160-200 °C) y proporciones de emulsión (15-35%). Se determinó que la combinación de maltodextrina con aislado de proteína de suero (MD + WPI) a 190 °C y una proporción de emulsión del 30% produjo microcápsulas con mayor estabilidad oxidativa (valor de peróxidos de 4.031 mEq/kg), menor humedad (4.410%) y una estructura superficial lisa y compacta, reduciendo la permeabilidad a gases y protegiendo el aceite contra la degradación. Estos resultados confirman que la microencapsulación es una estrategia efectiva para mejorar la estabilidad y aplicabilidad del aceite de pescado en alimentos funcionales, sugiriendo su potencial uso en la industria alimentaria.

En el estudio de Sultana et al., (2023) revisaron la encapsulación de aceite de pescado y ácidos grasos esenciales mediante secado por aspersión, destacando su importancia en la estabilización de compuestos bioactivos como los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) eicosapentaenoico (EPA) y docosahexaenoico (DHA), altamente susceptibles a la oxidación. Se analizaron las cinéticas de oxidación en sistemas a granel, emulsificados y encapsulados, encontrando que la estabilidad de los PUFAs podía modelarse mediante ecuaciones de autooxidación. La morfología del polvo encapsulado, el diámetro de las gotas de aceite y la relación superficie-aceite fueron identificados como factores clave en la eficiencia de encapsulación y la estabilidad oxidativa. Se determinó que la energía de activación de la oxidación está directamente relacionada con el diámetro de las gotas de aceite reconstituidas, sugiriendo que la reducción del tamaño de partícula mejora la retención de los compuestos bioactivos.

Además, se confirmó que la proporción de aceite superficial influye significativamente en la vida útil del aceite encapsulado, demostrando que formulaciones con menor contenido de aceite libre presentaron una mayor estabilidad. El estudio resaltó el potencial del secado por aspersión como una estrategia eficiente para la protección de aceites marinos en alimentos funcionales, promoviendo su aplicación en la formulación de productos dirigidos a poblaciones vulnerables, como adultos mayores, dentro del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Se concluyó que la encapsulación de aceites ricos en omega-3 es una herramienta clave para mejorar su estabilidad y biodisponibilidad, impulsando su uso en la industria alimentaria y farmacéutica.

En el estudio de Cheng et al., (2023) evaluaron la coencapsulación de resveratrol en microcápsulas de aceite de pescado estabilizadas con proteína de suero entrecruzada con transglutaminasa y goma arábica, con el fin de mejorar la estabilidad oxidativa de los lípidos y la biodisponibilidad del polifenol. Se utilizó el método de secado por aspersión para la producción de microcápsulas, optimizando las concentraciones de proteína de suero (15%), goma arábica (5%) y transglutaminasa (4-8 U/g). Se analizaron la eficiencia de encapsulación, la estabilidad oxidativa mediante la determinación de hidroperóxidos lipídicos y sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS), así como la retención de ácidos grasos poliinsaturados (DHA y EPA) y la estabilidad de resveratrol durante el almacenamiento a 45°C por 60 días. Los resultados indicaron que el resveratrol se distribuyó preferentemente en la matriz proteica de las microcápsulas, aumentando su estabilidad en comparación con sistemas sin encapsulación. La combinación de proteína de suero entrecruzada y goma arábica redujo la cantidad de aceite superficial a 1.75%, mejorando la eficiencia de encapsulación del aceite de pescado hasta un 93%. Se observó que la coencapsulación de resveratrol retrasó la formación de hidroperóxidos y redujo la oxidación de lípidos en comparación con microcápsulas sin el polifenol, aunque su efecto protector disminuyó después de 21 días debido a la degradación del compuesto. En términos de estabilidad estructural, las microcápsulas mantuvieron su integridad física durante el almacenamiento, y la retención de DHA y EPA fue mayor en las microcápsulas en comparación con el aceite de pescado a granel. En conclusión, la coencapsulación de resveratrol y aceite de pescado en microcápsulas estabilizadas con proteínas y polisacáridos mostró ser una estrategia efectiva para mejorar la estabilidad oxidativa y

estructural de estos compuestos bioactivos, lo que abre nuevas oportunidades para su aplicación en alimentos funcionales y nutraceuticos.

En el estudio de Rahim et al., (2022) evaluaron la eficiencia de encapsulación, la calidad oxidativa y la aceptación sensorial de mezclas de aceites de chía y pescado. Se formularon emulsiones con proporciones iguales de ambos aceites y se sometieron a secado por aspersión bajo diferentes condiciones de temperatura del aire de entrada (125-185°C), concentración de material de pared (5-25%), velocidad de la bomba (3-7 ml/min) y velocidad de la aguja (3-11 s). Los resultados mostraron que la mayor eficiencia de encapsulación (83.77%) se obtuvo a 140°C, con un 10% de material de pared, 4 ml/min de velocidad de la bomba y 5 s de velocidad de la aguja, mientras que la menor eficiencia (73.40%) se registró a 170°C con 20% de material de pared. Se observó que la temperatura del aire de entrada tuvo un efecto significativo en la eficiencia de encapsulación, mientras que la calidad oxidativa de las microcápsulas mejoró en comparación con los aceites no encapsulados. Los valores de peróxidos y de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico indicaron una mejor estabilidad oxidativa en las microcápsulas obtenidas bajo condiciones óptimas. En términos de aceptabilidad sensorial, las microcápsulas desarrolladas presentaron puntuaciones dentro del rango aceptable, lo que sugiere su viabilidad para su incorporación en alimentos funcionales. Se concluyó que la microencapsulación de aceites de chía y pescado mediante secado por aspersión es una estrategia efectiva para mejorar la estabilidad y aplicabilidad de los ácidos grasos esenciales, promoviendo su uso en la industria alimentaria.

En el estudio de Wardhani et al., (2022) evaluaron la modificación hidrofóbica parcial del alginato mediante anhídrido succínico dodecenil (DSA) para su aplicación en la encapsulación de aceite de pescado, con el fin de mejorar la estabilidad de la emulsión y la protección contra la oxidación. Se utilizó alginato comercial, el cual fue degradado mediante sonicación para ajustar su peso molecular promedio (Mv) antes de ser modificado químicamente con DSA en diferentes proporciones (1:1, 1:2 y 1:4). Posteriormente, se formuló una emulsión estabilizada con el alginato modificado, que fue sometida a liofilización para obtener partículas microencapsuladas de aceite de pescado. Los resultados mostraron que la modificación con DSA mejoró significativamente la estabilidad de la emulsión, reduciendo la separación de fases hasta por 18 horas. Además, el uso de alginato modificado disminuyó el grado de

oxidación del aceite de pescado en un 8% en comparación con el alginato nativo, lo que sugiere una mayor protección frente a la degradación oxidativa. La encapsulación con alginato modificado también mostró una mayor capacidad de carga y propiedades mejoradas de resistencia a la rehidratación en comparación con el alginato sin modificar. Se concluyó que la modificación del alginato con DSA aumentó su capacidad para estabilizar emulsiones y encapsular aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados, lo que representa una estrategia viable para la protección de compuestos lipídicos en aplicaciones alimentarias y nutracéuticas.

En el estudio de (Khoshnoudi-Nia et al., 2022) realizaron una revisión sistemática y un meta-análisis sobre la encapsulación de aceite de pescado en diferentes micro y nanotransportadores, con el propósito de identificar las técnicas más eficientes para mejorar la estabilidad oxidativa y la aplicabilidad de los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) en la industria alimentaria. Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de literatura entre octubre y diciembre de 2019, seleccionando 39 artículos relevantes que evaluaron diversos métodos de encapsulación, incluyendo secado por aspersión (42.86%), liofilización (21.43%) y procesos electrohidrodinámicos (19.04%). Los resultados mostraron que el método electrohidrodinámico presentó la mayor eficiencia de encapsulación, seguido del secado por aspersión y la liofilización, aunque sin diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Asimismo, la combinación de biopolímeros, específicamente mezclas de proteínas y polisacáridos, resultó ser la opción más efectiva para maximizar la eficiencia de encapsulación y la estabilidad oxidativa del aceite de pescado. Sin embargo, la variabilidad en las condiciones de almacenamiento y en los parámetros de procesamiento de los estudios analizados dificultó la comparación directa de los resultados. En conclusión, el estudio destacó la importancia de optimizar la selección de materiales de pared y los parámetros del proceso de encapsulación para mejorar la estabilidad y funcionalidad del aceite de pescado en alimentos funcionales, sugiriendo que la combinación de proteínas y polisacáridos es la estrategia más prometedora para su protección contra la oxidación y su incorporación en la industria alimentaria.

En el estudio de (Selim et al., 2021) evaluaron el efecto del tipo de material de pared en la eficiencia de encapsulación y la estabilidad oxidativa de aceites de pescado encapsulados mediante secado por aspersión, utilizando como fuentes aceite de caballa, sardina y sand smelt. Se emplearon tres materiales encapsulantes: proteína de

suero, goma arábiga y maltodextrina. La encapsulación se realizó en un secador por aspersión convencional, y se analizaron la eficiencia de encapsulación (EE), la fluidez del polvo y la estabilidad oxidativa durante 35 días de almacenamiento a 4°C. Los resultados mostraron que la proteína de suero fue el agente encapsulante más eficiente, alcanzando una EE del 71.71% en aceite de sand smelt, 68.61% en aceite de caballa y 64.71% en aceite de sardina, superando a la goma arábiga y la maltodextrina. Además, los aceites no encapsulados presentaron valores de peróxidos significativamente más altos (33.19, 40.64 y 47.76 meq/kg para los aceites de sand smelt, caballa y sardina, respectivamente) después de 35 días, mientras que los aceites encapsulados con proteína de suero mostraron valores por debajo de 10 meq/kg en el mismo período, indicando una mayor estabilidad oxidativa. Se concluyó que la encapsulación de aceites de pescado mediante secado por aspersión, especialmente utilizando proteína de suero como material de pared, mejora su estabilidad oxidativa y prolonga su vida útil, lo que sugiere su potencial aplicación en la formulación de alimentos funcionales enriquecidos con ácidos grasos omega-3

En el estudio de Venugopalan et al., (2021) revisaron las estrategias de encapsulación utilizadas para proteger aceites ricos en ácidos grasos omega-3, destacando su importancia en la industria alimentaria debido a su susceptibilidad a la oxidación y baja estabilidad en formulaciones funcionales. Se analizaron diversas tecnologías de encapsulación, como liposomas, emulsiones, nanoemulsiones, nanopartículas lipídicas sólidas y microencapsulación mediante secado por aspersión y liofilización. Se revisaron los principales materiales encapsulantes utilizados, incluyendo polisacáridos, proteínas y lípidos, y se evaluaron sus efectos sobre la eficiencia de encapsulación, la estabilidad oxidativa y la biodisponibilidad de los ácidos grasos poliinsaturados. Los resultados mostraron que la nanoencapsulación en emulsiones y liposomas mejoró la biodisponibilidad y la protección contra la oxidación, mientras que el secado por aspersión con biopolímeros, como goma arábiga y maltodextrina, proporcionó una estabilidad significativa durante el almacenamiento. Se identificó que la combinación de proteínas y polisacáridos como materiales de pared mejoró la estabilidad oxidativa, reduciendo la formación de compuestos de oxidación primaria y secundaria en comparación con aceites no encapsulados. Además, se destacó la importancia de la selección del método de encapsulación en función de la aplicación específica del aceite omega-3, sugiriendo que la microencapsulación con técnicas

avanzadas puede optimizar la incorporación de estos aceites en productos funcionales sin comprometer su calidad sensorial. En conclusión, la encapsulación de aceites ricos en omega-3 representa una estrategia efectiva para mejorar su estabilidad y aplicabilidad en la industria alimentaria y nutracéutica, permitiendo su inclusión en productos con mayores beneficios para la salud humana.

En el estudio de (Jokar et al., 2024) evaluaron la microencapsulación de aceite de pescado rico en EPA y DHA mediante secado por aspersión, utilizando una combinación de goma arábica y goma persa como materiales de pared. Se optimizaron las proporciones de encapsulantes (29:1 a 25:5 %p/p), la relación material de pared-aceite (5:1 a 1:1), la temperatura de secado (180-220°C) y la velocidad de alimentación, empleando metodología de superficie de respuesta. Se determinaron la eficiencia de microencapsulación (MEE), contenido de humedad (MC), índice de peróxidos (PV) y tamaño de partícula (PS). Los resultados mostraron que las condiciones óptimas fueron una proporción goma arábica-goma persa de 26:4, una relación de pared-aceite de 4:1, una temperatura de secado de 210°C y alta velocidad de alimentación, alcanzando una MEE del 79.49%, un MC de 3.39%, un PV de 10.98 meq O₂/kg de aceite y un PS de 39.05 µm. El análisis de microestructura reveló que las microcápsulas óptimas presentaron una superficie esférica y lisa sin grietas ni poros visibles, lo que sugiere una alta estabilidad oxidativa. Se concluyó que la combinación de gomas arábica y persa mejoró la eficiencia de encapsulación y la estabilidad del aceite de pescado, reduciendo la oxidación y prolongando su vida útil, lo que la convierte en una estrategia prometedora para la incorporación de ácidos grasos omega-3 en alimentos funcionales y nutracéuticos.

En el estudio de Yang et al., (2024) evaluaron el impacto de cuatro métodos de secado—secado por aspersión (SD), secado por aspersión con congelación (SFD), liofilización (FD) y liofilización asistida por microondas (MFD)—en la microencapsulación de aceite de pescado, considerando propiedades fisicoquímicas, estabilidad oxidativa y estructura de las microcápsulas. Se utilizaron caseinato de sodio y α -lactosa hidratada como materiales de pared para la preparación de emulsiones, que fueron sometidas a los distintos procesos de secado. SD mostró la mayor eficiencia de encapsulación (86.98%), seguido por SFD (77.79%), FD (63.29%) y MFD (57.89%). Además, SD produjo microcápsulas con mejor capacidad de carga efectiva y mayor fluidez, mientras que SFD mejoró la solubilidad. Durante el almacenamiento a 60°C,

las microcápsulas obtenidas con SD presentaron una estabilidad oxidativa ligeramente inferior a las generadas por FD y SFD, aunque la encapsulación en general redujo la velocidad de degradación de los ácidos grasos insaturados. FTIR confirmó la formación de estructuras encapsuladas, y SEM reveló que SD generó microcápsulas lisas y esféricas, mientras que SFD, FD y MFD presentaron estructuras porosas debido a la sublimación del hielo. Se concluyó que SD fue la técnica más eficiente en encapsulación y calidad estructural, mientras que SFD y FD ofrecieron mejores condiciones para la estabilidad oxidativa del aceite, favoreciendo su aplicación en alimentos funcionales y nutraceuticos.

En el estudio de (Annamalai et al., 2020) evaluaron la microencapsulación de aceite de hígado de bacalao (*Gadus morhua*) mediante secado por aspersión, utilizando hidrolizado de proteínas de pescado, maltodextrina y goma arábica como materiales de pared, con el objetivo de mejorar la estabilidad estructural y oxidativa del aceite. Se compararon dos formulaciones: una con caseinato de sodio (control) y otra con hidrolizado de proteínas de pescado, analizando la eficiencia de encapsulación, estabilidad oxidativa e integridad estructural. La formulación con hidrolizado de proteínas mostró una mayor eficiencia de encapsulación (85.02%) en comparación con el control (82.38%) y un menor índice de peróxidos tras 30 días de almacenamiento a 25°C (9.31 vs. 12.48 meq O₂/kg). Además, las microcápsulas con hidrolizado presentaron una superficie más homogénea y menos colapsada, favoreciendo una liberación controlada en condiciones simuladas del tracto gastrointestinal. Se concluyó que el uso de hidrolizado de proteínas de pescado mejoró la estabilidad oxidativa y estructural del aceite encapsulado, sugiriendo su viabilidad para aplicaciones en alimentos funcionales y nutraceuticos

En el estudio de (Lavanya et al., 2020) evaluaron la influencia de la temperatura de salida en el secado por aspersión sobre la estabilidad oxidativa, eficiencia de encapsulación y liberación de aceite en condiciones gastrointestinales de aceites de pescado y chía, utilizando proteína de suero como material de pared. Se formularon emulsiones de aceite en agua con una fase dispersa del 15% p/p y un contenido total de sólidos del 30%, que fueron homogenizadas y posteriormente secadas a temperaturas de salida entre 50 y 65°C. Los resultados indicaron que la eficiencia de encapsulación varió entre 76.13% y 80%, con valores máximos obtenidos a 55°C. La estabilidad oxidativa se evaluó mediante el índice de peróxidos, encontrándose valores

entre 1.9 y 3.8 meq O₂/kg, con un incremento significativo a temperaturas más elevadas. Las microcápsulas obtenidas a 55°C presentaron una morfología esférica con superficie lisa, mientras que a temperaturas más altas se observaron estructuras porosas y colapsadas. El análisis FTIR confirmó la retención de ácidos grasos poliinsaturados en las microcápsulas, y la liberación de aceite en condiciones gastrointestinales alcanzó un 21.32% para el aceite de chía y 22.06% para el de pescado, mientras que en condiciones gástricas fue menor (8.24% y 7.36%, respectivamente). Se concluyó que el secado a 55°C optimizó la estabilidad oxidativa y la eficiencia de encapsulación, reduciendo la degradación de los ácidos grasos esenciales y mejorando la biodisponibilidad del aceite encapsulado, lo que resalta su aplicabilidad en la industria de alimentos funcionales y nutraceuticos.

El estudio de Vaucher et al., (2019) tuvo como objetivo microencapsular aceite de pescado utilizando dos combinaciones de biopolímeros: goma arábica-maltodextrina (GA) y caseína-pectina-maltodextrina (CP), con el fin de mejorar la estabilidad oxidativa del aceite encapsulado. Se emplearon dos técnicas de microencapsulación: secado por aspersión para las micropartículas de GA y coacervación compleja seguida de secado por aspersión para las de CP. Se evaluaron la eficiencia de encapsulación, el tamaño de partícula, el contenido de humedad, la estabilidad oxidativa y las propiedades morfológicas. Los resultados mostraron que la eficiencia de encapsulación fue mayor en las micropartículas CP (64.7-67.9%) en comparación con las de GA (51.2-56.8%). El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló que ambas formulaciones presentaron partículas esféricas con depresiones superficiales, aunque la microscopía confocal evidenció una mayor presencia de aceite superficial en las micropartículas GA. La estabilidad oxidativa, medida por el índice de peróxidos después de 28 días de almacenamiento a 40°C y 75% de humedad relativa, fue mayor en las micropartículas CP, con un valor máximo de 17.40 mmol/kg de aceite, mientras que las micropartículas GA presentaron una oxidación significativamente mayor. Se concluyó que la combinación de caseína y pectina ofreció una mejor protección contra la oxidación lipídica, lo que la convierte en una alternativa prometedora para la microencapsulación de aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados y su aplicación en la industria de alimentos funcionales.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Aceite de Anchoveta (*Engraulis ringens*).

2.2.1.1. Características generales de la materia prima.

La Anchoveta es un recurso costero, de agua fría, habita muy cerca de la playa. En invierno, con mar frío, se dispersa a más de cien millas; en verano, con mar cálido, se acerca hasta casi la orilla (Castillo, Cornejo, La Cruz, Grados, & Cuadros, 2020).

Es una especie pelágica de talla pequeña con cuerpo alargado poco comprimido, con cabeza larga, labio superior prolongado en un hocico y con ojos muy grandes; su color varía de azul oscuro a verdoso en la parte dorsal y plateado en el vientre, su carne tiene fuerte olor y sabor (Imarpe, Gef, Onudi, Ifop, 2012).

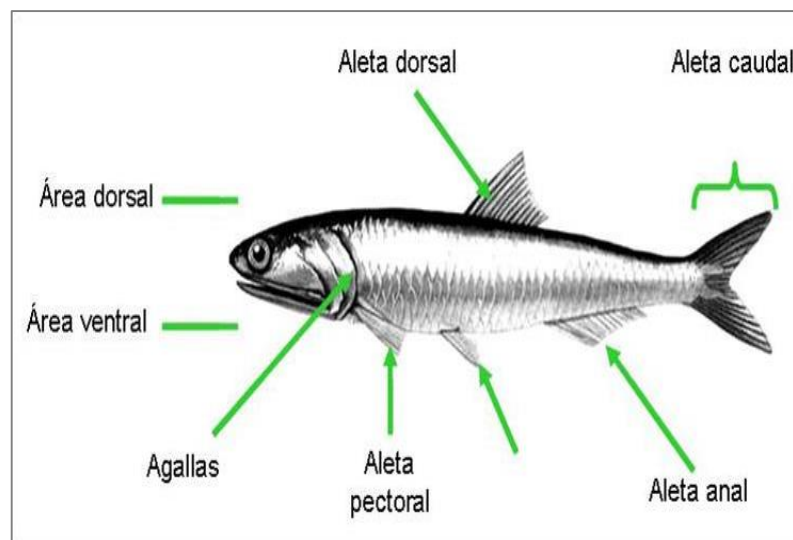


Figura 1: Anchoveta (*Engraulis ringens*)

La anchoveta puede medir desde 7 a 16 centímetros y alcanza una talla máxima de 20 cm y una longevidad de 3 años de edad. La talla media de madurez sexual ha sido estimada en 12 cm (1 año de edad) por lo cual todos los individuos menores a esta talla son considerados como juveniles (Bouchon, Ayon, Mori, & Peña Cecilia, 2010).

En cuanto a su alimentación, es un animal filtrador, que se alimenta de plancton, copépodos, eufáusidos y galanoideos (Sociedad Nacional de Pesquería, 2020). Es una especie planctívora, es decir se alimenta de alimentos planctónicos, incluidos el zooplancton y el fitoplancton, dominado por fitoplancton en términos de abundancia (más del 99 % en términos de presas ingeridas), sin embargo, en términos de contenido de carbono de las presas, es el zooplancton el componente más importante de la dieta, siendo los eufáusidos la presa más importante, y en segundo lugar los copépodos (Lujan Paredes, 2016).

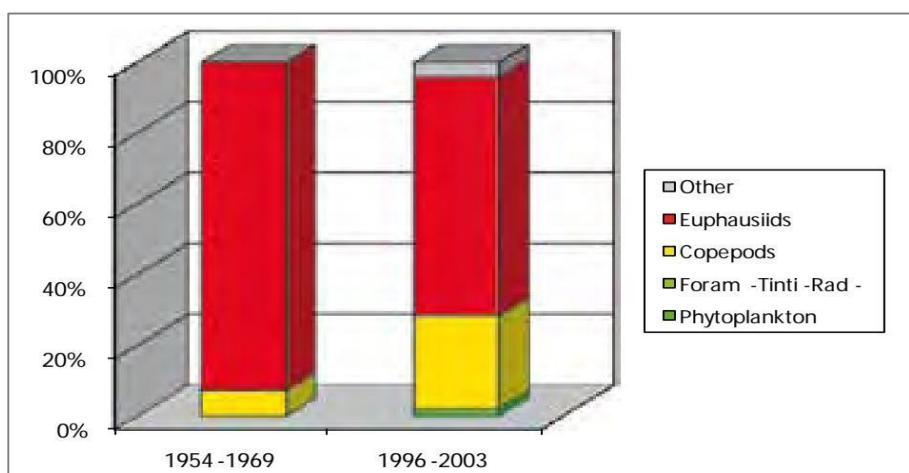


Figura 2: Dieta de la Anchoveta, en términos de contenido de carbono.

Se traslada en densos cardúmenes. Es una especie de alta capacidad reproductiva, tiene sexos separados y tiene la capacidad de desovar varias veces durante el año, es una especie desovadora parcial por lo que en cualquier periodo del año es posible encontrar ejemplares en diferentes estados de madurez sexual (Bouchon, Ayon, Mori, & Peña Cecilia, 2010), presenta dos periodos importantes de desove: uno en invierno (agosto - octubre) y otro en verano (enero - marzo), y el inicio de su ciclo reproductivo, coincide con la máxima intensidad del afloramiento en la región norte-centro del Perú, se reproduce mediante la producción de huevos por parte de las hembras, los cuales son fertilizados en el agua por el macho, desarrollando un embrión también en el agua (Lujan Paredes, 2016). Desova en todas las latitudes del mar peruano y las áreas más importantes están frente a Chicama ($7^{\circ}30'S$) hasta Chimbote ($9^{\circ}S$) y del Callao ($12^{\circ}S$) hasta Pisco ($14^{\circ}S$) (Castillo, Cornejo, La Cruz, Grados, & Cuadros, 2020)

En cuanto a su composición, esta puede variar por varios factores, condiciones estacionales, alimentación, hábitat, época de desove, afectando el contenido en ácidos grasos, obteniendo así valores máximos y mínimos, diferenciándolos de otras especies. (Lujan Paredes, 2016)

2.2.1.2. Características del aceite de anchoveta.

Este es un aceite que se obtiene al final del tratamiento del licor de prensa, luego de pasar por operaciones de separación y centrifugación para ser almacenado en tanques (Conchillo, Valencia, Puente, & Ansorena D, 2006).

Estos aceites tienen un alto valor nutricional, debido a que son ricos en ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga omega-3, en particular el ácido docosahexaenoico (DHA) y el ácido eicosapentaenoico (EPA), sin embargo, debido a esta naturaleza insaturada son altamente susceptibles a la oxidación (Mozuraityte, Kristinova, B. Standal, K. Carvajal, & Aursand, 2016).

Estos además de presentar olores y sabores fuertes se oxidan fácilmente por el oxígeno del aire, y otras fuentes de energía intensa que rompen fácilmente los enlaces de los ácidos grasos convirtiendolo en radicales (Aprilia, Y Pujiastuti², & Klaypradit, 2021).



Figura 3: Aceite de pescado

2.2.1.3. Composición y perfil de ácidos grasos.

Los lípidos son un grupo muy heterogéneo que se componen de una amplia variedad de compuestos, incluyendo los ácidos grasos. Estos ácidos grasos, que constituyen las unidades estructurales fundamentales de los lípidos, son biomoléculas de origen lipídico, compuestas por una larga cadena lineal de hidrocarburos, de variada longitud o cantidad de átomos de carbono, con un grupo carboxilo en su extremo (son ácidos orgánicos de larga cadena). Cada átomo de carbono se une al siguiente y al precedente a través de un enlace covalente simple o doble. Pueden ser saturados, insaturados (Badui Dergal, 2006).



Figura 4: Tipos de ácidos grasos

Los AG saturados carecen de enlaces dobles entre carbonos, varían de 4 a 26 átomos de carbono y los de cadena corta son líquidos y los de cadena larga sólidos a temperatura ambiente. Son más estables ante la oxidación que los insaturados (Badui Dergal, 2006)

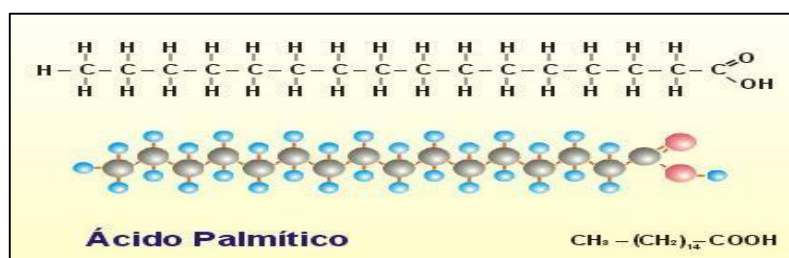


Figura 5: Estructura de un ácido graso saturado

Los AG insaturados poseen enlaces dobles entre carbonos, usualmente son líquidos a temperatura ambiente, y son propensos a transformaciones oxidativas. Los que poseen un solo enlace doble son conocidos como monoinsaturados, y aquellos con más de uno son los poliinsaturados (Badui Dergal, 2006)

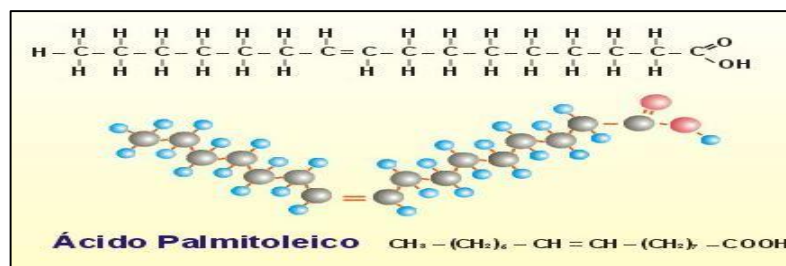


Figura 6: Estructura de un ácido graso insaturado

También se definen a los AG poliinsaturados en función de la ubicación de su primer enlace doble en la cadena carbónica. Los grupos más importantes en términos de la salud y nutrición humana son: Omega 3 (primer doble enlace está en la posición 3) y Omega 6 (primer doble enlace está en la posición 6) (Badui Dergal, 2006).



Figura 7: Principales grupos de ácidos grasos

El ácido linoleico (LA) es el ácido graso esencial primario o generador de la familia ω -6. Se compone de 18 átomos de carbono y dos enlaces dobles. En humanos, el LA puede ser desaturado y alargado para formar series de AGP ω -6. El ácido alfa-linolénico (ALA) es el ácido graso esencial primario o generador de la familia ω -3. Posee igualmente 18 átomos de carbono, aunque tiene tres enlaces dobles. En contraste con el LA, el primer doble enlace del ALA se sitúa en el tercer átomo de carbono, partiendo del extremo metilo de la cadena de ácidos grasos, de ahí que reciba el nombre de ω -3. Similar al LA, el ALA también tiene la capacidad de ser desaturado y alargado para generar series de AGP ω -3 (Piñeiro Corrales, Lago Rivero, & Culebras Fernández, 2013)

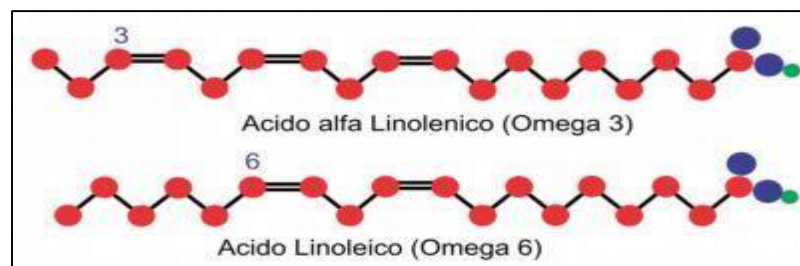


Figura 8: Ubicación del doble enlace, ω -3 y ω -6

El ser humano no posee las enzimas requeridas para la síntesis de determinados ácidos grasos esenciales para el metabolismo, como el ácido linoleico (18:2 ω -6) y el alfa - linoléico (18:3 ω -3). Por lo tanto, deben ser asimilados en nuestro cuerpo a través de la alimentación, por lo que se les denomina como ácidos grasos esenciales (Piñeiro Corrales, Lago Rivero, & Culebras Fernández, 2013)

Tabla 1: Ácidos grasos más comunes

Nombre sistemático	Abreviatura	Nombre común	Origen típico
SATURADOS			
Butanoico	4:0	Butírico	Mantequilla
Hexanoico	6:0	Caprícoo	Mantequilla
Octanoico	8:0	Caprílico	Aceite de coco
Decanoico	10:0	Cáprico	Aceite de coco
Dodecanoico	12:0	Láurico	Aceite de coco
Tetradecanoico	14:0	Mirístico	Mantequilla, aceite de coco
Hexadecanoico	16:0	Palmitico	La mayoría de grasas y aceites
Octadecanoico	18:0	Estearico	La mayoría de grasas y aceites
Eicosanoico	20:0	Araquidico	Aceite de mani
Docosanoico	22:0	Behénico	Aceite de mani
INSATURADOS			
Monoin saturados			
9-Decenoico	10:1	Caproleico	Mantequilla
9-Docenoico	12:1	Lauroleico	Mantequilla
9-Tetradecenoico	14:1	Miristoleico	Mantequilla
9-Hexadecenoico	16:1	Palmitoleico	Algunos aceites de pescado, grasa de vacuno
9-Octadecenoico	18:1	Oleico	La mayoría de grasas y aceites
9-Octadecenoico	18:1	Elaidico	Mantequilla
11- Octadecenoico	18:1	Vaccénico	Mantequilla
9-Eicosaenoico	20:1	Gadoleico	Manteca de cerdo
13-Docosaenoico	22:1	Erúxico	Aceite de canola
Poliinsaturados			
9,12-Octadecadienoico	18:2	Linoleico	La mayoría de grasas y aceites
9,12,15-Octadecatrienoico	18:3	Linolénico	Aceites de soya y canola
5,8,11,14-Eicosatetraenoico	20:4	Araquidónico	Algunos aceites de pescado
5,8,11,14,17-Eicosapentaenoico	20:5	EPA	Algunos aceites de pescado
4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoico	22:6	DHA	Algunos aceites de pescado

Fuente: (Badui Dergal, 2006)

Este aceite de anchoveta contiene una gran cantidad de ácidos grasos, pero dos destacan en su perfil lipídico: el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA). Ambos son ácidos grasos poliinsaturados pertenecientes a la serie Omega 3, que son esenciales, debido a que nuestro organismo no puede producirlos y, por lo tanto, requiere obtenerlos de una fuente externa (Rodríguez Hernández, C. Reyes, A. Pino, & Raguez Fortes, 2021).

La composición química del aceite de pescado está influenciada por diversos factores, entre los que se incluyen: especie de pescado, composición del plancton y periodo del año correspondiente, así como las condiciones del pescado durante el proceso de elaboración. Un pescado de baja calidad genera un aceite de olor desagradable con un alto contenido de azufre, siendo un defecto que afecta tanto su precio como su uso (Nasopoulou & Zabetakis, 2012).

Tabla 2: Contenido de EPA y DHA del aceite de diferentes especies marinas

	EPA (g/100g)	DHA (g/100g)
Jurel	14	10
Salmon	7	10.8
Trucha	4.5	8.6
Sardina	16	10
Anchoveta	11	10
Atún	13	10
Bacalao	11	12

Fuente: (Valenzuela B., Sanhueza C., & De la Barra D., 2012)

En cuanto a su composición de ácidos grasos lo podemos observar en la siguiente tabla obtenida del (Codex Alimentarius, 2021), donde se puede observar también una comparación del aceite de anchoveta con la de otras especies.

Tabla 3: Composición de ácidos grasos del aceite de anchoveta

Ácidos grasos	Anchoa (Sección 2.1.1)	Atún (Sección 2.1.2)	Krill (Sección 2.1.3)	Ábalo atlántico (Menhaden) (Sección 2.1.4)	Salmón (Sección 2.1.5)		Hígado de bacalao (Sección 2.3.1)
					Silvestre	Piscicultura	
C14:0 ácido mirístico	2,7-11,5	ND-5,0	5,0-13,0	8,0-11,0	2,0-5,0	1,5-5,5	2,0-6,0
C15:0 ácido pentadecanoico	ND-1,5	ND-2,0	NA	ND-1,0	ND-1,0	ND-0,5	ND-0,5
C16:0 ácido palmítico	13,0-22,0	14,0-24,0	17,0-24,6	18,0-20,0	10,0-16,0	6,5-12,0	7,0-14,0
C16:1 (n-7) ácido palmitoleico	4,0-12,6	ND-12,5	2,5-9,0	9,0-13,0	4,0-6,0	2,0-5,0	4,5-11,5
C17:0 ácido heptadecanoico	ND-2,0	ND-3,0	NA	ND-1,0	ND-1,0	ND-0,5	NA
C18:0 ácido esteárico	1,0-7,0	ND-7,5	NA	2,5-4,0	2,0-5,0	2,0-5,0	1,0-4,0
C18:1 (n-7) ácido vaccénico	1,7-3,7	ND-7,0	4,7-8,1	2,5-3,5	1,5-2,5	NA	2,0-7,0
C18:1 (n-9) ácido oleico	3,6-17,0	10,0-25,0	6,0-14,5	5,5-8,5	8,0-16,0	30,0-47,0	12,0-21,0
C18:2 (n-6) ácido linoleico	ND-3,5	ND-3,0	ND-3,0	2,0-3,5	1,5-2,5	8,0-15,0	0,5-3,0
C18:3 (n-3) ácido linolénico	ND-7,0	ND-2,0	0,1-4,7	ND-2,0	ND-2,0	3,0-6,0	ND-2,0
C18:3 (n-6) ácido γ-linolénico	ND-5,0	ND-4,0	NA	ND-2,5	ND-2,0	ND-0,5	NA
C18:4 (n-3) ácido estearidónico	ND-5,0	ND-2,0	1,0-8,1	1,5-3,0	1,0-4,0	0,5-1,5	0,5-4,5
C20:0 ácido araquídico	ND-1,8	ND-2,5	NA	0,1-0,5	ND-0,5	0,1-0,5	NA
C20:1 (n-9) ácido eicosenoico	ND-4,0	ND-2,5	NA	ND-0,5	2,0-10,0	1,5-7,0	5,0-17,0
C20:1 (n-11) ácido eicosenoico	ND-4,0	ND-3,0	NA	0,5-2,0	NA	NA	1,0-5,5
C20:4 (n-6) ácido araquidónico	ND-2,5	ND-3,0	NA	ND-2,0	0,5-2,5	ND-1,2	ND-1,5
C20:4 (n-3) ácido eicosatetraenoico	ND-2,0	ND-1,0	NA	NA	1,0-3,0	0,5-1,0	ND-2,0
C20:5 (n-3) ácido eicosapentaenoico	5,0-26,0	2,5-9,0	14,3-28,0	12,5-19,0	6,5-11,5	2,0-6,0	7,0-16,0
C21:5 (n-3) ácido heneicosapentaenoico	ND-4,0	ND-1,0	NA	0,5-1,0	ND-4,0	NA	ND-1,5
C22:1 (n-9) ácido erúico	ND-2,3	ND-2,0	ND-1,5	0,1-0,5	ND-1,5	3,0-7,0	ND-1,5
C22:1 (n-11) ácido cetoleico	ND-5,6	ND-1,0	NA	ND-0,1	1,0-1,5	NA	5,0-12,0
C22:5 (n-3) ácido docosapentaenoico	ND-4,0	ND-3,0	ND-0,7	2,0-3,0	1,5-3,0	1,0-2,5	0,5-3,0
C22:6 (n-3) ácido docosahexaenoico	4,0-26,5	21,0-42,5	7,1-15,7	5,0-11,5	6,0-14,0	3,0-10,0	6,0-18,0

Fuente: (Codex Alimentarius, 2021)

Los AG se encuentran en los alimentos en forma de combinaciones, y algunos alimentos son excelentes proveedores de ácidos grasos específicos. En las siguientes tablas se muestran las fuentes mas comunes de ácidos grasos.

Tabla 4: Ácidos Grasos ω -6 importantes a nivel nutricional

Nombre común	Abreviatura omega	Fuentes principales
Ácido linoleico	18:2n-6 (LA)	Mayoría de aceites vegetales
Ácido γ -linolénico	18:3n-6 (GLA)	Aceites de semillas de onagra, borraja y grosella negra
Ácido dihomo- γ -linolenico	20:3n-6	Componente en cantidad mínima de tejidos animales
Acido araquidónico	20:4n-6 (AA)	Grasas animales, hígado, lípidos del huevo, pescado
Ácido docosatetraenoico	22:4n-6	Componente en cantidad mínima de tejidos animales
Ácido docosapentaenoico	25:5n-6 (DPA)	Componente en cantidad mínima de tejidos animales

Tabla 5: Ácidos Grasos ω -3 importantes a nivel nutricional

Nombre común	Abreviatura omega	Fuentes principales
Ácido α -linolénico	18:3n-3 (ALA)	Aceites de lino, perilla, canola y soja
Ácido estearidónico	18:4n-3 (SDA)	Aceites de pescado, aceite de soja modificado genéticamente, aceite de semilla de grosella negra.
	20:4n-3	componente en cantidad mínima de tejidos animales
Ácido eicosapentaenoico	20:5n-3 (EPA)	pescado, especialmente el azul (salmón, arenque, anchoa, y caballa)
Ácido docosapentaenoico	22:5n-3 (DPA)	pescado, especialmente el azul (salmón, arenque, anchoa, y caballa)
Ácido docosahexaenoico	22:6n-3 (DHA)	pescado, especialmente el azul (salmón, arenque, anchoa, y caballa)

2.2.1.4. Factores que afectan su calidad

El deterioro en la calidad de los alimentos se debe principalmente a la oxidación de los lípidos. El aceite se oxida fácilmente en presencia de luz y oxígeno dando como resultado la formación de una variedad de productos de degradación con olores y sabores desagradables, además esta oxidación puede reducir el valor nutritivo de los alimentos y generar algunos productos potencialmente tóxicos (Czerniak, Kubiak, Białas, & Jankowski, 2015),

En la siguiente figura obtenida de (Badui Dergal, 2006) podemos observar los agentes promotores e inhibidores de la oxidación también depende de la distribución de los lípidos en el alimento, así como de su área de exposición.

<i>Promotores</i>	<i>Inhibidores</i>
Temperaturas altas	Refrigeración
Metales, Cu, Fe, etcétera	Secuestradores
Peróxidos de grasas oxidadas	Antioxidantes
Lipoxidasa	Escaldado
Presión de oxígeno	Gas inerte o vacío
Luz UV, azul	Empaque opaco
Poliinsaturación	Hidrogenación de ácidos insaturados

Figura 9: Factores que influyen en la oxidación de lípidos

El aceite de pescado es altamente propenso a la oxidación debido a la presencia de los ácidos grasos poliinsaturados, esto debido al gran número de enlaces dobles que estos presentan, por tal motivo, generalmente, la estabilidad oxidativa del aceite de pescado disminuye con una cantidad creciente de ácidos grasos insaturados saludables. (Mozuraityte, Kristinova, B. Standal, K. Carvajal, & Aursand, 2016).

Es por ello que, a pesar de su alto contenido de ácidos grasos, su propensión a la oxidación restringe su uso directo como aditivo en la alimentación. Mediante la microencapsulación de los AG se pueden generar productos en polvo que se componen de microgotas revestidas con una matriz de carbohidratos, proteínas o combinaciones de estos. Esta matriz ofrece una defensa frente a elementos como el oxígeno, la luz y la temperatura, reduciendo el proceso de oxidación y permitiendo su uso como añadido nutricional en una amplia gama de productos de alimentación (Bannikova, Evteev, Pankin, Evdokimov, & Kasapis, 2018)

Los aceites de pescado experimentan oxidación mucho más rápido que los aceites de origen vegetal o animal y con una interrupción menos marcada en el período de inducción. Es importante comprender el mecanismo de oxidación y los principales factores de la cinética de oxidación para regular y predecir la estabilidad del aceite (Kolanowski, Ziolkowski, Weißbrodt, & Kunz, 2016).

La oxidación ocurre cuando un átomo cede un electrón a otro átomo distinto mediante el proceso de la reducción. Como todos los demás aceites, los aceites de pescado se oxidan mediante procesos de autooxidación y fotooxidación (Mozuraityte, Kristinova, B. Standal, K. Carvajal, & Aursand, 2016).

En la autooxidación se generan compuestos que mantienen y aceleran la reacción y se sintetizan sustancias de bajo peso molecular que confieren el olor típico de grasa oxidada, incluye 3 etapas: inicio, propagación y finalización. Una característica importante de la autooxidación es que es un proceso autocatalítico, una vez que el proceso ha comenzado la velocidad de reacción incrementa conforme la reacción progresa. Al comienzo la velocidad es lenta y demasiado pequeña como para cuantificarlo (inducción, in, paso 1), durante la propagación (pasos 2 y 3) la velocidad de reacción aumenta, al igual que la terminación (pasos 4-6).

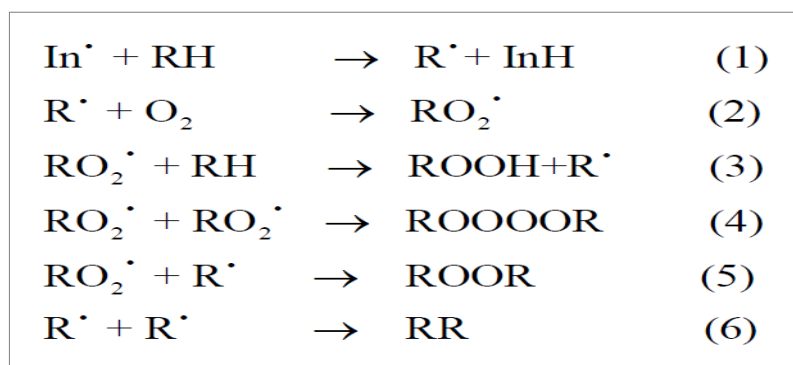


Figura 10: Fases del Proceso de oxidación

Ya que los peróxidos lipídicos y los aldehídos son los principales productos de oxidación, se ha seleccionado el índice de peróxido y el índice de anisidina como métodos analíticos estándar para evaluar el estado de oxidación de los aceites (Mozuraityte, Kristinova, B. Standal, K. Carvajal, & Aursand, 2016).

Según el (Codex Alimentarius, 2021) especifica que los valores del índice de peróxido en aceites de pescado destinados al consumo humano deben ser inferior a 5 mEq/kg y los valores del índice de anisidina debe ser inferior a 20. Estos valores se dan en función de la palatabilidad y no del efecto de los aceites oxidados en la salud humana (Albert, Cameron Smith, Hofman, & Cutfield, 2013).

2.2.1.5. Beneficios nutricionales y funcionales.

Estos aceites, son un valioso complemento a la dieta humana ya presentan componentes esenciales para el desarrollo del organismo y tratamiento de varias enfermedades, gracias a su valioso aporte nutritivo y propiedades antioxidantes (Czerniak, Kubiak, Białas, & Jankowski, 2015).

Se considera un componente funcional importante para preservar el funcionamiento óptimo del corazón, el cerebro y el sistema neurológico, además es rico en vitaminas A, D y retinol, y se suman propiedades benéficas para los huesos y para la estimulación natural de las defensas orgánicas. Esto debido a los altos niveles de ácidos poliinsaturados omega-3, particularmente el ácido docosahexaenoico (DHA) y el ácido eicosapentaenoico (EPA) (Czerniak, Kubiak, Białas, & Jankowski, 2015).

Debido a su impacto en la fisiología de las células y los tejidos, el EPA y el DHA son importantes para mantener una buena salud y prevenir enfermedades. Los ácidos grasos omega-3 de origen marino ofrecen protección contra la morbilidad y la mortalidad cardiovascular. Pueden ser útiles como agentes terapéuticos en determinadas afecciones, como la artritis reumatoide, aunque es necesaria una gran ingesta (Calder, 2013).

Además, a medida que crece la población y aumenta la demanda de los consumidores, existe una necesidad creciente de suministro de pescado, que la acuicultura puede satisfacer (Nasopoulou & Zabetakis, 2012).

2.2.1.6. Producción del aceite de pescado

En el año 2023 se dio una reducción en 54,0% en la elaboración de productos como la harina y aceite de pescado, como efecto de una menor disponibilidad de la materia prima (anchoveta) por las condiciones oceanográficas desfavorables.

Según el Anuario estadístico del (Ministerio de la Producción, 2023), las principales zonas de producción fueron los mostrados en la siguiente figura:

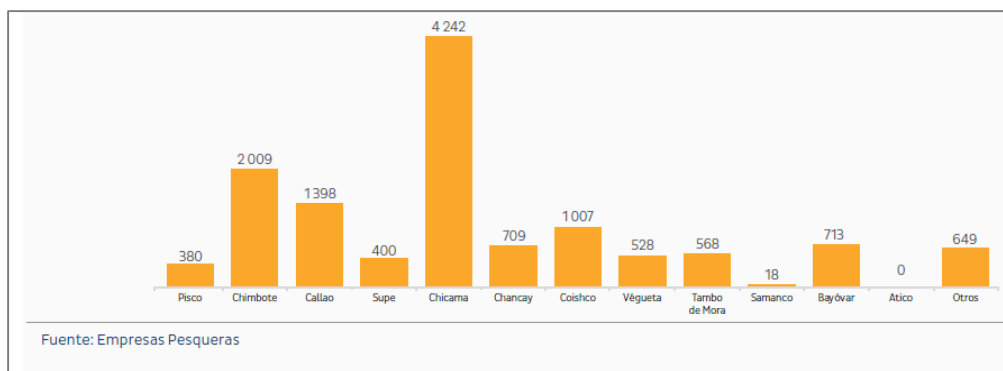


Figura 11: Producción de aceite de pescado, 2023

La producción de harina y aceite de pescado se realiza en cerca de 150 plantas de producción, ubicadas a lo largo del litoral peruano. Se estima que, por cada tonelada de pescado que se procesa, se obtienen cerca de 250 Kg. de harina, y 110 litros de aceite. En la actualidad en el Perú hay 7 grandes grupos pesqueros, los cuales se mencionan a continuación: Tecnológica de Alimentos (TASA), Copeinca, Hayduk, Austral, Diamante, Exalmar y la empresa pesquera CFG Investment S.A.C. Estas empresas en conjunto representan el 55% de las exportaciones pesqueras (Ministerio de la Producción, 2023).

Demanda interna: Las ventas internas de aceite de pescado constituyen una parte significativa de la producción del país, y su uso es principalmente dirigido a la industria de la oleaginosa y a la reexportación. Sin embargo, en años recientes, esta proporción ha ido decreciendo. Esto se debe al hallazgo de sus excepcionales características para la salud humana, así como para la alimentación animal, lo que le otorgó mayor relevancia en el mercado global (incremento en la demanda acuícola por el producto). Esto provocó un incremento en los precios, resultando estos menos atractivos para la industria oleaginosa del país. Esto se debe al aumento previsto de la demanda acuícola por el producto, que es inelástica dado que no existen sustitutos (Ministerio de la Producción, 2023).

Demanda externa: De acuerdo con datos de la IFFO, los países con mayor demanda son Chile, Noruega, Dinamarca y Bélgica. La producción interna de los dos primeros se consume principalmente por los consumidores locales. Estos son países que poseen una amplia industria acuícola (Noruega y Chile

son los mayores productores de Salmón a nivel global). Se estima que el consumo de las granjas de salmón demanda el 60% de la producción global de aceite y el 20% de la producción de harina. En el mercado global, la utilización del aceite de pescado se reúne principalmente en la acuicultura (57%), en la industria de las algas (31%) y en el uso industrial (10%). Estas exportaciones por países se pueden apreciar en la siguiente gráfica (Ministerio de la Producción, 2023).

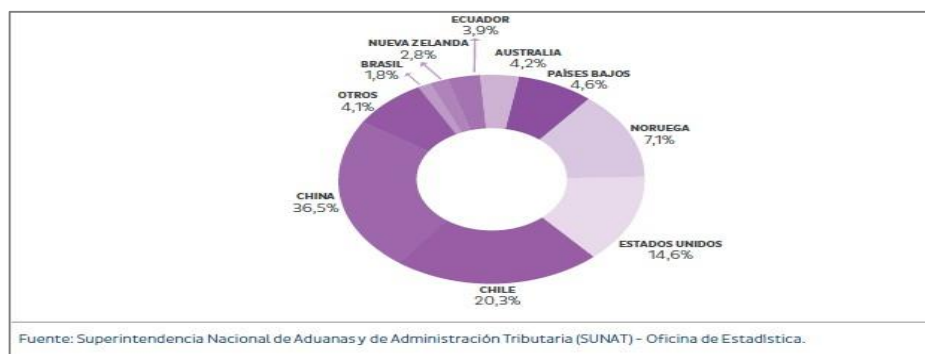


Figura 12: Exportaciones de aceite de pescado según país de destino

2.2.1.7. Usos del aceite de anchoveta

El uso primordial de este aceite en la actualidad se encuentra en la industria de la acuicultura. Esta industria absorbe el 76% de la producción de este aceite, una necesidad que está en constante aumento. Otra industria que requiere este aceite, aunque cada vez menos, es la hidrogenación para la elaboración de mantecas y margarinas, la cual se calcula actualmente en un 11% de la producción. No obstante, esto está disminuyendo debido al debate sobre los impactos nutricionales y en la salud de los isómeros trans, que se generan en gran cantidad y diversidad durante la hidrogenación de los aceites marinos (Valenzuela B., Sanhueza C., & De la Barra D., 2012).

El sector destinado a enriquecer alimentos en ácidos grasos ω -3 ha experimentado un crecimiento significativo, dado que estos ácidos grasos se presentan como una excelente opción para el desarrollo de alimentos funcionales. Y, por último, el sector farmacéutico y nutracéutico constituye un porcentaje significativo de la demanda actual, empleándose en la elaboración de cápsulas y otras formas de consumo (Valenzuela B., Sanhueza C., & De la Barra D., 2012).

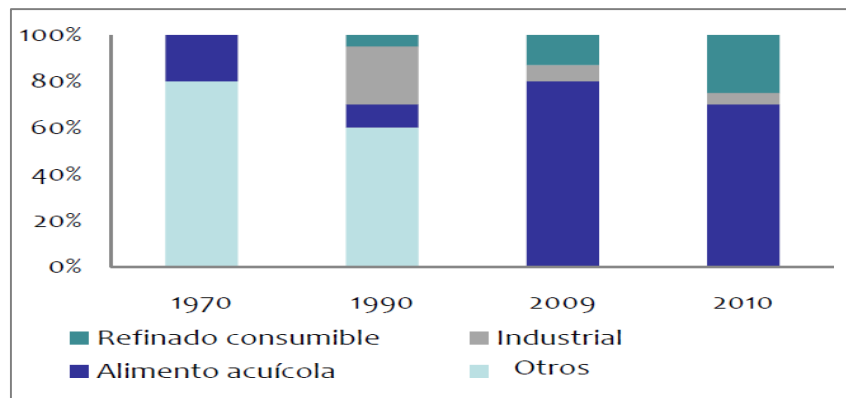


Figura 13: Usos del aceite de anchoveta

2.2.2. Microencapsulación de aceites.

2.2.2.1. Definición y principios de la microencapsulación.

La microencapsulación es definida como una tecnología de empaquetamiento, Se puede considerar como una manera particular de envolver diferentes materiales, ya sean líquidos, sólidos o gaseosos, a través de un material denominado membrana, que posee ciertos atributos químicos que facilitan la envoltura del agente activo formando microcápsulas, cuyo tamaño se encuentra comprendido entre 1 a 1000 μm y su función principal es aislar y proteger el componente del medio que lo rodea (Rodríguez Hernández, C. Reyes, A. Pino, & Raguez Fortes, 2021). Usualmente, las microcápsulas poseen la capacidad de aportar ciertos atributos funcionales, alterando y optimizando la forma física y las características de un material (Jyothi, Seethadevi, Suria Prabha, & Muthup, 2012).

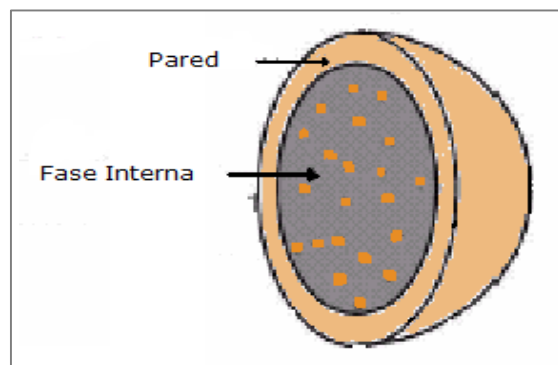


Figura 14: Estructura general de una microcápsula

Como podemos observar en la figura los materiales que intervienen en la microencapsulación son el material encapsulado, es decir la fase interna, y la pared la cual es una membrana semipermeable, de forma esférica la cual tiene como objetivo resguardar a la fase interna del entorno, de la interacción con otros compuestos y de protegerlo contra la oxidación ya sea a causa de la luz o del oxígeno. Esta pared se puede escoger de una amplia gama de materiales como carbohidratos, proteínas, gomas, en función del agente activo a encapsular (Kalkumbe, Waghmare, & Kamble, 2022).

El material a recubrir puede existir en forma líquida o sólida, o pueden estar compuestos de material disuelto o disperso y pueden ser vitaminas, minerales, colorantes, prebióticos, probióticos, sabores nutraceúticos, antioxidantes, olores, aceites, enzimas, bacterias, perfumes, e incluso fertilizantes (Kaur, Kumar, Singh, Pal, & Sharma, 2024).

En la siguiente tabla se muestran algunos de los materiales, útiles en este campo de la industria, que se someten a la microencapsulación:

Tabla 6: Materiales que actualmente se emplean en microcápsulas

MATERIAL	ALGUNAS APLICACIONES EN LA INDUSTRIA
Acidulantes	Modificadores de sabor, reguladores de pH, preservantes.
Saborizantes	Gomas de mascar, jugos, confitería.
Enzimas	Productos lácteos, panes, estabilizadores.
Microorganismos	En productos lácteos como estabilizador, madurador de quesos.
Lípidos	Fortificadores de galletas, aceites de pescado como reconstituyente.
Colorantes	Bebidas, snaks, embutidos.
Endulzantes	Bebidas, gomas de mascar, confites.
Vitaminas y minerales	Fortificadores de algunos alimentos.

En cuanto a los métodos usado para microencapsular tenemos los siguientes: secado por aspersión, liofilización, coacervación y extrusión. En términos generales, la microencapsulación ofrece un medio para envasar, separar y almacenar de materiales a escala microscópica para su liberación futura bajo condiciones reguladas. Esta técnica se ha utilizado para preservar y/o proteger diversos componentes (Rodríguez Hernández, C. Reyes, A. Pino, & Raguez Fortes, 2021).

La microencapsulación es una tecnología utilizada en las industrias farmacéutica y química desde hace muchos años, y fue adoptada por la industria alimentaria con los objetivos generales de proporcionar protección a ingredientes sólidos, líquidos o gaseosos. También lo aplican la industria textil, metalúrgica, química, alimenticia, cosméticos.

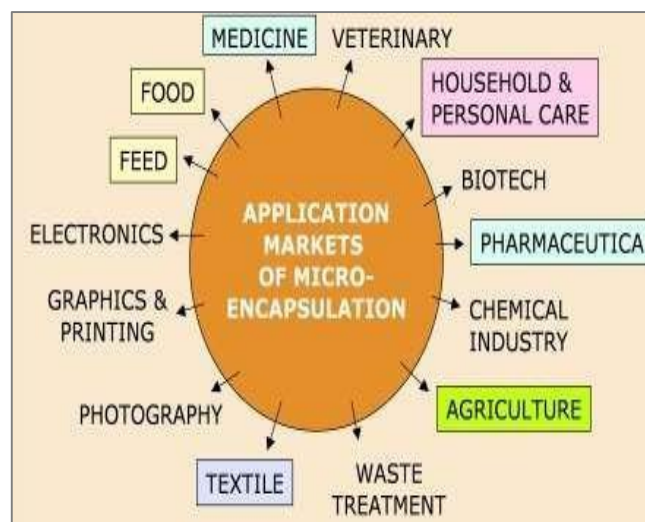


Figura 15: Aplicaciones de la microencapsulación

Como se indicó anteriormente para la microencapsulación se realizan emulsiones de aceite en agua, en donde se usarán como matrices encapsulantes una extensa gama de polímeros naturales o artificiales, para su posterior secado, y cuyo resultado será un producto sólido. Existen muchas técnicas utilizadas para la elaboración de las microcápsulas de aceite, y para su elección interfieren variables como costo, sensibilidad del aceite, tamaño de partícula requerido, características físicas y químicas de los componentes, y usos (Parra Huertas, 2010).

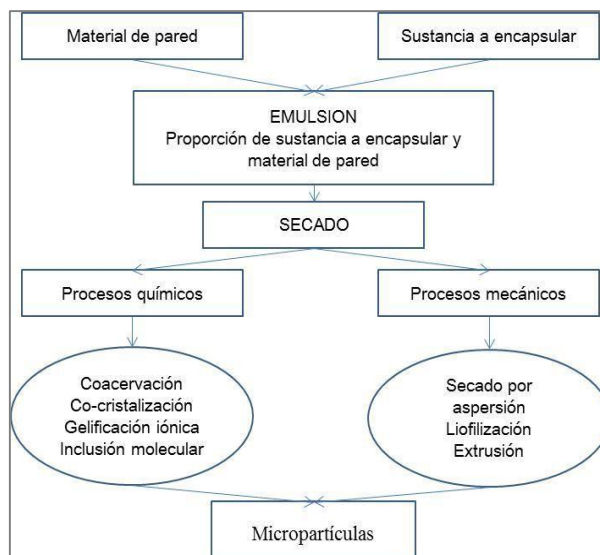


Figura 16: Preparación de aceites microencapsulados

2.2.2.2. Ventajas de la microencapsulación de aceites.

Debido a que el aceite en este caso de pescado es altamente inestable en condiciones naturales, se busca la forma de protegerlo y de esta manera evitar que pierda su valor nutricional, por ello la microencapsulación es una opción ampliamente aplicada, esta se prepara mediante secado de emulsiones de aceite en agua, para esto el aceite se encuentra disperso en matrices ya sea de carbohidratos y/o proteínas (Kalkumbe, Waghmare, & Kamble, 2022).

Las ventajas son muchas, y por ello se da el rápido crecimiento de esta técnica de empaque. Según (Rodríguez Hernández, C. Reyes, A. Pino, & Raguez Fortes, 2021) se encuentran las siguientes:

- Proteger el material de relleno, núcleo o agente activo de descomposición por acción con el oxígeno, humedad del aire o algún otro producto presente en el medio ambiente.
- Retardar o evitar la evaporación de un material volátil.
- Proteger productos sensibles a la luz o el calor.
- Evitar la pérdida de un olor característico o encubrir un sabor desagradable.
- Mejorar las propiedades de manipulación y transporte del material.

Resulta beneficioso en situaciones donde se busca preservar los componentes de una mezcla de manera individual, que de otra forma experimentarían una

reacción química. Por otro lado, el método de microencapsulación es crucial en situaciones donde se necesita la liberación regulada del agente activo en un medio específico, como en el caso de ciertos fármacos o pesticidas. Al utilizar un proceso de microencapsulación a un agente activo específico, hay características de las microcápsulas que pueden ser modificadas para satisfacer al máximo las necesidades del producto final, lo que aporta cierta flexibilidad al proceso de microencapsulación. (Jyothi, Seethadevi, Suria Prabha, & Muthup, 2012).

2.2.3. Materiales encapsulantes en la Microencapsulación

2.2.3.1. Características de los materiales encapsulantes.

Las características ideales del agente de encapsulación o matriz de encapsulación comprenden (Kaur, Kumar, Singh, Pal, & Sharma, 2024):

- Facilidad de manipulación durante el proceso de encapsulación.
- Baja viscosidad a altas concentraciones y fácil manipulación durante el proceso de encapsulación.
- Capacidad para dispersar o emulsionar el material activo y estabilizar la emulsión producida.
- Que no sea reactivo con el material encapsulado durante el proceso de elaboración y almacenamiento.
- Capacidad conservar el material activo durante el proceso de encapsulación o almacenamiento.
- Capacidad para proveer la máxima protección al material activo contra las condiciones ambientales (oxígeno, calor, luz, humedad)

El tipo de material que encapsula la emulsión influirá en la estabilidad antes de secar, también ejercerá influencia en el tamaño de las partículas, en las características de flujo, en las mecánicas y en la durabilidad del material deshidratado. Este material debe ser químicamente compatible con el material del núcleo y capaz de producir una capa que sea cohesiva con él. Es prácticamente inviable que una sustancia posea todas las características requeridas, por lo que a menudo se emplean mezclas de materiales (Jyothi, Seethadevi, Suria Prabha, & Muthup, 2012).

Una emulsión se compone de tres zonas, cada una con características fisicoquímicas distintas: fase dispersa, continua, interfase. Todas las moléculas o componentes de la emulsión se reparten en función de su concentración y polaridad, a través de las áreas previamente citadas. La formación de una emulsión sólida demanda un considerable volumen de energía y la existencia de moléculas capaces de reducir la tensión interfacial llamados agentes emulsionantes (Takashige, Iwamoto, Shiga, Kakizaki, & Yamaha, 2019).

La elaboración de la emulsión es crucial ya que determina las propiedades y características funcionales de las microcápsulas. Los materiales de pared deben tener la capacidad de generar emulsiones estables, con un tamaño de partícula uniforme. Además, estas emulsiones deben contener una gran cantidad de sólidos para que el proceso de secado por aspersión sea rentable. En el desarrollo de sistemas emulsionados destacan dos clases de componentes: Agente emulsionante y estabilizante (Lozinska, Glowacz, Artichowicz, & Lu, 2020).

El **agente emulsionante** es una o mezcla de especies química que promueven la formación de emulsiones y la estabilización en corto tiempo por acción interfacial. Se conocen dos clases de agentes emulsionantes utilizados en el procesamiento de alimentos.

- Surfactantes de bajo peso molecular (monoglicéridos, polisorbatos, ésteres de sacarosa, lecitina).
- Emulsionantes de alto peso molecular (proteínas y polisacáridos).

Un **agente estabilizante** se puede definir como un elemento químico que proporciona estabilidad a largo plazo a la emulsión, probablemente mediante un proceso de adsorción. Normalmente, los estabilizadores son biopolímeros, proteínas o polisacáridos; los surfactantes con bajo peso molecular no proporcionan estabilidad a largo plazo.

- Biopolímeros: Debe tener grupos hidrofóbicos en número suficiente y accesible sobre una escala de tiempo corto para que estas moléculas se adsorban en la interfase, alrededor de las gotas y deben formar una barrera macromolecular robusta en esta interfase.

- Los polisacáridos modifican principalmente la viscosidad de la fase continua, para disminuir la movilidad de los glóbulos en la emulsión.
- Las proteínas y algunos polisacáridos tienden a adsorberse en interfases aceite-agua, para formar capas estables alrededor de las gotas de aceite, y actúan como emulsionantes y estabilizantes.

Estas dos últimas influyen mucho en la estabilización de emulsiones aceite-agua, sus interacciones de repulsión o atracción en las interfases de aceite-agua pueden influir en las propiedades de estabilización (Czerniak, Kubiak, Białas, & Jankowski, 2015).

2.2.3.2. Proteínas como agentes encapsulantes.

Las proteínas son consideradas como importantes agentes de encapsulación, esto debido a sus características de emulsificación, espumantes, y de hidratación y gelificación de aceites y fragancias. Poseen el potencial de generar interfaces y películas, gracias a su carácter anfifílico. Sus características se alteran debido a la desnaturalización que puede surgir debido al proceso de secado (Gharsallaoui, Roudaut, Chambin, Voilley, & Saurel, 2007).

Por lo tanto, la unión entre proteínas se genera a través de la exposición de sus grupos hidrofóbicos. Además, es preferible que las proteínas tengan una buena solubilidad en agua cuando se emplean en procedimientos en base acuosa. Las proteínas lácteas son altamente apreciadas como componentes de la alimentación (Ixtaina, Julio, Wagner, Nolasco, & Tomás, 2015).

Caseínas: Estas se encuentran en forma de micelas en la leche fresca. Las caseínas y caseinatos tienen características tensioactivas que los transforman en agentes encapsulantes de gran capacidad para emulsionar, siendo el caseinato sódico el más empleado. Se ha comprobado que el caseinato de sodio posee propiedades de encapsulación superiores a las de la caseína micelar, esto se justifica debido a su estructura molecular, la elevada difusividad y las fuertes propiedades anfifílicas de las caseínas individuales que facilitan una distribución más eficiente alrededor de la superficie de los glóbulos grasos. Se ha descubierto que las caseínas tienen una fuerte adhesión a interfaces líquidas (en este caso, a la interfaz entre agua y aceite) (Vega & Roos, 2006).

2.2.3.3. Carbohidratos como agentes encapsulantes.

Estos materiales se han utilizado habitualmente como agentes encapsulantes, y son considerados adecuados debido a que presentan viscosidades bajas con contenidos altos de sólidos y buena solubilidad, pero la mayoría de estos no poseen las propiedades tensoactivas necesarias para una elevada eficiencia de microencapsulación. Es por ello que comúnmente se les combina con otros materiales ya sea con proteínas o gomas ((Gharsallaoui, Roudaut, Chambin, Voilley, & Saurel, 2007)

Lactosa: este carbohidrato es ampliamente utilizado junto con la atomización, debido a que presenta olor y sabor neutro, además tiene alta solubilidad y baja viscosidad. La lactosa en estado amorfo actúa como un sellador hidrofílico que limita significativamente la difusión del núcleo hidrofóbico a través de la pared y por lo tanto conduce a valores de eficiencia alta de microencapsulación. Normalmente se emplea en mezcla con proteínas de la leche para imitar la composición de la leche como un sistema modelo emulsión. Es tal vez el material que forma la matriz continua más ampliamente usado para los propósitos de secado por pulverización. La lactosa muestra muchas características de encapsulantes ideales (no emulsionante), ya que tiene un sabor relativamente insípido y suficiente solubilidad y su solución concentrada tiene una baja viscosidad. Productos lácteos se hacen a menudo mediante secado por pulverización de soluciones concentradas y lactosa previamente precristalizada. La precristalización es necesaria para evitar problemas de coagulación durante el secado y el almacenamiento asociado con la higroscopicidad y la plastificación de lactosa amorfa. Proporciones más altas de lactosa a la proteína también reducen la agregación de glóbulos de grasa en la emulsión durante el secado, lo que resulta en menos grasa libre en el polvo. Las condiciones de almacenamiento deben ser monitorizados cuidadosamente para evitar la cristalización de lactosa y posterior liberación del material encapsulado (Ixtaina, Julio, Wagner, Nolasco, & Tomás, 2015).

Maltodextrina: Las maltodextrinas son productos de hidrólisis del almidón con equivalente de dextrosa inferior a 20. Carecen de propiedades lipofílicas, por lo que son pésimos agentes emulsionantes, aunque brindan una buena

protección al aceite que logran encapsular (Linton Charles, Ahadi Abdillah, Rizky Saraswati, Sridhar, & Balderamos, 2021).

Aunque su poder emulsionante es limitado, son frecuentemente empleadas en combinación con goma arábica, esto se debe a que, al tener un peso molecular muy distinto (1,8 - 1700 kDa), promueven la continuidad estructural durante la formación de la película encapsulante, generando así que mejore la eficiencia de encapsulación, sin embargo esto depende de su grado de hidrólisis, ya que si el equivalente de dextrosa es muy bajo no presenta el efecto antes señalado (Lopez Hernandez, 2010).

A diferencia de almidón, las Maltodextrinas son fácilmente solubles en agua, maltodextrinas con muy bajo equivalente de dextrosa son utilizados como sustitutos de la grasa en productos como helados y márgenes bajos en calorías, ya que entre sus características funcionales se encuentran el aumento de volumen, la gelificación, y la prevención de la cristalización, crio-protectores, dispersantes, y agentes aglutinantes. Las maltodextrinas disminuyen la velocidad de las reacciones de Maillard al emplearse en la microencapsulación (Haryani Anwar, 2011)

Gomas: Poseen relativamente baja actividad superficial, pero son magníficos estabilizantes de emulsiones, excelentes propiedades emulsificantes (se le atribuyen a la fracción de proteína presente en la goma) y formador de películas (Gharsallaoui, Roudaut, Chambin, Voilley, & Saurel, 2007).

La goma arábica es el hidrocoloide aniónico más utilizado en las industrias de los alimentos y farmacéutica. Se obtiene del exudado de la corteza del árbol *Acacia Senegal*. Es un heteropolisacárido ramificado que contienen cerca del 2% de un polipéptido (unida mediante enlaces covalentes). Puede generar películas y propiciar que se forme una capa macromolecular estable alrededor de la gota de aceite (Linton Charles, Ahadi Abdillah, Rizky Saraswati, Sridhar, & Balderamos, 2021).

Su adsorción en la interfase aceite-agua hace que se forme una película viscoelástica, en donde los lípidos ayudan a que aumente la coherencia de la estructura (esto se da debido a la formación de uniones con las cadenas de la goma arábica). Su actividad superficial es baja, en comparación con las proteínas (Matsumura, Satake, Egami, & Mori, 2000).

2.2.4. Técnicas de microencapsulación aplicadas a aceites.

Existen varias técnicas de encapsulación entre los que destacan el secado por aspersión, extrusión, aspersión en frío, lecho fluidizado, entre otros. La elección del método se basa en múltiples factores que incluyen el coste, las características del material a encapsular, el tamaño requerido de las microcápsulas, el uso y los mecanismos de liberación (Parra Huertas, 2010).

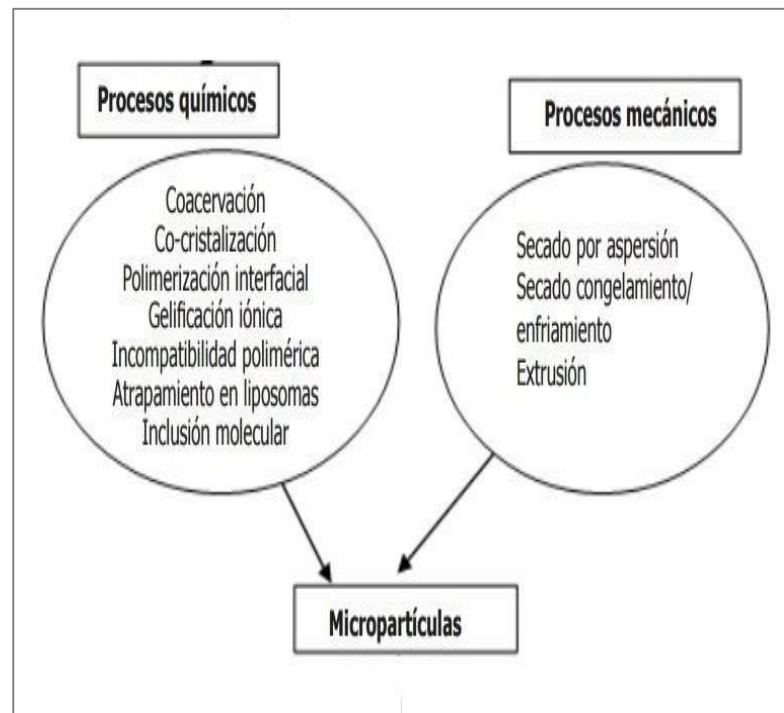


Figura 17: Diferentes procesos de microencapsulación

2.2.4.1. Secado por aspersión.

Es el procedimiento más económico y flexible, por ende, el más frecuentemente empleado. El procedimiento consiste en atomizar la solución que será secada en forma de gotas muy finas, en el seno de una corriente de gas caliente, usualmente aire. Se generan partículas de geometría esférica, que tienen la apariencia de esferillas huecas (Lopez Hernandez, 2010).

Este tipo de secado se ha utilizado ampliamente para el secado de alimentos sensibles al calor, medicamentos y otras sustancias, a causa de la rápida evaporación del disolvente. En este proceso de secado, el disolvente, que usualmente es agua, se evapora rápidamente y el atrapamiento del compuesto

de interés ocurre casi de inmediato. Esta propiedad requerida exige una revisión rigurosa de los materiales de encapsulación que se emplearán, además de una mejora en las condiciones de operación. En contraste con otros métodos tradicionales de microencapsulación, este método presenta la atractiva ventaja de generar microcápsulas en un simple proceso continuo (Gharsallaoui, Roudaut, Chambin, Voilley, & Saurel, 2007).

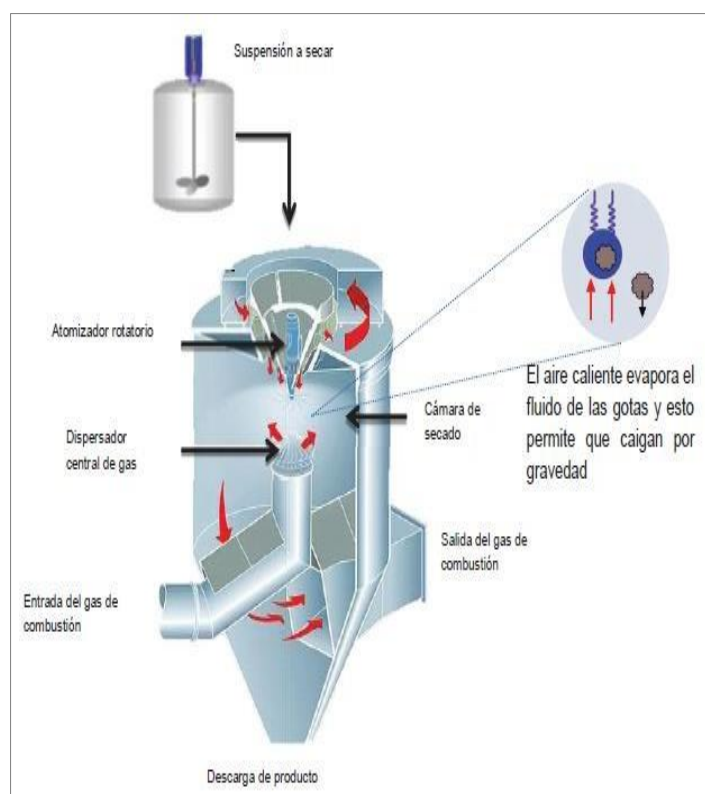


Figura 18: Microencapsulación mediante secado por atomización

2.2.4.2. Liofilización

Es la técnica más adecuada para la desecación prácticamente todos los materiales sensibles al calor y aromatizantes, gracias a la baja temperatura del procedimiento. A pesar de que el periodo de desecación es extenso (cerca de 20 horas), el procedimiento es simple y suave, dado que todo el proceso se lleva a cabo bajo condiciones de baja temperatura y baja presión (las condiciones de sublimación del hielo). Las microcápsulas liofilizadas poseen una estructura con mayor porosidad en comparación con las atomizadas. Es frecuentemente empleado para encapsular aceites aromáticos y pigmentos (Gharsallaoui, Roudaut, Chambin, Voilley, & Saurel, 2007).

El proceso de liofilización, debido a sus bajas temperaturas, resulta especialmente adecuado para aceites altamente susceptibles a la oxidación, como los aceites de pescado, o para aceites aromáticos y pigmentos. No obstante, este método resulta considerablemente menos interesante para la industria debido al elevado costo que implica, superior al secado por atomización. Asimismo, la aplicabilidad comercial también se ve drásticamente impactada por los extensos periodos de procesamiento (Parra Huertas, 2010).

2.2.4.3. Coacervación compleja.

Es un método altamente eficaz, aunque costoso, que se basa en la separación de una fase líquida del material envolvente de una solución polimérica, luego se envuelven las partículas suspendidas del agente activo, formando una capa homogénea. Luego se logra la solidificación del agente que encapsula. Por lo general, los procedimientos de coacervación se componen de tres fases, realizadas con agitación constante. Primero se combinan el material para encapsular, el material de cobertura y la fase continua, formando un sistema de tres fases. Luego, por medio de una variación en el pH o la temperatura, el material de cobertura se adhiere a la superficie del material activo, provocando una separación de fases entre la fase encapsulada y la fase continua. Finalmente, la cobertura se solidifica, ya sea a través de efectos térmicos, la evaporación de solventes u otros, generando así las microcápsulas (Jyothi, Seethadevi, Suria Prabha, & Muthup, 2012).

III. METODOLOGIA

3.1. Método.

La investigación se enmarcó dentro de un estudio experimental y aplicado, ya que permitió evaluar la eficiencia de diferentes combinaciones de encapsulantes en la estabilidad y calidad del aceite de anchoveta microencapsulado. Se adoptó un enfoque cuantitativo, dado que se recolectaron y analizaron datos numéricos relacionados con la eficiencia de encapsulación, estabilidad oxidativa y características fisicoquímicas del producto final.

La microencapsulación de aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados ha sido ampliamente estudiada en la literatura científica, y se ha demostrado que el uso de matrices encapsulantes adecuadas mejoró la estabilidad oxidativa y la biodisponibilidad de estos compuestos (Donmez et al., 2024). Investigaciones previas evidenciaron que la combinación de proteínas y polisacáridos en la encapsulación de aceites marinos incrementó significativamente la eficiencia del proceso y la protección del núcleo lipídico frente a la oxidación (Khoshnoudi-Nia et al., 2022). Además, el secado por aspersión ha sido validado como una técnica efectiva en la microencapsulación de aceites funcionales, garantizando un equilibrio entre estabilidad, eficiencia de encapsulación y viabilidad industrial (Encina et al., 2016).

En conclusión, el método experimental aplicado en este estudio permitió obtener datos cuantificables sobre la eficiencia de encapsulación y estabilidad oxidativa del aceite de anchoveta, proporcionando información relevante para su aplicación en la industria alimentaria. Este enfoque posibilitó evaluar de manera objetiva la influencia de las combinaciones de encapsulantes en la calidad del aceite microencapsulado, con el propósito de optimizar su funcionalidad y vida útil.

3.2. Tipo y diseño de investigación

El estudio fue de tipo experimental, debido a que implicó la manipulación de variables independientes, como la combinación de encapsulantes, con el propósito de determinar su efecto sobre las variables dependientes, que incluyeron la eficiencia de encapsulación, estabilidad oxidativa y propiedades fisicoquímicas del aceite

encapsulado. De acuerdo con(Hernández Sampieri, 2018), los estudios experimentales permitieron establecer relaciones de causalidad mediante la aplicación de tratamientos específicos a las unidades de estudio, lo que en este caso correspondió a la microencapsulación del aceite de anchoveta mediante secado por aspersión.

Asimismo, la investigación fue aplicada, ya que generó conocimientos de valor práctico para la industria alimentaria, con el fin de optimizar la estabilidad y funcionalidad del aceite de anchoveta en productos funcionales. Los estudios aplicados resolvieron problemas concretos en un área específica del conocimiento, en este caso, la estabilidad de ácidos grasos omega-3 mediante microencapsulación (Creswell, 2018).

El diseño de investigación correspondió a un diseño experimental completamente al azar, en el cual se evaluaron muestras de aceite de anchoveta sometidas a diferentes combinaciones de encapsulantes (maltodextrina-goma arábica y caseína-lactosa) bajo condiciones controladas de secado por aspersión. Se midió el impacto de cada formulación sobre la estabilidad oxidativa y las propiedades fisicoquímicas del aceite encapsulado. En este sentido, los estudios con diseño completamente al azar permitieron minimizar la variabilidad no controlada y mejorar la precisión de los resultados obtenidos (Montgomery, 2019)

3.3. Variables y operacionalización

El diseño del proyecto contempló dos variables independientes y seis variables dependientes, cuya interacción permitió evaluar la eficiencia y estabilidad del aceite de anchoveta microencapsulado.

3.3.1. Variables Independientes

Mezcla de encapsulantes: Se evaluaron dos combinaciones de materiales de pared utilizadas en el proceso de microencapsulación:

M1: Maltodextrina – Goma Arábica

M2: Caseína – Lactosa

Estas mezclas fueron seleccionadas debido a su capacidad para formar matrices protectoras que mejoraron la estabilidad oxidativa del aceite y facilitaron su incorporación en productos alimenticios.

Concentración de encapsulantes: Se prepararon disoluciones en fase acuosa con un 30% de sólidos de material de pared (M1 y M2), utilizando tres formulaciones para cada mezcla. Estas concentraciones fueron optimizadas para evaluar su influencia en la eficiencia de encapsulación y en las propiedades fisicoquímicas del producto final.

3.3.2. Variables Dependientes

Las siguientes seis variables permitieron determinar la calidad y estabilidad del aceite microencapsulado:

- Eficiencia de encapsulación: Se determinó el porcentaje de aceite retenido dentro de las microcápsulas, siendo este un parámetro clave para evaluar la efectividad del proceso.
- Densidad a granel y compresibilidad: Se analizó la densidad aparente del polvo microencapsulado y su comportamiento frente a la compresión, lo que influyó en su fluidez y almacenamiento.
- Solubilidad en agua: Se evaluó la capacidad de dispersión de las microcápsulas en un medio acuoso, criterio importante para su aplicación en formulaciones alimenticias líquidas o solubles.
- Humedad: Se midió el contenido de agua presente en las microcápsulas, dado que un nivel elevado pudo comprometer su estabilidad y favorecer la oxidación.
- Índice de peróxidos: Se determinó la formación de compuestos primarios de oxidación en el aceite encapsulado, permitiendo estimar su estabilidad oxidativa.
- Índice de anisidina: Se evaluó la presencia de productos secundarios de oxidación, proporcionando una visión más completa del grado de deterioro lipídico del aceite encapsulado.

3.4. Población, muestra y muestreo

La población del estudio estuvo conformada por aceite de anchoveta (*Engraulis ringens*), obtenido de la empresa Pesquera Centinela S.A.C., ubicada en Chimbote, Áncash, Perú. La muestra fue seleccionada de manera no probabilística por conveniencia, utilizando el 100% del aceite obtenido, lo que permitió garantizar la representatividad y disponibilidad del material para el estudio. La muestra estuvo compuesta por 600 ml de aceite de anchoveta, los cuales fueron procesados y analizados según los protocolos establecidos para su caracterización y microencapsulación.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

El aceite utilizado en la investigación fue aceite crudo de anchoveta (*Engraulis ringens*), obtenido de la empresa Pesquera Centinela S.A.C. Como materiales encapsulantes se utilizaron maltodextrina (MD), goma arábica (GA), caseína (CA) y lactosa (LA), adquiridos en grado alimentario, aptos para uso en alimentos.

La técnica seleccionada para la encapsulación fue el secado por aspersión, debido a su alta eficiencia en la formación de microcápsulas estables y su aplicabilidad industrial (Tonon et al., 2020). Este método consistió en atomizar emulsiones acuosas del aceite con diferentes combinaciones y concentraciones de encapsulantes, utilizando un secador por aspersión tipo Mini Spray Dryer B-290 (BÜCHI), bajo condiciones controladas de temperatura de entrada y salida del aire.

Para determinar la eficiencia de encapsulación se utilizó el método gravimétrico mediante extracción con solvente (hexano), siguiendo metodologías previamente validadas por diversos estudios (Yang et al., 2024). La densidad aparente y el índice de compresibilidad se evaluaron mediante la técnica descrita por la USP (Farmacopea de Estados Unidos, 2019), que es ampliamente utilizada en investigaciones sobre microencapsulación debido a su alta reproducibilidad y precisión. La solubilidad se determinó mediante dispersión de una cantidad definida de polvo en agua destilada y posterior centrifugación, siguiendo métodos recomendados por Calvo et al. (2020). El contenido de humedad de las microcápsulas fue determinado secando las muestras en la estufa. Finalmente, la estabilidad oxidativa se evaluó mediante los índices de peróxidos y anisidina,

empleando las metodologías estandarizadas descritas por la AOAC (1997), métodos ampliamente reconocidos por su confiabilidad y precisión para evaluar la oxidación lipídica en aceites encapsulados (Silva et al., 2021).

La validez del estudio se garantizó al emplear métodos analíticos estandarizados y ampliamente documentados en investigaciones previas sobre microencapsulación y estabilidad oxidativa de aceites. La confiabilidad fue asegurada mediante la repetibilidad de los ensayos y la utilización de equipos calibrados siguiendo procedimientos internacionales reconocidos, permitiendo así obtener resultados precisos y reproducibles.

Respecta los instrumentos, para la realización de los ensayos experimentales en la investigación, se utilizaron los siguientes materiales, reactivos, insumos y equipos de laboratorio, organizados por categorías:

Materiales de Laboratorio

- Matraces aforados de 50, 100 y 250 mL
- Probetas graduadas (10, 50 y 100 mL)
- Pipetas volumétricas y automáticas (0.1 – 10 mL)
- Vasos de precipitados (50, 100, 250 y 500 mL)
- Matraces Erlenmeyer (250 y 500 mL)
- Tubos de ensayo
- Placas de Petri
- Embudos de filtración
- Papel filtro Whatman N° 1
- Balanza analítica de precisión (0.0001 g)
- Espátulas y cucharillas de acero inoxidable
- Termómetros digitales (-10 a 100°C)

Reactivos y Solventes

- Reactivo de p-anisidina
- Reactivo de yoduro de potasio
- Solución de tiosulfato de sodio 0.01N
- Ácido acético-glacial

- Solución de almidón como indicador
- Reactivo de ácido tiobarbitúrico (TBA)
- Sulfato de sodio anhidro
- Nitrógeno líquido (para análisis en condiciones controladas)
- Maltodextrina (DE 10-20)
- Goma arábica
- Caseína micelar
- Lactosa monohidratada
- Agua destilada y desionizada
- Sustancias patrón para calibración (aceites comerciales certificados)

Equipos de Laboratorio

- Secador por aspersión (Spray Dryer) con entrada de aire caliente controlada (capacidad mínima 1 L/h)
- Cromatógrafo de gases, Shimadzu modelo 2010
- Extractor de grasas BERH EF
- Licuadora, OSTER
- Balanza analítica, PRECISA GRAVIMETRICS A G
- Balanza electrónica, PRECISA, modelo 4200 C
- Estufa, POL - EKO APARATURA

3.6. Procedimiento:

Para la microencapsulación del aceite de anchoveta, se seleccionaron dos mezclas encapsulantes:

- M1: Maltodextrina – Goma Arábica
- M2: Caseína – Lactosa

Se prepararon disoluciones en fase acuosa con una concentración de 30% de sólidos del material de pared (M1 y M2), utilizando tres formulaciones para cada mezcla (tabla 7).

3.6.1. Preparación de las soluciones encapsulantes

Mezcla M1 (Maltodextrina – Goma arábica)

- Se pesaron las cantidades requeridas de goma arábica y maltodextrina.
- La goma arábica se disolvió en agua destilada a 65°C, con agitación continua sobre una placa de calentamiento.
- Simultáneamente, la maltodextrina se disolvió en un recipiente aparte bajo las mismas condiciones de agitación.
- Una vez obtenidas soluciones homogéneas, ambas soluciones se mezclaron y se dejaron enfriar a temperatura ambiente.

Mezcla M2 (Caseína – Lactosa)

- La caseína se disolvió en agua destilada a 50°C, con agitación constante.
- Posteriormente, la solución se dejó reposar hasta alcanzar temperatura ambiente.
- Una vez enfriada, se incorporó la lactosa, manteniendo la agitación hasta obtener una solución completamente homogénea.

Incorporación del aceite

- Una vez enfriadas las soluciones de ambas mezclas encapsulantes (M1 y M2), se procedió a la adición del aceite de anchoveta.
- Se homogenizó la emulsión con un agitador de alta velocidad hasta obtener una dispersión estable, lista para el proceso de secado por aspersión.

Tabla 7: Concentraciones de los componentes de las matrices

FORMULACIÓN	MATRICES ENCAPSULANTES					
	M1: Goma arábica - Maltodextrina			M2: Caseína - Lactosa		
	Aceite	Goma arábica	Maltodextrina	Aceite	Caseína	Lactosa
PORCENTAJE	10%	30 %		10%	30 %	
F1	10	5	25	10	5	25
F2	10	15	15	10	15	15
F3	10	25	5	10	25	5

Se utilizará la siguiente nomenclatura para diferenciar cada formulación:

Tabla 8: Nomenclatura utilizada para cada formulación

FORMULACIÓN	MATRICES ENCAPSULANTES	
	M1: Goma arábica - Maltodextrina	M2: Caseína – Lactosa
F ₁	GM ₁	CL ₁
F ₂	GM ₂	CL ₂
F ₃	GM ₃	CL ₃

3.6.2. Procedimiento de obtención de aceites micro encapsulados

El diagrama de flujo representa el procedimiento experimental para la microencapsulación del aceite de anchoveta (*Engraulis ringens*) utilizando dos tipos de matrices encapsulantes y evaluando sus características fisicoquímicas tras el proceso.

La secuencia metodológica se detalla a continuación:

3.6.2.1. Aceite de Anchoveta (Caracterización de Materia Prima)

Se inicia con la obtención del aceite de anchoveta crudo, el cual es sometido a una caracterización inicial para determinar su composición en ácidos grasos y su estabilidad oxidativa.

3.6.2.2. Formulaciones

Se preparan disoluciones en fase acuosa con un 30% de sólidos de material de pared, las cuales se dividen en dos tipos de matrices encapsulantes:

- M1: Mezcla de Maltodextrina – Goma arábica (GM)
- M2: Mezcla de Caseína – Lactosa (CL)

Para cada matriz encapsulante se desarrollan tres formulaciones diferentes, denominadas GM1, GM2, GM3 para la matriz M1 y CL1, CL2, CL3 para la matriz M2.

3.6.2.3. Emulsión

La emulsificación del aceite de anchoveta se llevó a cabo con el propósito de generar una fase dispersa con una fracción volumétrica de $\phi = 0.1$, asegurando una relación adecuada entre el material emulsificante y el aceite de pescado de 3:1 (p/p). Para ello, se emplearon dos tipos de agentes encapsulantes, Maltodextrina-Goma arábica y Caseína-Lactosa, los cuales fueron previamente disueltos en agua destilada hasta obtener una solución homogénea.

Posteriormente, se procedió a la incorporación progresiva del aceite de anchoveta en la solución encapsulante, utilizando un agitador de tipo propela marina. Con el objetivo de garantizar una emulsión estable y uniforme, se mantuvo una agitación constante durante 20 minutos a una velocidad de 10,000 rpm, asegurando una dispersión eficiente del aceite dentro de la matriz encapsulante.

El proceso se realizó a temperatura ambiente ($\sim 25^{\circ}\text{C}$), evitando el calentamiento excesivo de la emulsión para preservar la integridad de los ácidos grasos poliinsaturados presentes en el aceite. La emulsión obtenida presentó una estructura homogénea y estable, lo que permitió su posterior procesamiento mediante secado por aspersión.

3.6.2.4. Secado

Una vez obtenida la emulsión, esta fue sometida a un proceso de secado por aspersión con el propósito de transformar la emulsión líquida en un polvo microencapsulado de alta estabilidad. Para ello, se empleó un Mini Spray Dryer B-290 (BÜCHI, Suiza), un equipo ampliamente utilizado en la microencapsulación de aceites debido a su precisión y eficiencia en la formación de partículas secas.

La emulsión fue alimentada al sistema de secado mediante una bomba peristáltica, la cual reguló el flujo de entrada a una velocidad de 4 mL/min. A través de una boquilla de atomización de doble fluido, se generaron microgotas que fueron expuestas a un flujo de aire caliente controlado. Se estableció una temperatura de entrada de $180 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y una temperatura de salida de $85 \pm 3^{\circ}\text{C}$, condiciones que favorecieron la rápida evaporación del agua sin comprometer la estabilidad térmica del aceite microencapsulado.

Durante el proceso, se mantuvo un flujo de aire de 30 m³/h y una presión de atomización de 5.5 bar, lo que permitió la formación de microcápsulas con estructura uniforme y una adecuada protección del aceite contra la oxidación. El polvo obtenido presentó buenas propiedades fisicoquímicas, destacándose su baja humedad, alta eficiencia de encapsulación y óptima solubilidad en agua, lo que lo hace adecuado para su incorporación en formulaciones alimentarias funcionales.

Este método de secado permitió obtener un producto microencapsulado con estabilidad mejorada, lo que facilita su aplicación en la industria alimentaria y contribuye a la conservación de los beneficios nutricionales del aceite de anchoveta.

3.6.2.5. Evaluación de Características Fisicoquímicas

Se realizan análisis de calidad y estabilidad del producto microencapsulado, evaluando los siguientes parámetros:

- Eficiencia de encapsulación: porcentaje de aceite retenido dentro de las microcápsulas.
- Densidad a granel y compresibilidad: determinación del comportamiento físico del polvo microencapsulado.
- Solubilidad en agua: evaluación de la dispersabilidad del producto en medios acuosos.
- Humedad: medición del contenido de agua en las microcápsulas, un factor clave en su estabilidad.
- Medidas de color: determinación de cambios visuales en el producto microencapsulado.
- Composición en ácidos grasos: análisis de la retención de ácidos grasos omega-3 tras el proceso de encapsulación.
- Índice de peróxidos: medición de la oxidación primaria del aceite microencapsulado.
- Índice de anisidina: determinación de la oxidación secundaria y estabilidad a largo plazo.

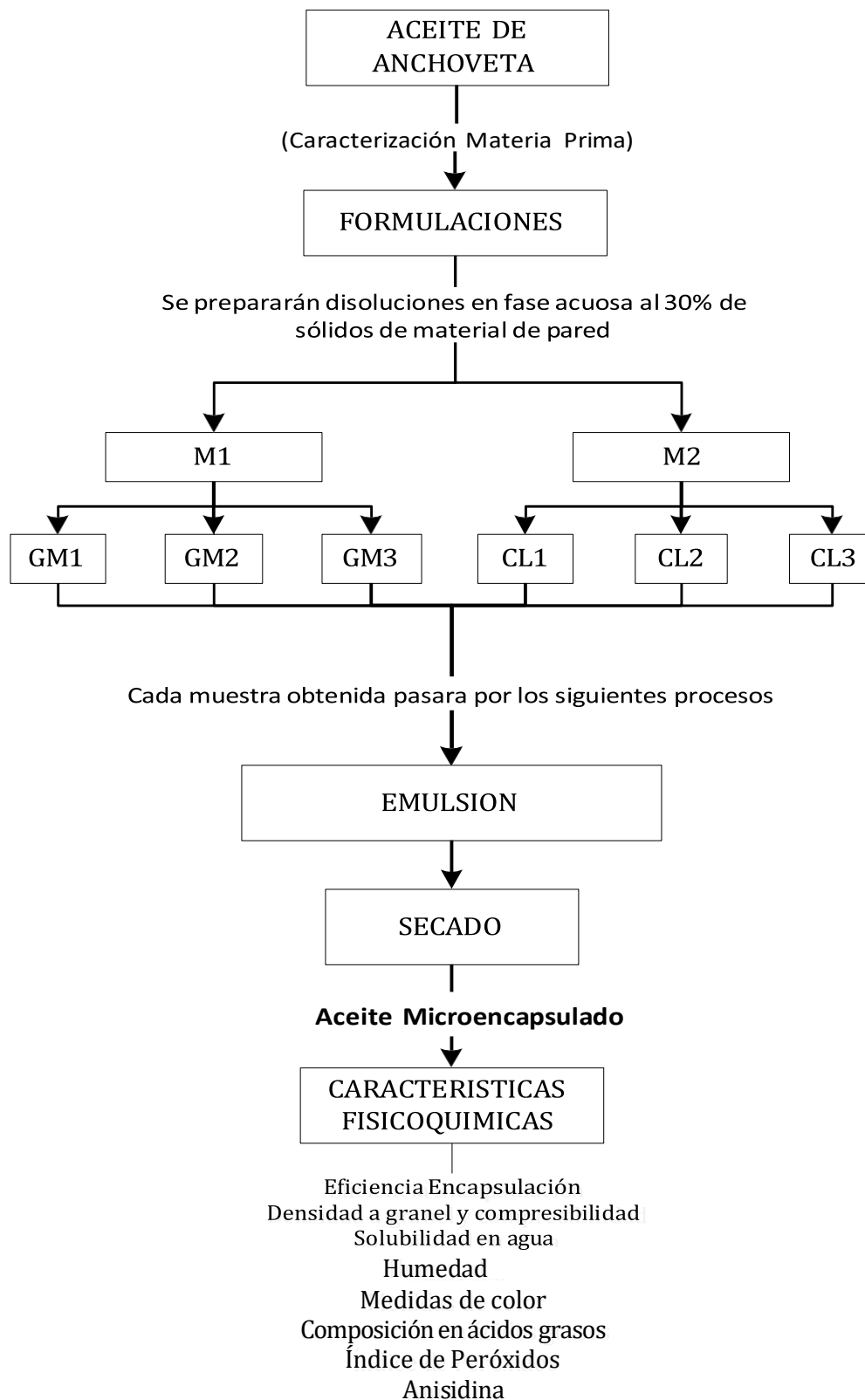


Figura 19: Esquema experimental utilizado en el trabajo de investigación

3.7. Método de análisis de datos

3.7.1. Caracterización de la Materia Prima

El aceite de anchoveta (*Engraulis ringens*) utilizado en este estudio fue obtenido como subproducto del procesamiento industrial de harina de pescado. Para evaluar su calidad y estabilidad antes de su microencapsulación, se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos siguiendo metodologías estandarizadas. Los parámetros analizados incluyeron el índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxidos e índice de anisidina, los cuales permiten determinar la frescura y estabilidad oxidativa del aceite.

3.7.1.1. Índice de Acidez

El índice de acidez fue determinado siguiendo la Norma Técnica Peruana NTP 209.005:1968 (revisada en 2011), un método ampliamente utilizado en la industria de aceites y grasas comestibles. Para ello, se disolvió una cantidad precisa de muestra en una mezcla de solventes y se realizó una titulación con una solución de hidróxido de sodio (NaOH), utilizando fenolftaleína como indicador. La aparición de un color rosado persistente indicó el punto final de la reacción, permitiendo calcular la concentración de ácidos grasos libres presentes en el aceite. Este parámetro resultó fundamental, ya que niveles elevados de acidez pueden indicar deterioro del aceite debido a la hidrólisis de los triglicéridos.

3.7.1.2. Índice de Yodo

La insaturación del aceite fue evaluada mediante la determinación del índice de yodo, siguiendo el método oficial AOAC 920.158. Esta técnica permitió cuantificar la cantidad de dobles enlaces presentes en los ácidos grasos insaturados, expresada en gramos de yodo absorbido por cada 100 gramos de grasa. Para su medición, el aceite fue sometido a una reacción con el reactivo de Wijs en un medio ácido, y tras un periodo de reposo en oscuridad, el exceso de yodo fue reducido con yoduro de potasio (KI). La posterior titulación con tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) permitió determinar el consumo de halógenos, reflejando así el grado de insaturación del aceite de anchoveta. Se agregaron 20 mL de solución de yoduro de potasio (KI al 10%) y 100 mL de agua destilada para liberar el yodo no reaccionado.

3.7.1.3. Índice de Peróxidos

La estabilidad oxidativa del aceite fue analizada mediante la determinación del índice de peróxidos, utilizando el método establecido en AOAC 965.33. Este procedimiento permitió cuantificar la concentración de compuestos primarios de oxidación en términos de miliequivalentes de peróxido por cada 100 gramos de muestra. La muestra fue tratada con una solución de ácido acético-glacial y cloroformo, a la que posteriormente se añadió yoduro de potasio (KI) para liberar el yodo presente en la muestra. La titulación con tiosulfato de sodio y la medición de absorbancia en un espectrofotómetro permitieron establecer el grado de oxidación del aceite, considerando que valores elevados de peróxidos indican una mayor susceptibilidad a la degradación lipídica.

3.7.1.4. Anisidina

El índice de anisidina fue determinado conforme a la norma ITINTEC 209.217, con el propósito de evaluar la presencia de compuestos secundarios de oxidación, como aldehídos y cetonas. Para ello, el aceite fue mezclado con una solución de p-anisidina en ácido acético glacial, permitiendo la formación de un complejo que absorbió luz en una longitud de onda de 350 nm. La medición de la absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis proporcionó una estimación del nivel de oxidación avanzada del aceite, complementando los resultados obtenidos en el análisis de peróxidos.

3.7.1.5. Composición en ácidos grasos

Para la identificación y cuantificación de los ácidos grasos presentes en el aceite de anchoveta, se aplicó el Método Oficial AOAC 991.39, basado en la conversión de los ácidos grasos en sus correspondientes ésteres metílicos de ácidos grasos (FAMES, por sus siglas en inglés), permitiendo su posterior análisis mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID). El proceso inició con la saponificación de la muestra, en la cual 50 mg de aceite de anchoveta fueron tratados con 2 mL de hidróxido de sodio (NaOH) 0.5 N en metanol. Esta solución fue calentada a 60°C durante 10 minutos en un baño termostatado, permitiendo la hidrólisis de los triglicéridos y la liberación de los ácidos grasos. Posteriormente, se llevó a cabo la esterificación, en la que se añadió 2 mL de trifluoruro de boro (BF₃)

al 14% en metanol, facilitando la conversión de los ácidos grasos libres en FAMEs. La reacción se mantuvo a 60°C por 30 minutos con agitación constante, asegurando la transformación completa de los ácidos grasos en sus derivados metilados. Finalizada la esterificación, los FAMEs fueron extraídos mediante dos lavados sucesivos con 2 mL de isooctano, lo que permitió la separación de la fase orgánica. Para eliminar cualquier traza de humedad, la fracción orgánica fue secada con sulfato de sodio anhidro y posteriormente filtrada. La solución obtenida fue almacenada en viales ámbar hasta su análisis cromatográfico.

En general, estos análisis permitieron establecer la calidad inicial del aceite de anchoveta antes de su microencapsulación, asegurando que cumplía con los estándares requeridos para su posterior aplicación en la industria alimentaria. La combinación de estos parámetros proporcionó una visión integral del estado del aceite, permitiendo seleccionar una materia prima con óptimas características para el desarrollo del proceso experimental.

3.7.2. Caracterización de los aceites microencapsulados

3.7.2.1. Eficiencia Encapsulación

La eficiencia de encapsulación (EE) se determinó mediante la relación entre la cantidad de aceite no encapsulado y el aceite total presente en la muestra, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$EE = \frac{\text{Aceite total} - \text{Aceite libre}}{\text{Aceite total}} \times 100$$

Este análisis permitió evaluar la efectividad del proceso de microencapsulación, garantizando la protección del aceite dentro de la matriz encapsulante. La cuantificación del aceite libre y encapsulado se realizó siguiendo el protocolo descrito por Calvo, Hernández, Lozano y Gonzales (2010), el cual se basa en la extracción selectiva mediante solventes y su posterior cuantificación gravimétrica.

Para medir la cantidad de aceite sin encapsular presente en la superficie de los aceites microencapsulados, se pesó 5 g de microcápsulas en un vaso de precipitado y se añadió 50 ml de éter de petróleo, se agitó durante 10 min a temperatura ambiente en agitador magnético para extraer el aceite superficial. La mezcla disolvente se filtró

luego a través de un papel de filtro, y después de eso, se recogió el aceite sin encapsular, después de la evaporación de éter con nitrógeno.

Para medir el aceite encapsulado, se extrajo el aceite por 1 h en un extractor de grasas Berh de los mismos polvos. Después de eso, se evaporó el éter y se pesó el aceite interno.

3.7.2.2. Densidad a granel y compresibilidad

La evaluación de la densidad a granel y compresibilidad de las microcápsulas se realizó con el propósito de caracterizar su comportamiento físico y su capacidad de compactación. Para ello, se llevaron a cabo mediciones de volumen en condiciones controladas, determinando dos tipos de densidad: densidad aireada (A) y densidad empacada (P).

La densidad aireada (A) fue determinada permitiendo que el polvo microencapsulado se asiente de forma natural bajo la influencia de la gravedad. Para este análisis, se pesaron 10 g de microcápsulas en una balanza analítica de precisión (± 0.0001 g) y se introdujeron en una probeta graduada de 50 mL sin aplicar ninguna fuerza externa. Posteriormente, se registró el volumen ocupado por la muestra y se calculó la densidad como la relación entre la masa y el volumen medido.

Para determinar la densidad empacada (P), se utilizó el mismo procedimiento descrito anteriormente, con la diferencia de que, una vez registrada la densidad aireada, la probeta fue sometida a pequeños golpes sobre una superficie rígida, con el fin de reducir el volumen de aire presente entre las partículas. Luego de alcanzar un volumen estable, se midió nuevamente el espacio ocupado por la muestra y se calculó la densidad empacada.

El contenido de aire intersticial, definido como el volumen de aire atrapado entre las partículas del polvo, se calculó a partir de los valores de A y P, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de aire intersticial} = \left(\frac{1}{A}\right) - \left(\frac{1}{P}\right)$$

La compresibilidad se definió como la capacidad del material en polvo para reducir su volumen bajo presión o compactación, lo que influye en su fluidez y en su comportamiento durante el procesamiento. Su valor se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Compresibilidad (\%)} = (P - A) \times 100/P$$

Un mayor porcentaje de compresibilidad indica una mayor capacidad de reducción de volumen y menor fluidez del material, mientras que valores bajos reflejan partículas con menor capacidad de compactación, lo que puede influir en la estabilidad de las microcápsulas durante su almacenamiento y aplicación en productos alimentarios. Estos parámetros permitieron evaluar la estabilidad y manipulabilidad del polvo microencapsulado, optimizando su aplicación en productos funcionales.

3.7.2.3. Solubilidad en agua

La solubilidad del polvo microencapsulado se evaluó mediante un método descrito por Jiménez et al. (2008), el cual permite cuantificar la capacidad del material para dispersarse en un medio acuoso bajo condiciones controladas. Para el análisis, se pesaron 2 g de microcápsulas en una balanza analítica de precisión (± 0.0001 g) y se disolvieron en 50 mL de agua destilada a una temperatura de 26°C. La mezcla fue sometida a agitación constante utilizando un agitador magnético a 300 rpm, registrando el tiempo necesario para alcanzar una disolución completa.

El criterio de solubilidad se definió como la capacidad del polvo para dispersarse homogéneamente en el agua sin formación de grumos ni sedimentos visibles. Este parámetro es clave en la evaluación de microencapsulados destinados a aplicaciones alimentarias, ya que influye en su funcionalidad y estabilidad en formulaciones líquidas.

3.7.2.4. Humedad

Para el análisis, se pesaron 5 g de muestra en una balanza analítica de precisión (± 0.0001 g) y se colocaron en crisol de aluminio previamente tarado. Las muestras fueron sometidas a secado en una estufa de convección forzada a 105°C durante 4 horas, asegurando la completa evaporación del agua libre. Posteriormente, se

retiraron y se dejaron enfriar en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente, evitando la absorción de humedad ambiental. Finalmente, se registró el peso seco y se calculó el porcentaje de humedad mediante la ecuación:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso seco}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

Este parámetro es fundamental para evaluar la estabilidad del polvo microencapsulado, ya que niveles elevados de humedad pueden favorecer la oxidación del aceite y la degradación del material encapsulante durante su almacenamiento.

3.7.2.5. Índice de Peróxidos

El índice de peróxidos se determinó siguiendo el método descrito en la AOAC 965.33, el cual permite cuantificar la concentración de compuestos oxidantes en aceites y grasas. Este parámetro es expresado en miliequivalentes de peróxido por 100 g de muestra (meq O₂/kg) y proporciona una medida del grado de oxidación primaria del aceite.

3.7.2.6. Anisidina

El índice de anisidina fue determinado siguiendo el método descrito en la norma ITINTEC 209.217, el cual permite evaluar la presencia de compuestos secundarios de oxidación en aceites y grasas, específicamente aldehídos y cetonas generados por la descomposición de hidroperóxidos. Este parámetro es complementario al índice de peróxidos y proporciona una evaluación más completa del estado oxidativo del aceite.

3.8. Técnica de análisis de resultados

Para el procesamiento estadístico de los resultados, se aplicó un diseño completamente aleatorizado (DCA), considerando como factor de estudio las diferentes formulaciones de aceite de anchoveta microencapsulado, mientras que las variables de respuesta incluyeron parámetros fisicoquímicos y de estabilidad oxidativa.

Los datos obtenidos se expresaron en términos de valor medio, desviación estándar (DE) y frecuencias, dependiendo de la naturaleza de cada variable analizada. Para evaluar diferencias significativas entre las muestras, se realizó un análisis de varianza

(ANOVA) unifactorial, comparando los valores obtenidos con respecto al grupo control. En caso de encontrarse diferencias significativas ($p < 0.05$), se llevó a cabo una comparación de medias mediante la prueba de Tukey, con un nivel de confianza del 95%.

El procesamiento y análisis estadístico de los datos se realizó utilizando el software IBM SPSS Statistics, asegurando un tratamiento riguroso de la información y la correcta interpretación de los resultados obtenidos en la caracterización del aceite microencapsulado.

3.9. Aspectos éticos (de acuerdo al código de ética de la UNS)

La presente investigación se llevó a cabo en estricto cumplimiento de los principios éticos establecidos en el Informe de Belmont, así como en los códigos de ética definidos por la Universidad Nacional del Santa. A lo largo del estudio, se garantizó el rigor científico en cada etapa, asegurando la integridad en las actividades de investigación y gestión. Se promovió la honestidad intelectual, la objetividad y la imparcialidad, fomentando prácticas responsables en el ámbito académico y profesional.

Se asumió plena responsabilidad en la ejecución del estudio, velando tanto por la calidad de la investigación como por la reputación institucional. Se respetaron los derechos de propiedad intelectual de todos los autores y colaboradores, priorizando la transparencia en la obtención, análisis y difusión de los resultados. En este sentido, se adoptaron medidas que garantizaron la ausencia de conflictos de interés y se implementaron estrategias de sostenibilidad para minimizar el impacto ambiental, promoviendo el cuidado de los recursos naturales y la biodiversidad.

Todas las fuentes consultadas fueron citadas conforme a estándares internacionales de referencia, asegurando el reconocimiento adecuado a los autores de estudios previos. La información recolectada se utilizó exclusivamente con fines científicos y bajo estricta confidencialidad. En caso de contar con participantes en evaluaciones experimentales, se obtuvo previamente su consentimiento informado, garantizando el respeto a sus derechos, privacidad y autonomía, en conformidad con principios bioéticos y normativas vigentes.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización de la materia prima

La Tabla 9 presenta los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica del aceite de anchoveta, evaluando parámetros clave para determinar su calidad y estabilidad oxidativa.

Tabla 9: Caracterización del aceite de Anchoveta

Análisis	Resultados
Índice de Acidez (% de ácido oleico)	0.8 ± 0.01
Índice de Yodo (g de yodo/100 g de aceite)	188.9 ± 2.25
Índice de Peróxidos (meq peróxido/kg)	1.01 ± 0.05
Anisidina	10.2 ± 0.10

El índice de acidez obtenido fue de $0.8 \pm 0.01\%$ de ácido oleico, lo que indica un bajo contenido de ácidos grasos libres y sugiere que el aceite analizado se encuentra en buen estado de conservación, sin signos evidentes de hidrólisis de los triglicéridos. Este valor es inferior al límite establecido por la normativa Codex Alimentarius para aceites comestibles, lo que confirma la frescura del aceite antes de su procesamiento. Además, este resultado obtenido se encontró dentro de los valores aceptables para la acidez según la NTP 312.002, lo cual indica una baja cantidad de ácidos grasos libres lo que equivale a una baja degradación.

El índice de yodo reportado fue de 188.9 ± 2.25 g de yodo/100 g de aceite, lo que refleja un alto grado de insaturación en su composición lipídica. Este valor es característico de aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados, como el EPA (ácido eicosapentaenoico) y DHA (ácido docosahexaenoico), los cuales son fundamentales en la formulación de alimentos funcionales debido a sus propiedades beneficiosas para la salud cardiovascular y cerebral. Sin embargo, un mayor índice de yodo también implica una mayor susceptibilidad a la oxidación, lo que refuerza la necesidad de estrategias de estabilización, como la microencapsulación. Por otro lado, este aceite se diferencia notoriamente frente a otros aceites como los vegetales

ya que según el Codex Alimentarius (2019) en la norma para aceites vegetales éstos normalmente presentan valores inferiores a 150 g de yodo/100 g.

El índice de peróxidos obtenido fue de 1.01 ± 0.05 meq peróxido/kg, lo que indica una baja presencia de productos primarios de oxidación. Este resultado sugiere que el aceite de anchoveta analizado no ha sufrido un deterioro significativo por exposición al oxígeno o temperaturas elevadas, lo que respalda su estabilidad inicial. Según estándares internacionales y nacionales, un índice de peróxidos menor a 5 meq O_2 /kg es indicativo de un aceite de buena calidad y con bajo grado de rancidez.

Por otro lado, el índice de anisidina, con un valor de 10.2 ± 0.10 , proporciona información sobre la acumulación de compuestos secundarios de oxidación, como aldehídos y cetonas, los cuales pueden generar sabores y olores indeseables en el aceite. Aunque este valor se encuentra dentro de un rango aceptable, su incremento en el tiempo puede ser un indicativo de degradación oxidativa progresiva, lo que hace necesaria la aplicación de métodos de protección antioxidante, como la encapsulación con biopolímeros o el almacenamiento en condiciones controladas (Khoshnoudi-Nia et al., 2022) .

Los resultados obtenidos en la caracterización del aceite de anchoveta sugieren que la materia prima utilizada en este estudio presenta una alta calidad inicial, con bajos niveles de acidez y peróxidos, y un alto contenido de ácidos grasos insaturados. Sin embargo, debido a su elevada insaturación, el aceite es altamente susceptible a la oxidación, lo que refuerza la importancia de estrategias de estabilización, como la microencapsulación con matrices protectoras (Venugopalan et al., 2021b)

En términos de estabilidad oxidativa, los valores de índice de peróxidos y anisidina muestran que, aunque el aceite analizado no presenta un deterioro avanzado, sí es propenso a generar compuestos de oxidación con el tiempo. Esto es especialmente relevante para su aplicación en la industria alimentaria y nutracéutica, donde se busca mantener la estabilidad de los ácidos grasos poliinsaturados sin comprometer sus beneficios nutricionales. En general, estos resultados permiten establecer criterios de referencia para la evaluación del aceite microencapsulado en las siguientes fases del estudio, donde se analizará la eficacia de los diferentes encapsulantes en la protección de la calidad y estabilidad del aceite frente a procesos oxidativos (Jokar et al., 2024a)

La Tabla 10 presenta el perfil de ácidos grasos del aceite de anchoveta, expresado en términos de concentración (mg/100 g de muestra). Este análisis es fundamental para caracterizar la calidad nutricional y funcional del aceite, determinando la presencia de ácidos grasos saturados (AGS), monoinsaturados (AGMI) y poliinsaturados (AGPI), con especial énfasis en los ácidos grasos esenciales como el eicosapentaenoico (EPA, 20:5 ω 3) y el docosahexaenoico (DHA, 22:6 ω 3), los cuales poseen importantes beneficios en la salud cardiovascular y neuronal.

Tabla 10: Composición en ácidos grasos.

Ácidos Grasos	Concentración
Mirístico 14:0	6.86
Miristoleico 14:1	0.20
Palmítico 16:0	17.26
Palmitoleico 16:1	7.24
Estearico 18:0	3.62
Oléico 18:1 ω 9	8.8
Veccenico 18:1 ω 7	2.47
Linoleico 18:2 ω 6	1.02
Linolenico 18:3 ω 4	0.07
Araquidico 20:0	0.21
Eicosenoico 20:1 ω 9	0.93
Eicosadienoico 20:2 ω 6	0.15
Eicosatrienoico 20:3 ω 3	0.04
Araquidonico 20:4 ω 3	0.64
Eicosapentanoico 20:5 ω 3	17.14
Behenate 22:0	0.11
Erucate 22:1 ω 9	0.13
Docosahexanoico 22:6 ω 3	10.25
Tricosanoico 23:0	0.84
Lignoserate 24:0	2.16
Nervonate 24:1 ω 3	0.40

Dentro de los ácidos grasos saturados (AGS), el ácido palmítico (16:0) fue el más abundante con una concentración de 17.26 mg/100 g, seguido por el mirístico (14:0) con 6.86 mg/100 g y el estearico (18:0) con 3.62 mg/100 g. Aunque estos compuestos cumplen funciones estructurales en las membranas celulares y en la síntesis de lípidos bioactivos, su consumo en exceso ha sido relacionado con un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares (Siri-Tarino et al., 2015). No obstante, estudios

recientes han sugerido que su impacto negativo depende de la matriz dietética general y de la presencia de otros lípidos en la dieta (Diamond et al., 2020).

En el grupo de ácidos grasos monoinsaturados (AGMI), el ácido oleico (18:1 ω 9) presentó una concentración de 8.8 mg/100 g, seguido del palmitoleico (16:1) con 7.24 mg/100 g y el vaccénico (18:1 ω 7) con 2.47 mg/100 g. Los AGMI son reconocidos por su efecto positivo en la reducción del colesterol LDL y la mejora de la función cardiovascular, además de conferir estabilidad oxidativa al aceite (Torres-Vanegas et al., 2025). Además, el ácido vaccénico (18:1 ω 7), presente en 2.47 mg/100 g, ha mostrado efectos potenciales en la modulación del metabolismo lipídico, aunque su rol en la salud humana aún requiere mayor investigación (Y. Zhang et al., 2024).

El contenido de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) fue dominado por los ácidos grasos omega-3, especialmente el eicosapentaenoico (EPA, 20:5 ω 3) con 17.14 mg/100 g y el docosahexaenoico (DHA, 22:6 ω 3) con 10.25 mg/100 g. Ambos compuestos son ampliamente valorados por sus efectos antiinflamatorios y su capacidad para reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas. En menor proporción, se detectaron otros AGPI como el linoleico (18:2 ω 6) con 1.02 mg/100 g y el araquidónico (20:4 ω 3) con 0.64 mg/100 g, los cuales desempeñan funciones clave en la síntesis de eicosanoides y en la regulación de procesos inflamatorios. Estos resultados son similares con estudios previos que han reportado que los aceites de origen marino, como el de anchoveta, contienen altos niveles de estos compuestos en comparación con los aceites vegetales y animales terrestres (Shahidi & Ambigaipalan, 2018). La literatura científica destaca que tanto el EPA como el DHA están asociados con efectos cardioprotectores, antiinflamatorios y neuroprotectores, los cuales pueden contribuir a la prevención de enfermedades cardiovasculares, mejorar la función cognitiva y modular procesos inflamatorios sistémicos (Calder, 2017).

Estos hallazgos destacan la importancia del aceite de anchoveta como un ingrediente valioso en la formulación de alimentos funcionales y suplementos nutraceuticos. Sin embargo, su elevada inestabilidad oxidativa subraya la necesidad de implementar estrategias de protección, como el uso de antioxidantes naturales y procesos de microencapsulación, para preservar su calidad y funcionalidad durante el almacenamiento y su aplicación en matrices alimentarias (Turchini et al., 2009).

4.2. Caracterización de los aceites microencapsulados

4.2.1. Eficiencia de Encapsulación

La Tabla 11 presenta los valores obtenidos en la determinación del aceite extraído total (AET), aceite extraído libre (AEL) y eficiencia de encapsulación (EE) de las diferentes formulaciones del aceite de anchoveta microencapsulado. Estos parámetros son fundamentales para evaluar el desempeño del proceso de microencapsulación, ya que permiten conocer el porcentaje de aceite retenido dentro de la matriz encapsulante y su susceptibilidad a la oxidación.

Tabla 11: Distribución lipídica y Eficiencia de Encapsulación

MATRIZ	FORMULACIÓN	AET ¹	AEL ²	EE ³
		(g/100gMP)	(g/100gMP)	(g/100gAET)
M1	GM1	27.96±0.39	14.86±0.15	46.83±1.10
	GM2	26.63±0.31	11.73±0.48	55.93±2.26
	GM3	27.42±0.14	8.35±0.29	69.55±1.02
M2	CL1	26.89±0.12	9.55±0.54	64.56±2.14
	CL2	27.11±0.34	10.76±0.26	60.28±1.36
	CL3	27.71±0.15	15.61±0.23	43.67±1.07

¹Aceite extraído total, ²Aceite extraído total, ³Eficiencia de encapsulación

El contenido de AET varió entre 26.63 g/100 g MP (GM2) y 27.96 g/100 g MP (GM1) en la matriz M1 (maltodextrina – goma arábiga), mientras que en la matriz M2 (caseína – lactosa) los valores oscilaron entre 26.89 g/100 g MP (CL1) y 27.71 g/100 g MP (CL3). Estos resultados indican que no hubo diferencias significativas en la cantidad total de aceite retenido en las microcápsulas, lo que sugiere que ambas matrices presentaron una capacidad similar para la retención del aceite de anchoveta, en concordancia con estudios previos sobre la eficiencia de microencapsulación de aceites marinos (Jafari et al., 2021).

Por otro lado, el contenido de AEL, que representa el aceite no encapsulado presente en la superficie del polvo, mostró variaciones más marcadas. En la matriz M1, los valores oscilaron entre 8.35 g/100 g MP (GM3) y 14.86 g/100 g MP

(GM1), mientras que en la matriz M2, el contenido de aceite libre varió entre 9.55 g/100 g MP (CL1) y 15.61 g/100 g MP (CL3). La formulación GM3 presentó la menor cantidad de aceite libre, lo que indica una mayor eficiencia en la retención del aceite dentro de la microcápsula, un aspecto clave para mejorar la estabilidad oxidativa del producto final (Calvo et al., 2012).

La Figura 20 muestra el comportamiento del contenido de aceite libre (g/100 g de MP) en función de la relación de encapsulantes utilizados en las formulaciones de Goma Arábica - Maltodextrina (A) y Caseína - Lactosa (B). Esta variable es crítica en la microencapsulación de aceites, ya que un mayor contenido de aceite libre indica una menor eficiencia de encapsulación y una mayor susceptibilidad a la oxidación lipídica, lo que afecta la estabilidad del producto durante el almacenamiento (Falsafi et al., 2020). En el gráfico A, correspondiente a la matriz de Goma Arábica - Maltodextrina, se observa una tendencia ascendente en el contenido de aceite libre a medida que aumenta la proporción de goma arábica en la formulación (de 8.35 g/100 g MP en 2:1 a 15.61 g/100 g MP en 1:2). Este comportamiento puede explicarse por la disminución de la proporción de maltodextrina, la cual actúa como un agente estructurante clave en la formación de una barrera efectiva alrededor del aceite, limitando su migración a la superficie (Yan et al., 2022). Además, estudios previos han reportado que la goma arábica, aunque es un excelente emulsionante, presenta una menor capacidad de retención lipídica en comparación con los polisacáridos de mayor peso molecular como la maltodextrina (Jokar et al., 2024b; Kaushik et al., 2016a)

Por otro lado, en el gráfico B, que representa el comportamiento de la matriz de Caseína - Lactosa, se observa una tendencia opuesta, donde el contenido de aceite libre disminuye progresivamente con el aumento de la proporción de caseína en la formulación (de 16.0 g/100 g MP en 2:1 a 9.55 g/100 g MP en 1:2). Este resultado sugiere que la presencia de caseína en alta proporción dificulta la retención del aceite dentro de la microcápsula, posiblemente debido a su menor solubilidad en la emulsión previa al secado. Sin embargo, a medida que aumenta la proporción de lactosa, se mejora la dispersión de la emulsión y se logra una mejor interacción entre los encapsulantes, reduciendo la cantidad de aceite expuesto en la superficie del polvo (Rahim et al., 2024).

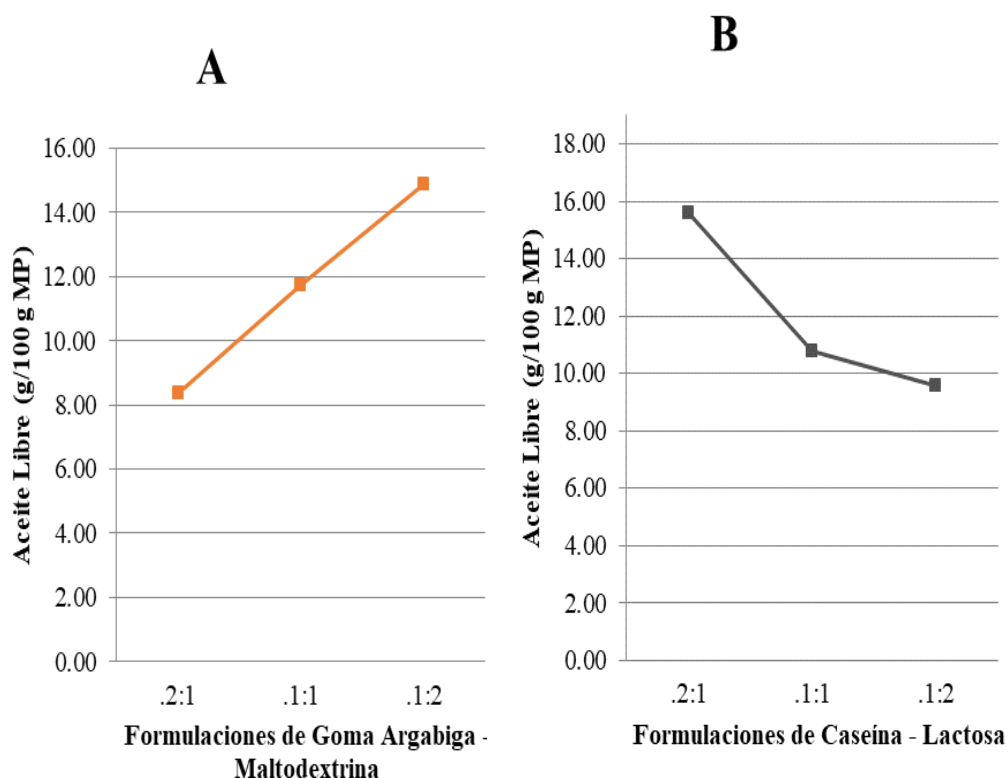


Figura 20: A. Comportamiento matriz Goma Arábica – Maltodextrina. B. Comportamiento matriz Caseína - Lactosa

Desde una perspectiva industrial, la estabilidad oxidativa del aceite microencapsulado es un factor clave en la formulación de productos alimentarios y nutraceuticos. Estudios han demostrado que un mayor contenido de aceite libre está directamente relacionado con una reducción en la vida útil del producto, debido a su mayor exposición al oxígeno y a la generación de compuestos de oxidación secundaria (Turchini et al., 2009). En este sentido, las formulaciones con mayor proporción de maltodextrina y lactosa presentan una mejor eficiencia en la encapsulación, reduciendo la migración del aceite a la superficie y mejorando la estabilidad del producto final.

Respecto a la eficiencia de encapsulación (EE), los valores fluctuaron entre 43.67 g/100 g AET (CL3) y 69.55 g/100 g AET (GM3). Las formulaciones con maltodextrina – goma arábica (M1) mostraron una tendencia a mayores valores de EE, en comparación con las formulaciones a base de caseína – lactosa (M2). En particular, la formulación GM3 presentó la mayor eficiencia de encapsulación (69.55 ± 1.02 g/100 g AET), lo que sugiere que la combinación

de maltodextrina y goma arábica favorece la formación de una estructura más estable para la retención del aceite, en concordancia con lo reportado en investigaciones previas donde estos encapsulantes han demostrado su capacidad para formar matrices con alta eficiencia de retención lipídica (Yan et al., 2022). Entonces, la formulación GM3 (Goma Arábica - Maltodextrina, 69.55%) presentó la mayor EE entre todas las formulaciones evaluadas, lo que sugiere que una mayor proporción de maltodextrina en combinación con goma arábica mejora la estabilidad del aceite microencapsulado. Esto es consistente con investigaciones previas que indican que la maltodextrina, debido a su bajo peso molecular y alta solubilidad, mejora la formación de matrices compactas y homogéneas, lo que favorece la retención del aceite dentro de la microcápsula (Ghosh et al., 2022)

La Figura 21 muestra la eficiencia de encapsulación (EE) en función de las distintas formulaciones evaluadas en el estudio. La eficiencia de encapsulación es un parámetro clave para determinar la capacidad de las matrices utilizadas para retener el aceite de anchoveta dentro de las microcápsulas, reduciendo su exposición al oxígeno y minimizando los procesos oxidativos que pueden comprometer la calidad del producto (Khoshnoudi-Nia et al., 2022). Las formulaciones basadas en la matriz de Goma Arábica – Maltodextrina (M1) presentan variaciones en la EE, siendo GM3 la de mayor eficiencia con un 69.55%, seguida de GM2 con 55.93% y GM1 con 46.83%. La mayor eficiencia observada en GM3 sugiere que una proporción equilibrada entre goma arábica y maltodextrina favorece la formación de microcápsulas más estables, mejorando la retención del aceite y reduciendo la migración del mismo a la superficie (Yan et al., 2022). Estos resultados concuerdan con estudios previos donde la combinación de polisacáridos y gomas naturales ha demostrado ser efectiva en la encapsulación de aceites ricos en ácidos grasos insaturados, proporcionando estabilidad estructural y mejorando la resistencia a la oxidación (Kaushik et al., 2016b).

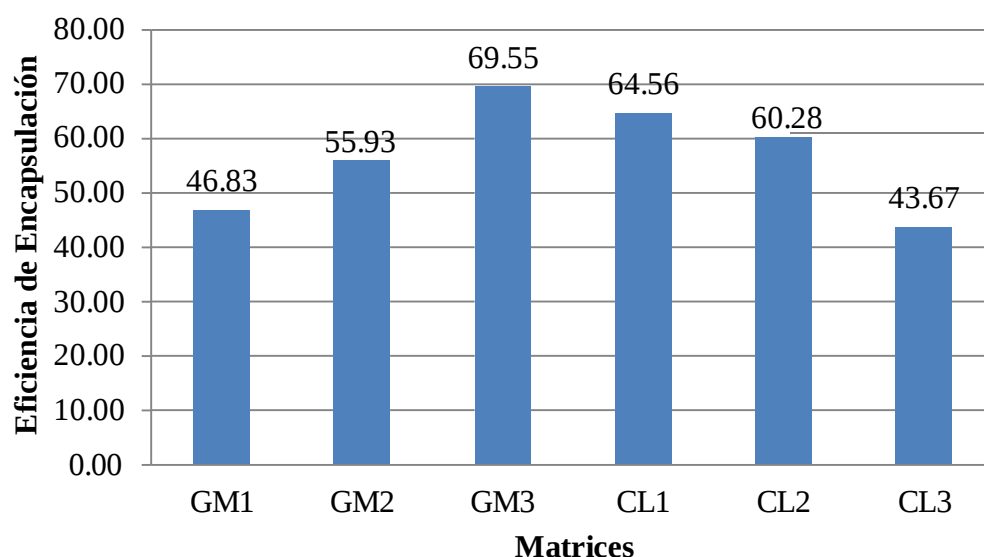


Figura 21: Influencia de la matriz en la eficiencia de encapsulación

De otro lado, las formulaciones basadas en la matriz de Caseína – Lactosa (M2) muestran una eficiencia de encapsulación relativamente alta en comparación con las formulaciones GM1 y GM2 de la matriz M1. CL1 presentó la mayor EE dentro de esta matriz con 64.56%, seguida de CL2 con 60.28%, mientras que CL3 mostró la menor eficiencia con 43.67%. La disminución de la EE en CL3 sugiere que una mayor proporción de lactosa podría generar estructuras menos compactas, favoreciendo la migración del aceite hacia la superficie del polvo microencapsulado. Sin embargo, el buen desempeño de CL1 y CL2 indica que la caseína tiene un papel importante en la estabilización del aceite encapsulado, posiblemente debido a su capacidad de formar redes proteicas que proporcionan una barrera física adicional contra la oxidación (Ghosh et al., 2022).

En la tabla 12, se detalla el análisis de varianza realizado para el aceite extraído total, el aceite extraído libre y la eficiencia de encapsulación del aceite microencapsulado mostró diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. En el caso del aceite extraído total, el valor F fue de 6,760 con un p-valor de 0,003, indicando una variación significativa entre los grupos evaluados. Para el aceite extraído libre, el análisis arrojó un valor F de 142,088 y un p-valor menor a 0,001, lo que reflejó diferencias altamente significativas entre los tratamientos, con una varianza mínima dentro de los grupos. En cuanto a la eficiencia de encapsulación, el valor F fue de 83,927 con un p-valor menor a

0,001, demostrando también diferencias significativas entre los grupos, siendo la variabilidad entre grupos sustancialmente mayor que dentro de los mismos. Estos resultados evidenciaron que los factores experimentales evaluados tuvieron un impacto considerable en las propiedades fisicoquímicas estudiadas, lo que refuerza la importancia de optimizar las condiciones de microencapsulación para mejorar el desempeño del aceite encapsulado.

Tabla 12: Análisis de varianza para la Eficiencia de Encapsulación, aceite extraído total y aceite extraído libre.

Variable de estudio	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado	P - valor
Aceite extraído total	Entre grupos	3,777	5	,755	6,760	,003
	Dentro de grupos	1,341	12	,112		
	Total	5,119	17			
Aceite extraído libre	Entre grupos	125,290	5	25,058	142,088	,000
	Dentro de grupos	2,116	12	,176		
	Total	127,406	17			
Eficiencia de Encapsulación	Entre grupos	1513,292	5	302,658	83,927	,000
	Dentro de grupos	43,275	12	3,606		
	Total	1556,567	17			

La prueba de Tukey (tabla 13) para comparaciones múltiples del aceite extraído total total mostró que las formulaciones GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) y CL1 (5% caseína y 25% lactosa) presentaron los valores más bajos, agrupándose en el subconjunto 1 con medias de 26,63 y 26,89, respectivamente, sin diferencias significativas entre ellas. Las formulaciones CL2 (15% caseína y 15% lactosa), GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina) y CL3 (25% caseína y 5% lactosa) alcanzaron medias superiores, ubicándose en subconjuntos 2 y 3, con valores que oscilaron entre 27,11 y 27,71, evidenciando una mayor distribución lipídica total. GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina) registró la media más alta (27,96), diferenciándose marginalmente de los demás grupos. Estas diferencias reflejaron el impacto de las proporciones

de encapsulantes en la distribución lipídica, destacando que las combinaciones con mayores niveles de goma arábica o caseína favorecieron una mayor retención lipídica. Sin embargo, las diferencias entre subconjuntos no fueron estadísticamente significativas al nivel de $\alpha = 0,05$.

Tabla 13: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Aceite extraído Total

FORMULACIÓN	N	Subconjunto para $\alpha = 0.05$		
		1	2	3
GM2	3	26,6333		
CL1	3	26,8933	26,8933	
CL2	3	27,1133	27,1133	27,1133
GM3	3	27,4200	27,4200	27,4200
CL3	3		27,7067	27,7067
GM1	3			27,9600
Sig.		,110	,094	,077

La prueba de Tukey para el aceite extraído libre (Tabla 14) indicó que las formulaciones GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina) y CL1 (5% caseína y 25% lactosa) presentaron los valores más bajos, con medias de 8,35 y 9,59, respectivamente, agrupándose en el subconjunto 1. CL2 (15% caseína y 15% lactosa) y GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) mostraron valores intermedios, ubicándose en los subconjuntos 2 y 3, con medias de 10,76 y 11,73, respectivamente. Las formulaciones GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina) y CL3 (25% caseína y 5% lactosa) tuvieron los mayores valores de distribución lipídica libre, con medias de 14,86 y 15,61, respectivamente, perteneciendo al subconjunto 4. Estas diferencias sugirieron que formulaciones con mayores niveles de goma arábica o caseína tendieron a tener una menor retención de lípidos encapsulados. Sin embargo, las diferencias entre los subconjuntos no fueron significativas para niveles de $\alpha = 0,05$.

Tabla 14: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de aceite extraído libre

FORMULACIÓN	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
GM3	3	8,3467			
CL1	3		9,5867		
CL2	3			10,7600	
GM2	3			11,7333	
GM1	3				14,8600
CL3	3				15,6067
Sig.		1,000	1,000	,117	,314

La prueba de Tukey para la eficiencia de encapsulación (tabla 15) mostró diferencias claras entre las formulaciones. CL3 (25% caseína y 5% lactosa) y GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina) registraron las eficiencias más bajas, con medias de 43,67 y 46,84, respectivamente, ubicándose en el subconjunto 1. GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) tuvo una eficiencia intermedia de 55,92, formando parte del subconjunto 2. CL2 (15% caseína y 15% lactosa) y CL1 (5% caseína y 25% lactosa) mostraron valores más altos de eficiencia, de 60,30 y 64,34, respectivamente, en los subconjuntos 2 y 3. GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina) alcanzó la mayor eficiencia de encapsulación, con una media de 69,56, perteneciendo al subconjunto 4. Estos resultados evidenciaron que las formulaciones con mayor proporción de goma arábica o combinaciones balanceadas de caseína y lactosa presentaron una mejor eficiencia de encapsulación. Sin embargo, las diferencias entre subconjuntos no fueron estadísticamente significativas a un nivel de alfa = 0,05.

Tabla 15: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Eficiencia de encapsulación

FORMULACIÓN	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
CL3	3	43,6667			
GM1	3	46,8400			
GM2	3		55,9233		
CL2	3		60,2967	60,2967	
CL1	3			64,3400	
GM3	3				69,5633
Sig.		,373	,121	,169	1,000

Los resultados obtenidos indican que la elección de la matriz encapsulante tiene un impacto significativo en la eficiencia de encapsulación y en la retención del aceite dentro de las microcápsulas. La formulación GM3 (maltodextrina – goma arábica) presentó la menor cantidad de aceite libre y la mayor eficiencia de encapsulación, lo que sugiere que esta matriz ofrece una barrera más efectiva contra la migración del aceite a la superficie, reduciendo así la exposición al oxígeno y el riesgo de oxidación lipídica. Esto coincide con estudios previos que han demostrado que la combinación de polisacáridos y gomas naturales mejora la estabilidad estructural y reduce la migración de lípidos en matrices microencapsuladas (Rahim et al., 2024)

Por el contrario, las formulaciones basadas en caseína – lactosa (M2) mostraron una menor eficiencia de encapsulación, lo que podría atribuirse a la menor solubilidad de la caseína en comparación con la goma arábica, afectando la homogeneidad de la emulsión y la formación de microcápsulas más compactas. Sin embargo, la presencia de proteínas en la matriz encapsulante también puede conferir beneficios adicionales, como una mejor protección contra la oxidación debido a sus propiedades antioxidantes intrínsecas (Rahim et al., 2024)

Desde una perspectiva industrial, la eficiencia de encapsulación es un factor clave para la estabilidad del producto, ya que valores bajos pueden implicar una mayor liberación de aceite en la superficie, lo que facilita la oxidación y reduce la vida útil del producto (Jacobsen et al., 2020). La formulación GM3, con la mayor EE (69.55 g/100 g AET), sugiere que la combinación de maltodextrina y goma arábica puede ser una estrategia más efectiva para la estabilización del aceite de anchoveta, favoreciendo su aplicación en la industria alimentaria y nutracéutica.

Estos hallazgos refuerzan la importancia de seleccionar adecuadamente los encapsulantes para maximizar la retención de aceite y minimizar su exposición a condiciones ambientales adversas. Futuros estudios podrían evaluar la influencia de diferentes proporciones de encapsulantes y condiciones de secado en la estabilidad oxidativa del aceite microencapsulado, optimizando así su funcionalidad en aplicaciones comerciales.

4.2.2. Densidad y compresibilidad

La Tabla 16 presenta los valores de densidad aireada (DA), densidad compactada (DC), aire intersticial (AI) y compresibilidad (C) de las microcápsulas obtenidas con las formulaciones de Goma Arábica - Maltodextrina (M1) y Caseína - Lactosa (M2). Estos parámetros son determinantes en la fluidez, estabilidad estructural y reconstitución de los polvos microencapsulados, lo que impacta directamente en su aplicación en la industria alimentaria y farmacéutica (Khoshnoudi-Nia et al., 2022)

Tabla 16: Valores de densidad y contenido de aire intersticial

MATRIZ	FORMULACIÓN	DA ¹ (kg/m ³)	DC ² (kg/m ³)	AI ³ (mm ³ /g)	C ⁴ (%)
M1	GM1	320±1.2	507±2.2	1151±10.5	37±0.3
	GM2	338±1.8	523±3.3	1048±8.6	35±0.2
	GM3	352±1.3	536±3.7	973±8.5	34±0.3
M2	CL1	340±1.9	521±2.9	1017±10.2	35±0.2
	CL2	328±2.0	512±2.2	1092±11.9	36±0.2
	CL3	312±1.6	498±2.9	1201±12.7	37±0.3

¹Densidad Aireada, ²Densidad Compactada, ³Aire Intersticial, ⁴Compresibilidad

La densidad de las microcápsulas influye en la capacidad de rehidratación y solubilidad del polvo en medios líquidos. La densidad aireada (DA) varió entre 312 kg/m³ y 352 kg/m³, mientras que la densidad compactada (DC) osciló entre 498 kg/m³ y 536 kg/m³, indicando que los polvos presentan una estructura porosa y de baja compactación. Estudios previos han demostrado que densidades aireadas más bajas pueden favorecer una mejor dispersión del polvo en líquidos, facilitando su incorporación en formulaciones líquidas como bebidas enriquecidas y suplementos nutricionales.

La Figura 22 muestra la influencia del tipo de matriz encapsulante en la densidad aireada (DA) y densidad compactada (DC) de las microcápsulas de aceite de anchoveta. La densidad aireada (DA), representada por la línea azul, muestra una tendencia ligeramente creciente en GM1-GM3, alcanzando su máximo en GM3, seguido de una disminución en CL1-CL3. Esto sugiere que las microcápsulas formuladas con Goma Arábica - Maltodextrina (M1) presentaron valores de DA más altos en comparación con las formulaciones de Caseína - Lactosa (M2). Una

mayor DA puede estar asociada con una menor porosidad y una mejor compactación de las partículas durante el proceso de secado por aspersión (Z. Li et al., 2024).

Por otro lado, la densidad compactada (DC), representada por la línea naranja, muestra un comportamiento similar en ambas matrices, con valores más altos en las formulaciones GM3 y CL1, seguidos de una ligera disminución en CL2 y CL3. Este comportamiento indica que la compactación de las microcápsulas depende en gran medida de la interacción entre los encapsulantes y el aceite durante el proceso de atomización. En estudios previos, se ha demostrado que matrices a base de maltodextrina y goma arábica tienden a formar estructuras más compactas debido a su rápida deshidratación y formación de película protectora en torno a la gota de emulsión (Kaushik et al., 2016).

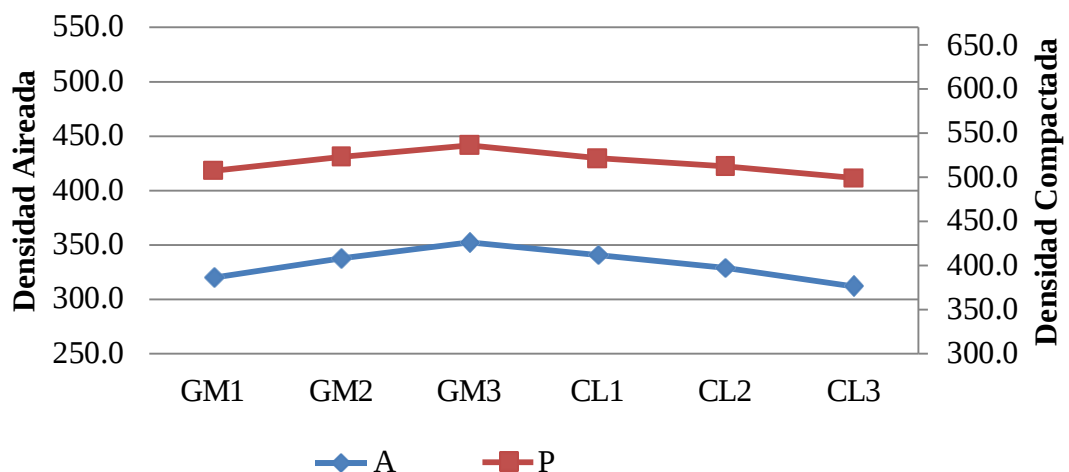


Figura 22: Influencia del tipo de matriz en la Densidad

El aire intersticial (AI), que representa el espacio entre las partículas, osciló entre 973 mm³/g y 1201 mm³/g, evidenciando diferencias en la porosidad de las microcápsulas según la formulación. La formulación CL3 (Caseína - Lactosa) presentó el valor más alto de 1201 mm³/g, lo que sugiere una mayor porosidad en comparación con las formulaciones de la matriz M1. Estudios han reportado que una mayor porosidad puede mejorar la solubilidad del polvo, pero también aumentar su higroscopicidad, lo que podría afectar la estabilidad durante el almacenamiento (Z. Li et al., 2024).

La Figura 23 muestra la variación en el contenido de aire intersticial (AI, mm³/g) en función de la formulación y del tipo de matriz encapsulante utilizada. El aire intersticial representa el volumen de espacio vacío entre las partículas en un polvo y es un parámetro clave en la microencapsulación, ya que influye en la fluidez del polvo, su capacidad de compactación y su estabilidad durante el almacenamiento (Khoshnoudi-Nia et al., 2022). Se observa que el contenido de aire intersticial varía entre las distintas formulaciones, con valores más altos en la formulación CL3 (Caseína – Lactosa) y en GM1 (Goma Arábica – Maltodextrina), mientras que la formulación GM3 presenta el menor contenido de aire intersticial. Este comportamiento sugiere que la distribución de los encapsulantes influye en la compactación del polvo, ya que una mayor cantidad de aire intersticial indica una menor cohesión entre partículas y una estructura más porosa.

Los valores más bajos de AI en GM3 sugieren una mayor densidad y compactación del polvo microencapsulado, lo que puede ser beneficioso para su almacenamiento y estabilidad física. Estudios previos han demostrado que matrices con mayor compactación reducen la absorción de humedad y disminuyen la tendencia a la aglomeración del polvo durante su almacenamiento (Čulina et al., 2023; Phanse & Chandra, 2024). Por otro lado, el mayor contenido de aire intersticial en CL3 sugiere que esta formulación presenta una estructura más porosa, lo que puede mejorar su solubilidad en medios líquidos, pero también incrementar su susceptibilidad a la absorción de humedad (Droźłowska et al., 2021).

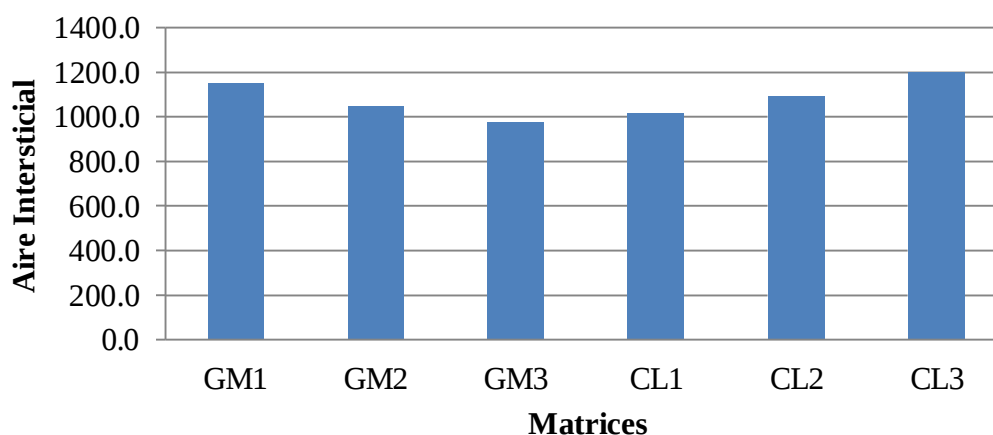


Figura 23: Influencia de las matrices en el Aire Intersticial

La Figura 24 muestra la variación de la compresibilidad (%) en función del tipo de matriz utilizada en la microencapsulación del aceite de anchoveta. La compresibilidad es un parámetro crítico en la evaluación de polvos microencapsulados, ya que influye en su fluidez, capacidad de empaquetamiento y estabilidad durante el almacenamiento. Valores elevados de compresibilidad indican una mayor cohesión entre partículas y, por lo tanto, una menor fluidez, lo que puede afectar la manipulación y procesamiento del polvo en aplicaciones industriales (Khoshnoudi-Nia et al., 2022).

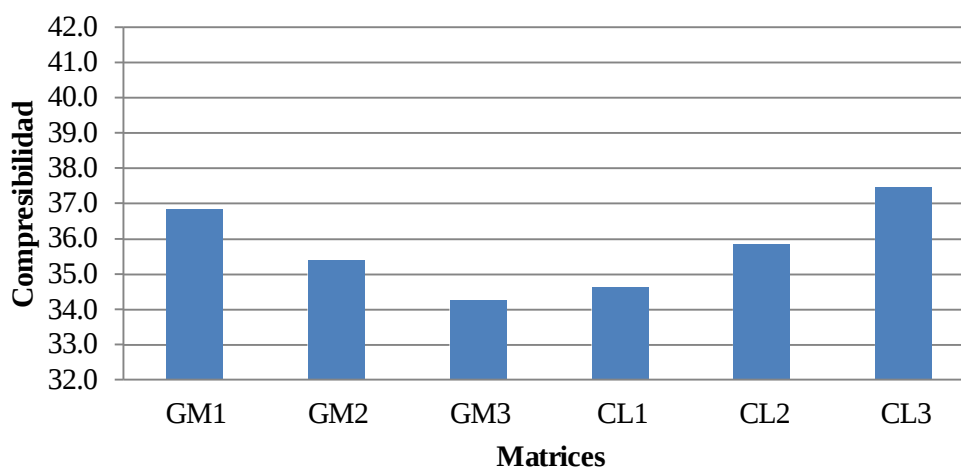


Figura 24: Influencia de las matrices en la Compresibilidad

Los valores obtenidos muestran diferencias entre las formulaciones evaluadas. Se observa que la formulación CL3 (Caseína - Lactosa) presenta la mayor compresibilidad, seguida de GM1 (Goma Arábica - Maltodextrina), mientras que GM3 mostró la menor compresibilidad. Este comportamiento indica que las formulaciones con caseína tienden a generar polvos más cohesivos, posiblemente debido a la interacción proteica durante el secado por aspersión, lo que puede resultar en una mayor densificación de las partículas (Duman et al., 2024). Por otro lado, las formulaciones GM3 y CL1 presentaron los valores más bajos de compresibilidad, lo que sugiere una menor cohesión entre partículas y, por ende, una mejor fluidez del polvo. Estudios previos han demostrado que polvos con baja compresibilidad presentan mejores propiedades de flujo, lo que facilita su dosificación y reconstitución en medios líquidos (Mardani et al., 2024a).

El análisis de varianza (Tabla 17) mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) entre las formulaciones para todas las variables estudiadas: densidad aireada, densidad compactada, aire intersticial y compresibilidad. La densidad aireada presentó un valor F de 140,209, reflejando una gran variabilidad entre grupos con cuadrados medios elevados (651,619). En la densidad compactada, el valor F fue de 28,583, con mayores contribuciones de la variación entre grupos (537,782). El aire intersticial mostró el mayor valor F (128,759), indicando una diferencia notable entre grupos debido a los cuadrados medios extremadamente altos (21.519,253). Finalmente, la compresibilidad también evidenció diferencias significativas con un valor F de 36,540, destacando una alta variabilidad explicada por los tratamientos. Estos resultados confirmaron que las características físicas de las formulaciones fueron significativamente influenciadas por las proporciones de los encapsulantes, lo que subraya la importancia de estos factores en el diseño y desempeño de los materiales encapsulados.

Tabla 17: Análisis de varianza para la Densidad aireada, densidad compactada, aire intersticial y compresibilidad

Variable de estudio	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado	P - valor
Densidad Aireada	Entre grupos	3258,096	5	651,619	140,209	,000
	Dentro de grupos	55,770	12	4,647		
	Total	3313,866	17			
Densidad Compactada	Entre grupos	2688,910	5	537,782	28,583	,000
	Dentro de grupos	225,778	12	18,815		
	Total	2914,688	17			
Aire Intersticial	Entre grupos	107596,265	5	21519,253	128,759	,000
	Dentro de grupos	2005,531	12	167,128		
	Total	109601,796	17			
Compresibilidad	Entre grupos	22,179	5	4,436	36,540	,000
	Dentro de grupos	1,457	12	,121		
	Total	23,636	17			

La prueba de Tukey para la densidad aireada (Tabla 18) reveló diferencias entre las formulaciones, aunque no todas fueron estadísticamente significativas al nivel de $\alpha = 0,05$. La formulación CL3 (25% caseína y 5% lactosa) presentó la menor densidad aireada con un valor promedio de 311,72, mientras que GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina) registró la mayor densidad aireada con 352,40, ubicándose en el subconjunto 5. Las formulaciones intermedias, como GM1 (319,95), CL2 (328,26), GM2 (337,45) y CL1 (340,40), se distribuyeron entre los subconjuntos 2, 3 y 4, mostrando una tendencia incremental. Aunque se observaron diferencias numéricas, estas no fueron significativas en la mayoría de los casos, salvo para GM3 en el subconjunto 5, lo que indica que la composición de los encapsulantes influyó moderadamente en la densidad aireada, especialmente en las combinaciones con mayor contenido de goma arábica.

Tabla 18: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de la Densidad aireada

FORMULACION	N	Subconjunto para $\alpha = 0.05$				
		1	2	3	4	5
CL3	3	311,7233				
GM1	3		319,9533			
CL2	3			328,2567		
GM2	3				337,4467	
CL1	3				340,4033	
GM3	3					352,3967
Sig.		1,000	1,000	1,000	,568	1,000

La prueba de Tukey para la densidad compactada (Tabla 19) mostró que la formulación CL3 (25% caseína y 5% lactosa) presentó el valor más bajo con un promedio de 497,54, perteneciendo al subconjunto 1. GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina) y CL2 (15% caseína y 15% lactosa) se ubicaron en el subconjunto 2, con valores promedio de 506,69 y 511,86, respectivamente. CL1 (5% caseína y 25% lactosa) y GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) alcanzaron densidades ligeramente superiores, agrupándose en el subconjunto 3 con valores de 521,38 y 522,58. GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina) mostró la densidad compactada más alta, con 535,48, destacándose en el subconjunto 4. Aunque se observaron diferencias entre los grupos, estas no fueron

estadísticamente significativas para los niveles de alfa establecidos, indicando que la composición de los encapsulantes afectó moderadamente la densidad compactada, siendo más evidente en formulaciones con mayor proporción de goma arábica.

Tabla 19: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de la densidad compactada

FORMULACIÓN	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
CL3	3	497,5367			
GM1	3	506,6900	506,6900		
CL2	3		511,8600	511,8600	
CL1	3			521,3767	
GM2	3			522,5767	
GM3	3				535,4800
Sig.		,175	,694	,087	1,000

La prueba de Tukey para el aire intersticial (Tabla 20) mostró diferencias entre las formulaciones, aunque no todas fueron estadísticamente significativas al nivel de alfa = 0,05. La formulación GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina) tuvo el menor valor promedio de aire intersticial (970,17), ubicándose en el subconjunto 1. CL1 (5% caseína y 25% lactosa) y GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) presentaron valores intermedios, de 1019,70 y 1049,87 respectivamente, distribuyéndose en los subconjuntos 2 y 3. CL2 (15% caseína y 15% lactosa) mostró un aumento a 1092,81, en el subconjunto 4. Finalmente, GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina) y CL3 (25% caseína y 5% lactosa) registraron los valores más altos, de 1151,86 y 1198,03 respectivamente, siendo parte del subconjunto 5. Estos resultados sugirieron que formulaciones con mayores proporciones de caseína o goma arábica favorecieron un aumento en el aire intersticial, lo que refleja diferencias en la estructura de los materiales encapsulados. Sin embargo, las diferencias observadas no alcanzaron significancia estadística consistente.

Tabla 20: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples del aire intersticial

FORMULACIÓN	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
GM3	3	970,1667				
CL1	3		1019,7033			
GM2	3		1049,8667			
CL2	3			1092,8100		
GM1	3				1151,8567	
CL3	3					1198,0333
Sig.		1,000	,114	1,000	1,000	1,000

La prueba de Tukey para la compresibilidad (Tabla 21) mostró que las formulaciones presentaron diferencias numéricas, aunque no estadísticamente significativas al nivel de alfa = 0,05. GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina) tuvo la menor compresibilidad con un promedio de 34,19, seguido por CL1 (5% caseína y 25% lactosa) con 34,71, ambos agrupados en el subconjunto 1. GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) y CL2 (15% caseína y 15% lactosa) presentaron valores intermedios de 35,42 y 35,87, respectivamente, ubicándose en los subconjuntos 2 y 3. GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina) mostró un incremento en la compresibilidad con un promedio de 36,85, y CL3 (25% caseína y 5% lactosa) presentó el mayor valor, alcanzando 37,34, agrupándose ambos en el subconjunto 4. Estos resultados indicaron que formulaciones con mayores proporciones de goma arábica o caseína tendieron a presentar mayores niveles de compresibilidad, aunque las diferencias observadas no fueron significativas para el nivel de confianza evaluado.

Tabla 21: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de la compresibilidad

FORMULACIÓN	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
GM3	3	34,1867			
CL1	3	34,7100	34,7100		
GM2	3		35,4233	35,4233	
CL2	3			35,8700	
GM1	3				36,8500
CL3	3				37,3433
Sig.		,479	,196	,631	,537

Los resultados sugieren que la matriz encapsulante influye significativamente en las propiedades físicas de las microcápsulas. Las formulaciones basadas en Caseína - Lactosa (M2) mostraron una mayor porosidad y menor densidad, lo que podría favorecer su solubilidad en medios líquidos, pero también aumentar su susceptibilidad a la absorción de humedad durante el almacenamiento. En contraste, las formulaciones con Goma Arábica - Maltodextrina (M1) exhibieron una mayor densidad y menor porosidad, lo que podría conferir una mejor estabilidad estructural y mayor resistencia a la degradación oxidativa.

Desde un enfoque industrial, estos hallazgos indican que la selección de la matriz encapsulante debe considerar tanto la estabilidad del aceite microencapsulado como la facilidad de manejo y aplicación del polvo final. Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar adecuadamente la matriz encapsulante en función de la aplicación del producto final. Mientras que formulaciones con mayor densidad compactada pueden ser más adecuadas para su uso en polvos nutricionales y suplementos, formulaciones con menor densidad aireada pueden ser preferidas en aplicaciones donde la solubilidad rápida sea un factor clave. Futuros estudios podrían evaluar la influencia de la humedad ambiental y la temperatura de almacenamiento en la estabilidad de los polvos, con el objetivo de optimizar su vida útil y funcionalidad en productos nutraceuticos y alimentarios.

4.2.3. Humedad

La Tabla 22 presenta los valores de humedad (%) de las microcápsulas obtenidas a partir de diferentes formulaciones y matrices encapsulantes. La humedad es un parámetro crítico en productos en polvo, ya que influye directamente en su almacenamiento, estabilidad oxidativa y reconstitución en medios líquidos. Un contenido elevado de humedad puede favorecer la aglomeración del polvo y acelerar la oxidación del aceite microencapsulado, mientras que valores bajos pueden mejorar su estabilidad, pero afectar la solubilidad y dispersión del polvo en líquidos (Khoshnoudi-Nia et al., 2022).

Tabla 22: Valores iniciales de humedad

MATRIZ	FORMULACIÓN	H (%)
M1	GM1	1.58 ± 0.11
	GM2	1.63 ± 0.08
	GM3	1.68 ± 0.09
M2	CL1	1.76 ± 0.05
	CL2	1.80 ± 0.04
	CL3	1.71 ± 0.07

Se observa que las formulaciones elaboradas con la matriz Caseína - Lactosa (M2) presentan valores de humedad más altos en comparación con aquellas formuladas con Goma Arábica - Maltodextrina (M1). Este comportamiento puede deberse a la mayor capacidad de retención de agua de la caseína, la cual forma una red proteica que puede encapsular mayor cantidad de agua en la microcápsula. Investigaciones previas han demostrado que los sistemas a base de proteínas pueden presentar mayor higroscopicidad, lo que puede incrementar la absorción de humedad ambiental durante el almacenamiento (Kaushik et al., 2016a).

Por otro lado, los valores más bajos de humedad en las formulaciones GM1-GM3 (M1) sugieren que la combinación de goma arábica y maltodextrina favorece la formación de microcápsulas con menor contenido de agua. La maltodextrina es ampliamente utilizada en la microencapsulación debido a su capacidad para formar una matriz de baja humedad, lo que contribuye a mejorar la estabilidad oxidativa del aceite encapsulado (Mardani et al., 2024). Los resultados sugieren que la selección de la matriz encapsulante influye significativamente en el contenido de humedad del polvo microencapsulado. Formulaciones con Caseína - Lactosa (M2) presentan una mayor retención de humedad, lo que podría mejorar la dispersión del polvo en soluciones líquidas, pero también incrementar la susceptibilidad a la absorción de humedad ambiental, lo que puede afectar su estabilidad física y oxidativa durante el almacenamiento (Annamalai et al., 2020).

El análisis de varianza para la humedad (Tabla 23) no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados ($p = 0,116$). Aunque la suma de cuadrados entre grupos fue menor que la de los valores dentro de los grupos (0,097 frente a 0,103), el valor F calculado de 2,250 no alcanzó el nivel crítico de significancia. Los cuadrados medios de los grupos (0,019) fueron aproximadamente el doble de los cuadrados medios dentro de los grupos (0,009), lo que indica cierta variabilidad entre las formulaciones, pero insuficiente para concluir diferencias significativas. Estos resultados sugirieron que las condiciones experimentales no tuvieron un efecto considerable sobre el contenido de humedad de las muestras evaluadas.

Tabla 23: Análisis de varianza para la Humedad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado	P - valor
Entre grupos	,097	5	,019	2,250	,116
Dentro de grupos	,103	12	,009		
Total	,199	17			

La prueba de Tukey para la humedad (Tabla 24) mostró que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre las formulaciones ($p = 0,105$) al nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Las formulaciones GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina), GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) y GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina) presentaron los valores más bajos de humedad, con promedios de 1,583, 1,633 y 1,683, respectivamente. Por otro lado, CL3 (25% caseína y 5% lactosa), CL1 (5% caseína y 25% lactosa) y CL2 (15% caseína y 15% lactosa) registraron valores ligeramente más altos, alcanzando medias de 1,710, 1,757 y 1,803. Aunque se observaron diferencias numéricas, estas no fueron suficientes para establecer diferencias significativas entre los grupos, lo que sugiere que la composición de los encapsulantes tuvo un efecto limitado sobre el contenido de humedad.

Tabla 24: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Humedad

FORMULACIÓN	N	Subconjunto para alfa = 0.05
		1
GM1	3	1,5833
GM2	3	1,6333
GM3	3	1,6833
CL3	3	1,7100
CL1	3	1,7567
CL2	3	1,8033
Sig.		,105

Los resultados sugieren que la selección de la matriz encapsulante influye significativamente en el contenido de humedad del polvo microencapsulado. Formulaciones con Caseína - Lactosa (M2) presentan una mayor retención de humedad, lo que podría mejorar la dispersión del polvo en soluciones líquidas, pero también incrementar la susceptibilidad a la absorción de humedad ambiental, lo que puede afectar su estabilidad física y oxidativa durante el almacenamiento (Jokar et al., 2024c). Por el contrario, las formulaciones con Goma Arábica - Maltodextrina (M1) presentan menor contenido de humedad, lo que puede conferir una mayor estabilidad en condiciones de almacenamiento prolongado. Estudios previos han demostrado que polvos con menor humedad tienden a tener una mejor estabilidad oxidativa, ya que la presencia de agua puede catalizar la formación de compuestos de oxidación lipídica, afectando la calidad del aceite encapsulado (Miyashita et al., 2018)

Desde una perspectiva industrial, la humedad óptima en polvos microencapsulados debe mantenerse por debajo del 5% para garantizar una buena estabilidad y evitar problemas de aglomeración (Drożdowska et al., 2021). Los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro de un rango aceptable, sin embargo, es recomendable evaluar el efecto de la humedad ambiental en la estabilidad de los polvos a lo largo del tiempo, considerando el impacto en la vida útil del producto y su aplicación en formulaciones alimentarias.

4.2.4. Solubilidad

La Tabla 25 presenta los tiempos requeridos para alcanzar la solubilidad completa de las microcápsulas obtenidas con diferentes formulaciones y matrices encapsulantes. La solubilidad es un parámetro clave en la microencapsulación, ya que determina la capacidad del polvo para disolverse en un medio líquido, lo que es fundamental en aplicaciones nutracéuticas y alimentarias. Una solubilidad rápida es deseable para facilitar la dispersión en productos líquidos, mientras que tiempos prolongados pueden indicar una estructura más compacta y menor hidratación superficial (Drożdowska et al., 2021)

Tabla 25: Valores de tiempos para alcanzar la solubilidad

MATRIZ	FORMULACIÓN	t (s)
M1	GM1	203 ± 0.82
	GM2	192 ± 0.94
	GM3	187 ± 1.25
M2	CL1	301 ± 0.47
	CL2	323 ± 1.25
	CL3	332 ± 0.82

Los valores obtenidos indican que las microcápsulas formuladas con la matriz Goma Arábiga - Maltodextrina (M1) presentan menores tiempos de solubilidad en comparación con aquellas formuladas con Caseína - Lactosa (M2). Esto sugiere que la matriz M1 favorece la dispersión del polvo en medios líquidos, posiblemente debido a la alta solubilidad de la maltodextrina, que facilita la desintegración y liberación del aceite encapsulado (Annamalai et al., 2020)

Por otro lado, los tiempos de solubilidad más prolongados en la matriz Caseína - Lactosa (M2) pueden atribuirse a la mayor densidad de la red proteica formada por la caseína, lo que ralentiza la hidratación y disolución del polvo en agua. Investigaciones previas han reportado que proteínas como la caseína pueden formar estructuras más compactas y menos porosas, dificultando la disolución del material en comparación con matrices compuestas por polisacáridos (Khoshnoudi-Nia et al., 2022)

La Figura 25 presenta la relación entre el tiempo de solubilidad (t) y la eficiencia de encapsulación (EE) en las microcápsulas de aceite de anchoveta formuladas

con matrices de Goma Arábica - Maltodextrina (M1) y Caseína - Lactosa (M2). La solubilidad de los polvos microencapsulados es un parámetro clave en la formulación de productos funcionales, ya que influye en la facilidad de dispersión del polvo en medios líquidos y en la biodisponibilidad del compuesto encapsulado (Khoshnoudi-Nia et al., 2022). La eficiencia de encapsulación, por otro lado, es un indicador de la capacidad de la matriz para retener el aceite dentro de la microcápsula, protegiéndolo de la oxidación y liberándolo de manera controlada

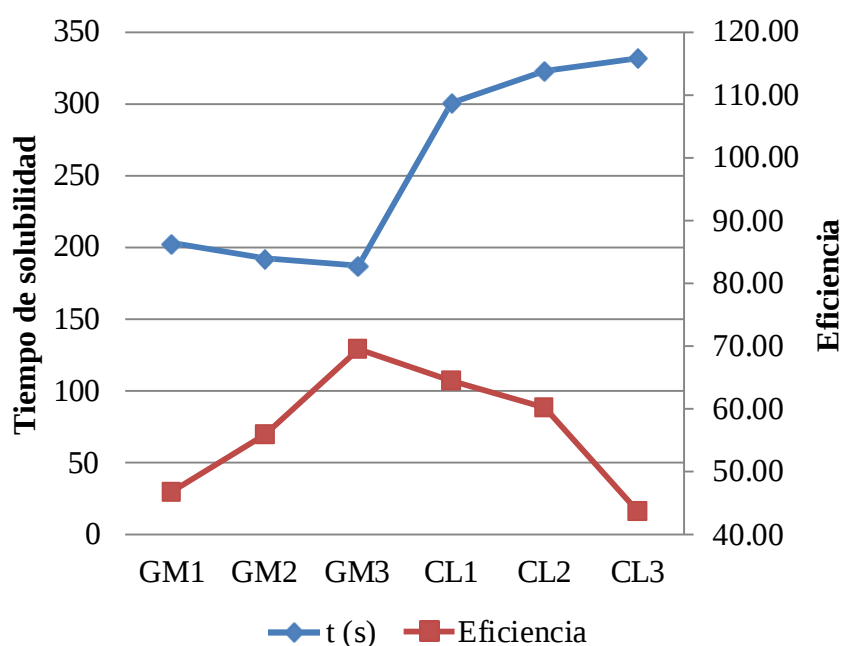


Figura 25: Solubilidad de las muestras de aceites microencapsulados

Se observa que las formulaciones GM1-GM3 (M1) presentan menores tiempos de solubilidad en comparación con CL1-CL3 (M2), lo que indica que las microcápsulas de goma arábica y maltodextrina tienen una mayor capacidad de dispersión en medios líquidos. Esto se debe a que la maltodextrina es altamente soluble en agua y favorece la rápida disolución de las partículas microencapsuladas. En contraste, las formulaciones CL1-CL3 muestran tiempos de solubilidad más prolongados, lo que sugiere una mayor resistencia a la hidratación, probablemente debido a la formación de una matriz proteica más compacta que retarda la disolución del polvo ((Jokar et al., 2024)

Por otro lado, se observa que la eficiencia de encapsulación sigue un comportamiento inverso al tiempo de solubilidad. Las formulaciones con mayor EE (GM3 y CL1) presentan tiempos de solubilidad intermedios, mientras que aquellas con menor EE (CL3) exhiben los tiempos de solubilidad más largos. Esto indica que una mayor retención de aceite dentro de la matriz encapsulante puede estar asociada con una mejor dispersión del polvo en medios acuosos, aunque la composición de la matriz juega un papel fundamental en este comportamiento (Mardani et al., 2024)

El análisis de varianza (tabla 26) mostró diferencias altamente significativas en la solubilidad entre las formulaciones ($p < 0,001$), con un valor F de 10.316,704. La variabilidad estuvo principalmente explicada por los tratamientos, dado que los cuadrados medios entre grupos (14.328,756) fueron significativamente superiores a los dentro de los grupos (1,389), indicando un fuerte impacto de las composiciones de encapsulantes en esta propiedad.

Tabla 26: Análisis de varianza para la Solubilidad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado	P - valor
Entre grupos	71643,778	5	14328,756	10316,704	,000
Dentro de grupos	16,667	12	1,389		
Total	71660,444	17			

La prueba de Tukey para la solubilidad (Tabla 27) mostró diferencias significativas entre las formulaciones, distribuyéndose en seis subconjuntos. GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina) tuvo la menor solubilidad con un promedio de 187,33, seguido por GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) con 192,33 y GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina) con 203,00, ubicándose en los primeros tres subconjuntos. Por otro lado, las formulaciones basadas en caseína y lactosa mostraron valores superiores: CL1 (5% caseína y 25% lactosa) alcanzó 300,67, CL2 (15% caseína y 15% lactosa) 323,33 y CL3

(25% caseína y 5% lactosa) 332,00, destacándose en los subconjuntos 4, 5 y 6. Estos resultados evidenciaron que las formulaciones con mayores proporciones de caseína y lactosa favorecieron la solubilidad, mientras que aquellas con mayor contenido de goma arábica mostraron menores valores, resaltando el impacto del tipo de encapsulante en esta propiedad.

Tabla 27: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Solubilidad

FORMULACIÓ N	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
GM3	3	187,3333					
GM2	3		192,3333				
GM1	3			203,0000			
CL1	3				300,6667		
CL2	3					323,3333	
CL3	3						332,0000
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Los resultados muestran que la matriz encapsulante tiene un impacto significativo en la velocidad de disolución del polvo microencapsulado. Formulaciones con Goma Arábica - Maltodextrina (M1) muestran tiempos de solubilidad más cortos, lo que sugiere que estas formulaciones pueden ser más adecuadas para aplicaciones donde se requiera rápida dispersión en medios líquidos, como bebidas funcionales y suplementos en polvo.

En contraste, las formulaciones con Caseína - Lactosa (M2) presentan tiempos de solubilidad más prolongados, lo que puede ser beneficioso en aplicaciones donde se requiera una liberación más controlada del aceite encapsulado. Sin embargo, su menor solubilidad podría representar un desafío en términos de reconstitución del polvo, especialmente en sistemas donde se busca una rápida incorporación en soluciones líquidas (Lavanya et al., 2020)

Desde una perspectiva industrial, estos hallazgos resaltan la importancia de ajustar la composición de la matriz encapsulante en función de la aplicación del polvo microencapsulado. Estudios previos han indicado que el tamaño de partícula, la temperatura de secado y la higroscopicidad del polvo pueden influir en la solubilidad, por lo que futuros trabajos podrían evaluar estos factores para

optimizar el rendimiento de las microcápsulas en distintas formulaciones (Encina et al., 2016b). Además, considerando que la solubilidad es un factor determinante en la biodisponibilidad de los nutrientes encapsulados, sería recomendable realizar estudios adicionales para evaluar la influencia de diferentes condiciones de reconstitución, como la temperatura y el pH del medio líquido, en la disolución de las microcápsulas.

4.2.5. Evaluación del Índice de Peróxido

La Tabla 28 presenta los valores del índice de peróxidos (IP) en las diferentes formulaciones de aceites microencapsulados. El índice de peróxidos es un indicador clave de la estabilidad oxidativa del aceite, ya que mide la cantidad de compuestos primarios de oxidación, principalmente hidroperóxidos, formados por la exposición del aceite al oxígeno durante el procesamiento y almacenamiento (Miyashita et al., 2018). Un IP elevado sugiere un mayor grado de oxidación, lo que puede afectar la calidad sensorial y nutricional del producto final, disminuyendo la vida útil del aceite encapsulado (Kaushik et al., 2016).

Tabla 28: Parámetros Oxidativos en las muestras de aceites microencapsulados

MATRIZ	FORMULACIÓN	IP ¹
M1	GM1	2.79 ± 0.045
	GM2	2.61 ± 0.065
	GM3	2.32 ± 0.086
M2	CL1	3.22 ± 0.054
	CL2	3.38 ± 0.033
	CL3	3.75 ± 0.050

¹Índice de peróxidos

Los valores obtenidos muestran que las formulaciones basadas en Caseína - Lactosa (M2) presentan índices de peróxidos más elevados en comparación con las formulaciones con Goma Arábica - Maltodextrina (M1). Este comportamiento puede estar relacionado con la estructura de la matriz encapsulante, ya que la caseína y la lactosa pueden no proporcionar la misma barrera protectora contra la oxidación que la goma arábica y la maltodextrina. Se ha reportado que matrices a

base de polisacáridos, como la goma arábica, forman películas más compactas alrededor del núcleo lipídico, reduciendo la permeabilidad al oxígeno y mejorando la estabilidad oxidativa (Khoshnoudi-Nia et al., 2022).

En este sentido, las formulaciones GM1-GM3 (M1) presentan valores de IP menores en comparación con CL1-CL3 (M2), lo que indica una mejor protección del aceite encapsulado contra la oxidación lipídica. Investigaciones previas han demostrado que la combinación de maltodextrina y goma arábica puede mejorar la eficiencia de encapsulación y reducir la formación de peróxidos, minimizando la degradación del aceite durante el almacenamiento (Damerau et al., 2022)

La Figura 26 presenta la relación entre el índice de peróxidos (IP) y la eficiencia de encapsulación (EE) en las distintas formulaciones de aceite de anchoveta microencapsulado. Se observa que las formulaciones con mayor EE presentan un menor IP, lo que sugiere que una encapsulación eficiente contribuye a la estabilidad oxidativa del aceite. En particular, las formulaciones GM3 y GM2 (Matriz Goma Arábica - Maltodextrina) presentan los menores índices de peróxidos, lo que indica que esta combinación de encapsulantes proporciona una mayor barrera de protección contra la oxidación. Investigaciones previas han demostrado que la goma arábica y la maltodextrina forman películas protectoras más compactas alrededor del núcleo lipídico, reduciendo la permeabilidad al oxígeno y retardando la degradación oxidativa del aceite (Annamalai et al., 2020).

En contraste, las formulaciones CL2 y CL3 (Matriz Caseína - Lactosa) presentan los valores más altos de IP, lo que sugiere una menor protección del aceite encapsulado frente a la oxidación. Esto puede estar relacionado con la estructura proteica de la caseína, la cual, a pesar de ofrecer estabilidad estructural, puede no ser tan efectiva como los polisacáridos en la reducción del contacto del aceite con el oxígeno. Además, la mayor higroscopicidad de la lactosa podría favorecer la absorción de humedad, lo que podría acelerar la degradación oxidativa en condiciones de almacenamiento desfavorables (Jokar et al., 2024; Miyashita et al., 2018)

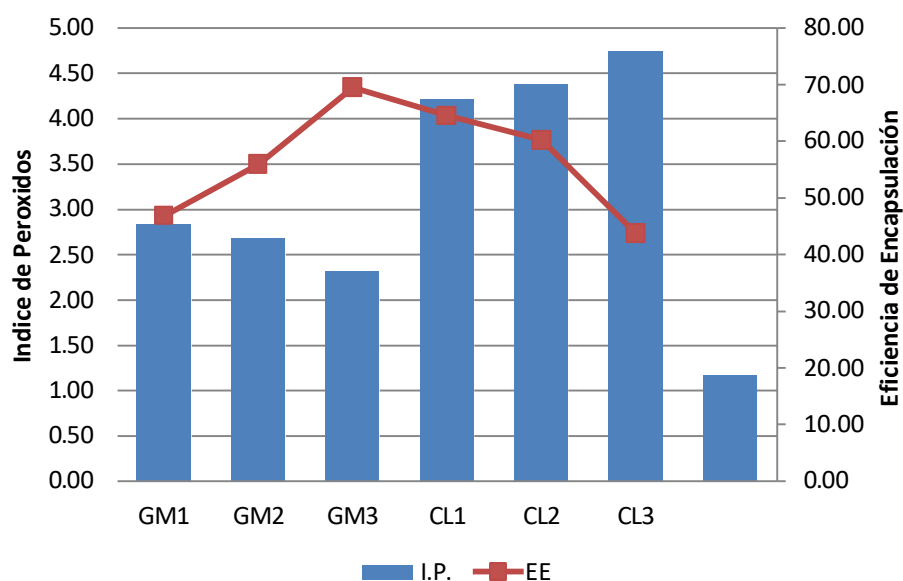


Figura 26: Índice de Peróxidos de los aceites microencapsulados

El análisis de varianza para el índice de peróxidos (tabla 29) mostró diferencias altamente significativas entre las formulaciones ($p < 0,001$), con un valor F de 81,569. La suma de cuadrados entre grupos (4,242) fue considerablemente mayor que la dentro de los grupos (0,125), lo que refleja que la variabilidad en los valores se explicó principalmente por las diferencias entre tratamientos. Los cuadrados medios entre grupos (0,848) fueron sustancialmente más altos que los dentro de los grupos (0,010), indicando que las formulaciones tuvieron un impacto significativo en el índice de peróxidos, probablemente relacionado con la capacidad de los encapsulantes para proteger contra la oxidación.

Tabla 29: Análisis de varianza para el índice de peróxidos

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado	P - valor
Entre grupos	4,242	5	,848	81,569	,000
Dentro de grupos	,125	12	,010		
Total	4,366	17			

La prueba de Tukey para el índice de peróxidos (Tabla 30) mostró diferencias significativas entre las formulaciones, con valores que oscilaron desde 2,320 en GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina), que presentó el menor índice de peróxidos, hasta 3,753 en CL3 (25% caseína y 5% lactosa), el valor más alto. GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) y GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina) tuvieron índices intermedios de 2,613 y 2,793, respectivamente, agrupándose en los subconjuntos 1 y 2. Las formulaciones basadas en caseína y lactosa, como CL1 (3,220), CL2 (3,380) y CL3 (3,753), presentaron los mayores índices, agrupándose en los subconjuntos 3 y 4. Estos resultados indicaron que las formulaciones con mayor proporción de goma arábica presentaron un mejor desempeño antioxidante, mientras que las basadas en caseína y lactosa mostraron una mayor susceptibilidad a la oxidación.

Tabla 30: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de Índice de peróxidos

FORMULACIÓN	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
GM3	3	2,3200			
GM2	3		2,6133		
GM1	3		2,7933		
CL1	3			3,2200	
CL2	3			3,3800	
CL3	3				3,7533
Sig.		1,000	,321	,435	1,000

Desde una perspectiva industrial, estos hallazgos refuerzan la importancia de seleccionar adecuadamente la matriz encapsulante para garantizar la calidad del producto. Para aplicaciones donde la estabilidad oxidativa es crítica, como en suplementos nutracéuticos y alimentos funcionales, el uso de polisacáridos como la goma arábica y la maltodextrina puede ser más efectivo en comparación con proteínas como la caseína. Sin embargo, la combinación de encapsulantes puede ajustarse para lograr un balance entre estabilidad estructural y funcionalidad tecnológica.

4.2.6. Evaluación de la anisidina

La Tabla 31 presenta los valores del índice de anisidina en las diferentes formulaciones de aceites microencapsulados. Este parámetro es un indicador de la oxidación secundaria, ya que mide la concentración de aldehídos y compuestos carbonílicos generados por la degradación de los hidroperóxidos formados en la oxidación primaria del aceite. Un índice elevado sugiere que el aceite ha experimentado una mayor degradación oxidativa, lo que puede afectar sus propiedades sensoriales y nutricionales, disminuyendo su vida útil (Khoshnoudi-Nia et al., 2022)

Tabla 31: Contenido de Anisidina en muestras de aceites microencapsulados

MATRIZ	FORMULACIÓN	ANISIDINA
M1	GM1	13.91 ± 0.097
	GM2	13.69 ± 0.189
	GM3	13.40 ± 0.106
M2	CL1	14.30 ± 0.072
	CL2	14.46 ± 0.040
	CL3	14.83 ± 0.061

Se observa que las formulaciones con Caseína - Lactosa (M2) presentan valores de anisidina más elevados en comparación con las formulaciones con Goma Arábica - Maltodextrina (M1). Esto sugiere que la matriz M2 no proporciona la misma protección contra la oxidación secundaria que la M1, lo que podría deberse a una mayor permeabilidad al oxígeno o una menor eficiencia en la retención del aceite dentro de la microcápsula (Venugopalan et al., 2021). Las formulaciones CL2 y CL3 presentan los valores más altos de anisidina, lo que indica una mayor acumulación de productos secundarios de oxidación en estas muestras. Investigaciones previas han reportado que las proteínas pueden retener mayor cantidad de humedad, lo que favorece la hidrólisis y la formación de compuestos volátiles de degradación oxidativa, acelerando el deterioro del aceite encapsulado (Damerau et al., 2022)

Por otro lado, las formulaciones GM1-GM3 (M1) presentan valores de anisidina más bajos, lo que indica una mejor estabilidad oxidativa del aceite encapsulado.

Este resultado coincide con estudios que han demostrado que la combinación de Goma Arábica y Maltodextrina forma una matriz más compacta, reduciendo la exposición del aceite al oxígeno y minimizando la formación de aldehídos secundarios de oxidación (Annamalai et al., 2020).

La Figura 27 presenta los valores del índice de anisidina en las diferentes formulaciones de aceites microencapsulados. Los resultados muestran que las formulaciones con Caseína - Lactosa (M2) presentan valores de anisidina más elevados en comparación con las formulaciones con Goma Arábica - Maltodextrina (M1). Esto indica que las microcápsulas de M2 son más propensas a la oxidación secundaria, lo que podría estar relacionado con su mayor contenido de humedad y su posible mayor permeabilidad al oxígeno. La mayor susceptibilidad de las formulaciones CL1-CL3 a la oxidación sugiere que la estructura proteica de la caseína no proporciona una barrera tan efectiva como los polisacáridos para evitar la degradación del aceite encapsulado (Annamalai et al., 2020)

En contraste, las formulaciones GM1-GM3 (M1) presentan valores de anisidina más bajos, lo que indica una mejor protección del aceite frente a la oxidación. Este resultado está en línea con estudios previos que han demostrado que la goma arábica y la maltodextrina forman una matriz más compacta y menos permeable al oxígeno, reduciendo así la formación de compuestos secundarios de oxidación lipídica.

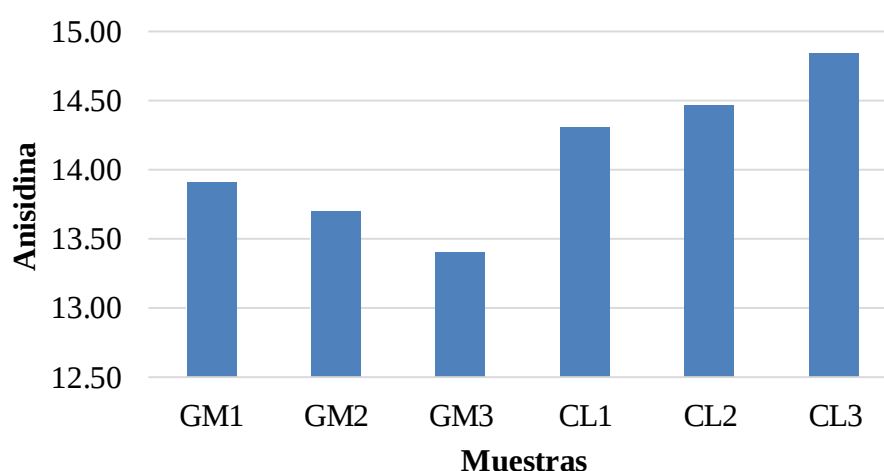


Figura 27: Índice de anisidina de los de aceites microencapsulados

El análisis de varianza para el contenido de anisidina (tabla 32) mostró diferencias altamente significativas entre las formulaciones ($p < 0,001$), con un valor F de 75,343. La mayor parte de la variabilidad se explicó por las diferencias entre los grupos, con una suma de cuadrados de 4,200 y cuadrados medios de 0,840, en comparación con los valores dentro de los grupos, que fueron mucho menores (suma de cuadrados de 0,134 y cuadrados medios de 0,011). Estos resultados indicaron que las formulaciones tuvieron un impacto significativo en el contenido de anisidina, reflejando diferencias en la capacidad de los encapsulantes para proteger los aceites frente a la oxidación secundaria.

Tabla 32: Análisis de varianza para la anisidina

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado	P - valor
Entre grupos	4,200	5	,840	75,343	,000
Dentro de grupos	,134	12	,011		
Total	4,334	17			

La prueba de Tukey para el contenido de anisidina (Tabla 33) mostró diferencias significativas entre las formulaciones, agrupándose en cuatro subconjuntos. Las formulaciones GM3 (25% goma arábica y 5% maltodextrina), GM2 (15% goma arábica y 15% maltodextrina) y GM1 (5% goma arábica y 25% maltodextrina) presentaron los valores más bajos, con promedios de 13,40, 13,69 y 13,91 respectivamente, ubicándose en los subconjuntos inferiores. Las formulaciones basadas en caseína y lactosa, como CL1 (14,30), CL2 (14,46) y CL3 (14,83), registraron valores más altos, destacando CL3 con el mayor contenido de anisidina en el subconjunto superior. Estos resultados evidenciaron que las matrices con goma arábica tuvieron un mejor desempeño antioxidante, reflejando menor oxidación secundaria en comparación con las formulaciones basadas en caseína y lactosa.

Tabla 33: Prueba de Tukey para análisis de comparaciones múltiples de anisidina

FORMULACIÓN	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
GM3	3	13,4000			
GM2	3		13,6933		
GM1	3		13,9067		
CL1	3			14,3000	
CL2	3			14,4600	
CL3	3				14,8333
Sig.		1,000	,206	,470	1,000

Los resultados indican que la matriz encapsulante tiene un impacto significativo en la oxidación secundaria del aceite microencapsulado. En general, las formulaciones con Caseína - Lactosa (M2) presentan un mayor índice de anisidina, lo que sugiere una menor protección contra la degradación oxidativa. En contraste, las formulaciones con Goma Arábica - Maltodextrina (M1) muestran una mejor estabilidad oxidativa, lo que sugiere que estas formulaciones son más adecuadas para prolongar la vida útil del aceite microencapsulado y minimizar el desarrollo de compuestos no deseables. Desde un punto de vista industrial, la selección de la matriz encapsulante es crucial para garantizar la calidad del aceite encapsulado a lo largo del tiempo. En aplicaciones donde la estabilidad oxidativa es prioritaria, como en suplementos ricos en ácidos grasos poliinsaturados y alimentos funcionales, la elección de una matriz con baja permeabilidad al oxígeno y menor retención de humedad puede mejorar la calidad del producto final.

Tabla 34: Resumen

VARIABLES	M1			M2		
	GM1	GM2	GM3	CL1	CL2	CL3
Distribución lipídica						
Aceite Total (g/100 g MP)	27.96 ± 0.39	26.63 ± 0.31	27.42 ± 0.14	26.95 ± 0.12	27.11 ± 0.34	27.71 ± 0.15
Aceite Libre (g/100 g MP)	14.86 ± 0.15	11.73 ± 0.48	8.35 ± 0.29	9.55 ± 0.54	10.76 ± 0.26	15.61 ± 0.23
EE (g/100 g AT)	46.83 ± 1.10	55.93 ± 2.26	69.55 ± 1.02	64.56 ± 2.14	60.28 ± 1.36	43.67 ± 1.07
Humedad (%)	1.58 ± 0.11	1.63 ± 0.08	1.68 ± 0.09	1.76 ± 0.05	1.80 ± 0.04	1.71 ± 0.07
Parámetros de densidad						
A (kg/m ³)	320 ± 1.2	338 ± 1.8	352 ± 1.3	340 ± 1.9	328 ± 2.0	312 ± 1.6
P (kg/m ³)	507 ± 2.2	523 ± 3.3	536 ± 3.7	521 ± 2.9	512 ± 2.2	498 ± 2.9
Aire intersticial (mm ³ /g)	1151 ± 10.5	1048 ± 8.6	973 ± 8.5	1017 ± 10.2	1092 ± 11.9	1201 ± 12.7
Compresibilidad (%)	37 ± 0.3	35 ± 0.2	34 ± 0.3	35 ± 0.2	36 ± 0.2	37 ± 0.3
Solubilidad, t (s)	203 ± 0.82	192 ± 0.94	187 ± 1.25	301 ± 0.47	323 ± 1.25	332 ± 0.82
Peróxido, (meq/kg)	2.79 ± 0.07	2.61 ± 0.19	2.32 ± 0.11	3.22 ± 0.07	3.38 ± 0.04	3.75 ± 0.06
Anisidina	13.91 ± 0.10	13.69 ± 0.19	13.4 ± 0.11	14.3 ± 0.07	14.46 ± 0.04	14.83 ± 0.06

V. CONCLUSIONES

1. Las combinaciones de encapsulantes influyeron significativamente en la eficiencia de encapsulación del aceite de anchoveta. La formulación GM3 (Maltodextrina - Goma Arábica) presentó la mayor eficiencia de encapsulación (69.55%), lo que indica que esta matriz proporcionó una mejor retención del aceite dentro de la microcápsula. En contraste, la formulación CL3 (Caseína - Lactosa) mostró la menor eficiencia de encapsulación (43.67%), sugiriendo una mayor liberación de aceite libre.
2. La estabilidad oxidativa del aceite microencapsulado dependió directamente de la matriz utilizada. Las formulaciones con M1 (GM3 y GM2) mostraron los valores más bajos de índice de peróxidos y anisidina, con IP de 2.32 meq/kg y anisidina de 13.40, respectivamente, lo que indica una mayor resistencia a la oxidación. En contraste, la formulación CL3 (M2) presentó los valores más altos de degradación oxidativa, con IP de 3.75 meq/kg y anisidina de 14.83, lo que sugiere una menor estabilidad del aceite encapsulado en almacenamiento.
3. El impacto de la matriz encapsulante en las propiedades fisicoquímicas fue evidente en la densidad, compresibilidad y solubilidad de las microcápsulas. La formulación GM3 presentó la mayor solubilidad en agua (187 s), favoreciendo su aplicación en productos de fácil reconstitución. En contraste, CL3 mostró el mayor tiempo de solubilidad (332 s), lo que indica una menor capacidad de dispersión en medios acuosos. Asimismo, la formulación CL3 presentó la mayor compresibilidad (37.6%), lo que sugiere una mayor compactación de las partículas.
4. El contenido de humedad en las microcápsulas varió según la formulación utilizada. Las muestras con M2 (CL2 y CL3) retuvieron una mayor cantidad de humedad, con valores de 1.80% y 1.71%, respectivamente, lo que puede incrementar la susceptibilidad a la degradación oxidativa. En contraste, las formulaciones GM1 y GM2 (M1) presentaron menores valores de humedad (1.58% y 1.63%), favoreciendo una mayor estabilidad del aceite encapsulado a largo plazo.

5. La microencapsulación con matrices polisacáridas demostró ser una estrategia eficiente para mejorar la estabilidad y funcionalidad del aceite de anchoveta en aplicaciones alimentarias. En general, la formulación GM3 (M1) presentó el mejor desempeño en términos de eficiencia de encapsulación, estabilidad oxidativa y solubilidad, lo que la hace ideal para aplicaciones en productos funcionales y nutraceuticos.

VI. RECOMENDACIONES

1. Optimizar las condiciones de microencapsulación, evaluando diferentes proporciones de encapsulantes y condiciones de secado para maximizar la eficiencia de encapsulación y la estabilidad oxidativa del aceite.
2. Evaluar la adición de antioxidantes naturales en la formulación encapsulante, con el fin de mejorar la estabilidad oxidativa y prolongar la vida útil del aceite microencapsulado en condiciones de almacenamiento prolongado.
3. Realizar estudios de almacenamiento a largo plazo, analizando la evolución de los parámetros de estabilidad oxidativa bajo diferentes condiciones ambientales (temperatura, humedad y exposición al oxígeno).
4. Explorar la combinación de polisacáridos y proteínas para mejorar simultáneamente la estabilidad oxidativa y las propiedades funcionales de las microcápsulas, optimizando su aplicación en diferentes tipos de productos alimentarios y nutraceuticos.
5. Ampliar la investigación hacia otras fuentes de aceites marinos, con el fin de evaluar la aplicabilidad de estos sistemas de encapsulación en otros aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados,

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahmad, I., Dogra, A., Nagpal, T., Sharma, C., Singh, S., Shaiva, N., Saini, G., & Luhach, K. (2025). Liposome-like encapsulation of fish oil-based self-nano emulsifying formulation for improved bioavailability. *Applied Food Research*, 5(1). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100745>
- Annamalai, J., Aliyamveetil Abubacker, Z., Lakshmi, N. M., & Unnikrishnan, P. (2020). Microencapsulation of Fish Oil Using Fish Protein Hydrolysate, Maltodextrin, and Gum Arabic: Effect on Structural and Oxidative Stability. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 29(3), 293–306. <https://doi.org/10.1080/10498850.2020.1723765>
- Calder, P. C. (2017). Omega-3 fatty acids and inflammatory processes: From molecules to man. *Biochemical Society Transactions*, 45(5), 1105–1115. <https://doi.org/10.1042/BST20160474>
- Chen, S., Xiao, Y., Liu, Y., Tian, X., Wang, W., Jiang, L., Wu, W., Zhang, T., Cai, W., & Wang, Y. (2022). Fish oil-based lipid emulsion alleviates parenteral nutrition-associated liver diseases and intestinal injury in piglets. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, 46(3), 709–720. <https://doi.org/10.1002/jpen.2229>
- Cheng, H., Chang, X., Luo, H., Tang, H., Chen, L., & Liang, L. (2023). Co-encapsulation of resveratrol in fish oil microcapsules optimally stabilized by enzyme-crosslinked whey protein with gum Arabic. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2023.113172>
- Codex Alimentarius. (2019). *Normas para aceites y grasas comestibles*. FAO/OMS.
- Creswell, R. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (SAGE Publications., Ed.; 5th ed., Vol. 1).
- Čulina, P., Zorić, Z., Garofulić, I. E., Repajić, M., Dragović-Uzelac, V., & Pedisić, S. (2023). Optimization of the Spray-Drying Encapsulation of Sea Buckthorn Berry Oil. *Foods*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/foods12132448>

- Damerau, A., Mustonen, S. A., Ogrodowska, D., Varjotie, L., Brandt, W., Laaksonen, O., Tańska, M., & Linderborg, K. M. (2022). Food Fortification Using Spray-Dried Emulsions of Fish Oil Produced with Maltodextrin, Plant and Whey Proteins—Effect on Sensory Perception, Volatiles and Storage Stability. *Molecules*, 27(11). <https://doi.org/10.3390/molecules27113553>
- Debbarma, A., Kumar, V., Mishra, P. K., Kakatkar, A. S., Gautam, R. K., Umra, F., & Chatterjee, S. (2023). Valorisation of Basa fish (*Pangasius bocourti*) waste: Oil extraction and encapsulation. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(5), 2764–2771. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16117>
- Diamond, D. M., O'Neill, B. J., & Volek, J. S. (2020). Low carbohydrate diet: Are concerns with saturated fat, lipids, and cardiovascular disease risk justified? *Current Opinion in Endocrinology, Diabetes and Obesity*, 27(5), 291–300. <https://doi.org/10.1097/MED.0000000000000568>
- Donmez, D., Limon, J., Russi, J. P., Relling, A. E., Riedl, K., Manubolu, M., & Campanella, O. H. (2024). Encapsulation of fish oil, a triglyceride rich in polyunsaturated fatty acids, within a maillard reacted lecithin-dextrose matrix. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101283>
- Droźłowska, E., Bartkowiak, A., Trocer, P., Kostek, M., Tarnowiecka-Kuca, A., & Łopusiewicz, Ł. (2021). Formulation and evaluation of spray-dried reconstituted flaxseed oil-in-water emulsions based on flaxseed oil cake extract as emulsifying and stabilizing agent. *Foods*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/foods10020256>
- Duman, E., Evcin, A., Enginar, H., Ersoy, B., Kayhan, H., & Çetinkaya, Z. (2024). Encapsulation of Essential Oils Using Complex Coacervation: A Study on Microcapsule Formation and Efficiency. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 10(3), 527–536. <https://doi.org/10.22399/ijcesen.394>
- Encina, C., Vergara, C., Giménez, B., Oyarzún-Ampuero, F., & Robert, P. (2016a). Conventional spray-drying and future trends for the microencapsulation of fish oil.

- Trends in Food Science and Technology*, 56, 46–60.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.014>
- Falsafi, S. R., Rostamabadi, H., & Jafari, S. M. (2020). X-ray diffraction (XRD) of nanoencapsulated food ingredients. In *Characterization of Nanoencapsulated Food Ingredients*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815667-4.00009-2>
- Ghosh, M., Upadhyay, R., Raigar, R. K., & Mishra, H. N. (2022). Fabrication of spray-dried microcapsules of omega-3, 6 fatty acid-rich plant oil blend using wall mix of maltodextrin + proteins. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11). <https://doi.org/10.1111/jfpp.17103>
- Hashim, N. A., Mudalip, S. K. A., Man, R. C., & Sulaiman, S. Z. (2023). Menhaden fish oil encapsulation by spray drying process: influence of different biopolymer materials, inlet air temperature and emulsion ratios. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 98(11), 2726–2733. <https://doi.org/10.1002/jctb.7454>
- Hernández Sampieri, R. , F. C. , & B. P. (2018). *Metodología de la investigación* (McGraw-Hill, Ed.; 6th ed., Vol. 1).
- Jokar, Y. K., Goli, M., Esfahani, M. N., Fazel, M., & Najarian, A. (2024). Microencapsulation of fish oil rich in EPA and DHA using mixture of Arabic gum and Persian gum through spray-drying technique. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 126(8). <https://doi.org/10.1002/ejlt.202300239>
- Kaushik, P., Dowling, K., McKnight, S., Barrow, C. J., & Adhikari, B. (2016). Microencapsulation of flaxseed oil in flaxseed protein and flaxseed gum complex coacervates. *Food Research International*, 86, 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2016.05.015>
- Khoshnoudi-Nia, S., Forghani, Z., & Jafari, S. M. (2022). A systematic review and meta-analysis of fish oil encapsulation within different micro/nanocarriers. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(8), 2061–2082. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1848793>
- Lavanya, M. N., Kathiravan, T., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Influence of spray-drying conditions on microencapsulation of fish oil and chia oil.

- Drying Technology*, 38(3), 279–292.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1553181>
- Li, S., Zhu, L., Wu, G., Jin, Q., Wang, X., & Zhang, H. (2022). Relationship between the microstructure and physical properties of emulsifier based oleogels and cookies quality. *Food Chemistry*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131966>
- Li, Z., Sun, C., Naeem, A., Li, Q., Yang, L., Jin, Z., Guan, Y., Chen, L., Zhu, W., & Ming, L. (2024). Advancements in spray drying, part I: From critical factors to variegated applications. *Drying Technology*, 42(16), 2299–2327.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2422486>
- Mardani, M., Siahtiri, S., Besati, M., Baghani, M., Baniassadi, M., & Nejad, A. M. (2024). Microencapsulation of natural products using spray drying; an overview. *Journal of Microencapsulation*, 41(7), 649–678.
<https://doi.org/10.1080/02652048.2024.2389136>
- Miyashita, K., Uemura, M., & Hosokawa, M. (2018). Effective Prevention of Oxidative Deterioration of Fish Oil: Focus on Flavor Deterioration. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 209–226. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012320>
- Montgomery, M. (2019). *Design and analysis of experiments* (Wiley., Ed.; 9th ed., Vol. 1).
- Peng, J., Zhang, W., Zi, Y., Shi, C., Kan, G., Gong, H., Wang, X., & Zhong, J. (2024). Fish oil encapsulation by genipin-crosslinked complex coacervation between gelatin and different anionic polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109945>
- Phanse, S. K., & Chandra, S. (2024). Spray drying encapsulation of essential oils: Insights on various factors affecting the physicochemical properties of the microcapsules. *Flavour and Fragrance Journal*, 39(2), 93–115. <https://doi.org/10.1002/ffj.3774>
- Rahim, M. A., Imran, M., Khan, M. K., Ahmad, M. H., & Ahmad, R. S. (2022). Impact of spray drying operating conditions on encapsulation efficiency, oxidative quality,

- and sensorial evaluation of chia and fish oil blends. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(2). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16248>
- Rahim, M. A., Regenstein, J. M., Al-Asmari, F., Imran, M., Ramadan, M. F., Rocha, J. M. F., Hussain, I., & Zongo, E. (2024). Optimized spray-dried conditions' impact on fatty acid profiles and estimation of in vitro digestion of spray-dried chia/fish oil microcapsules. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65214-x>
- Selim, K. A., Alharthi, S. S., Abu El-Hassan, A. M., Elneairy, N. A., Rabee, L. A., & Abdel-Razek, A. G. (2021). The effect of wall material type on the encapsulation efficiency and oxidative stability of fish oils. *Molecules*, 26(20). <https://doi.org/10.3390/molecules26206109>
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids and Their Health Benefits. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 345–381. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-111317-095850>
- Siri-Tarino, P. W., Chiu, S., Bergeron, N., & Krauss, R. M. (2015). Saturated Fats Versus Polyunsaturated Fats Versus Carbohydrates for Cardiovascular Disease Prevention and Treatment. In *Annual Review of Nutrition* (Vol. 35, Issue 1). <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071714-034449>
- Sultana, A., Adachi, S., & Yoshii, H. (2023). Encapsulation of fish oil and essential fatty acids by spray drying. *Sustainable Food Technology*, 1(6), 827–836. <https://doi.org/10.1039/d3fb00099k>
- The Marine Ingredients Organisation. (2025). *IFFO's estimates for 2024's fishmeal and fish oil production*. IFFO.
- Torres-Vanegas, J., Rodríguez-Echevarría, R., Campos-Pérez, W., Rodríguez-Reyes, S. C., Reyes-Pérez, S. D., Pérez-Robles, M., & Martínez-López, E. (2025). Effect of a Diet Supplemented with Marine Omega-3 Fatty Acids on Inflammatory Markers in Subjects with Obesity: A Randomized Active Placebo-Controlled Trial. *Healthcare (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/healthcare13020103>

- Turchini, G. M., Torstensen, B. E., & Ng, W.-K. (2009). Fish oil replacement in finfish nutrition. *Reviews in Aquaculture*, 1(1), 10–57. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2008.01001.x>
- Vaucher, A. C. D. S., Dias, P. C. M., Coimbra, P. T., Costa, I. D. S. M., Marreto, R. N., Dellamora-Ortiz, G. M., De Freitas, O., & Ramos, M. F. S. (2019). Microencapsulation of fish oil by casein-pectin complexes and gum arabic microparticles: oxidative stabilisation. *Journal of Microencapsulation*, 36(5), 459–473. <https://doi.org/10.1080/02652048.2019.1646335>
- Venugopalan, V. K., Gopakumar, L. R., Kumaran, A. K., Chatterjee, N. S., Soman, V., Peeralil, S., Mathew, S., McClements, D. J., & Nagarajao, R. C. (2021a). Encapsulation and protection of omega-3-rich fish oils using food-grade delivery systems. In *Foods* (Vol. 10, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/foods10071566>
- Venugopalan, V. K., Gopakumar, L. R., Kumaran, A. K., Chatterjee, N. S., Soman, V., Peeralil, S., Mathew, S., McClements, D. J., & Nagarajao, R. C. (2021b). Encapsulation and protection of omega-3-rich fish oils using food-grade delivery systems. *Foods*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/foods10071566>
- Wang, C., Wang, H., Abd El-Aty, A. M., Su, W., & Tan, M. (2024). Preparation of bilayer nano-oleogel by whey protein isolate and soy lecithin for fish oil encapsulation and its application in cookies. *Food Hydrocolloids*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109280>
- Wardhani, D. H., Sumarsih, E., Ulya, H. N., Kumoro, A. C., & Aryanti, N. (2024). The potency of hydrophobic modification of alginate for a self-assembly matrix in fish oil encapsulation. *Food Bioscience*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103890>
- Wardhani, D. H., Ulya, H. N., Kumoro, A. C., & Aryanti, N. (2022). PARTIAL HYDROPHOBIC MODIFICATION OF ALGINATE USING DODECENYL SUCCINIC ANHYDRIDE FOR FISH OIL ENCAPSULATION. *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*, 21(4). <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2022.1077>

- Xiao, S., & Ahn, D. U. (2023). Co-encapsulation of fish oil with essential oils and lutein/curcumin to increase the oxidative stability of fish oil powder. *Food Chemistry*, 410. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135465>
- Yan, C., Kim, S.-R., Ruiz, D. R., & Farmer, J. R. (2022). Microencapsulation for Food Applications: A Review. *ACS Applied Bio Materials*, 5(12), 5497–5512. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00673>
- Yang, M., Li, L., Zhu, X., Liang, L., Chen, J., Cao, W., Liu, W., Duan, X., Ren, G., & Liu, Z. (2024). Microencapsulation of fish oil by spray drying, spray freeze-drying, freeze-drying, and microwave freeze-drying: Microcapsule characterization and storage stability. *Journal of Food Science*, 89(6), 3276–3289. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17098>
- Yang, M., Peng, J., Zi, Y., Shi, C., Kan, G., Wang, X., & Zhong, J. (2023). Encapsulation of fish oil by complex coacervation and freeze drying with modified starch aid. *Food Hydrocolloids*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108371>
- Zhang, W., Chen, L., Bian, Q., Gong, H., Li, L., Wang, Z., Wang, X., & Zhong, J. (2024). Complex coacervation of low methoxy pectin with three types of gelatins for the encapsulation of fish oil. *Food Chemistry*, 460. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140567>
- Zhang, Y., Sun, Y., Yu, Q., Song, S., Brenna, J. T., Shen, Y., & Ye, K. (2024). Higher ratio of plasma omega-6/omega-3 fatty acids is associated with greater risk of all-cause, cancer, and cardiovascular mortality: A population-based cohort study in UK Biobank. *ELife*, 12. <https://doi.org/10.7554/eLife.90132>
- Zhang, Z. K., Xiao, J. X., & Huang, G. Q. (2020). Pickering emulsions stabilized by ovalbumin-sodium alginate coacervates. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 595, 124712. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2020.124712>