

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Diseño conceptual del proceso de interesterificado enzimático de palma y oliva  
para la obtención de una manteca vegetal

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Marián Angeline Lovato Yagual

Silvia Nelly Márquez Córdova

Guayaquil - Ecuador

2024

## DEDICATORIA

A mi madre, Blanca Yagual, por ser mi constante apoyo y mi refugio. Tu amor incondicional y tus sacrificios constantes han sido el motor que me impulsa a ser mejor cada día. A mi abuela Grace Machuca, pilar fundamental de mi vida, por su sabiduría, sus consejos invaluable y su apoyo inquebrantable. Tu presencia ha sido una guía y una fuente de fortaleza en cada paso de mi camino. A mi hermana Grace Yagual y mi cuñado Manuel Aspiazu, mis inspiraciones y modelos a seguir. Gracias por mostrarme con su ejemplo el tipo de profesionales y personas que aspiro a ser. A mis tíos Otto Laman e Ivonne Solorzano, por su apoyo incondicional. Su presencia y aliento han sido fundamentales en mi crecimiento personal y profesional. A mis amigos, con quienes he compartido risas y experiencias inolvidables. Gracias por hacer que este viaje se encuentre lleno de momentos memorables. Y, por último, pero no menos importante, a mis fieles compañeras: Luna, mi constante fuente de alegría y compañía, y Lola, quien me acompañó fielmente durante las clases virtuales, en los días buenos y malos. Siempre estaré agradecida por cada minuto de vida que compartiste conmigo. Ambas han llenado mi vida de amor incondicional.

*Marián Angeline Lovato Yagual*

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Víctor Márquez y Dorila Córdova, quienes han sido la fuerza y el refugio incondicional en cada paso de mi vida. Gracias por ser mi pilar, por darme siempre lo necesario para seguir adelante y por enseñarme el valor del esfuerzo y el amor inagotable. Su sacrificio y dedicación son la base de este logro. A mis hermanos, Bersabet y Leo, quienes han sido mis compañeros de vida desde siempre, estando siempre a mi lado, apoyándome en cada desafío y celebrando conmigo cada logro. Su presencia ha sido una fuente constante de fortaleza y confianza. A mis sobrinos, Maverick y Mabel, quienes con su inocencia y alegría me recuerdan la importancia de las pequeñas cosas en la vida, y me llenan de esperanza. A mis amigos, quienes han compartido este camino conmigo, llenándolo de risas, sabiduría y compañía. Gracias por estar en los momentos más felices y también en los más difíciles. Dedico este logro a todos ustedes, con todo mi amor y cariño.

*Silvia Nelly Marquez Cordova*

## AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a Dios, por ser nuestra guía y fortaleza a lo largo de este viaje. Su luz y su apoyo han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A nuestras familias, por su amor incondicional y por ser la mayor fuente de inspiración y apoyo en nuestras vidas. Gracias por creer en nosotras y brindarnos la oportunidad de seguir nuestros sueños, incluso cuando el camino se volvía incierto. Sin su amor y apoyo, este logro no habría sido posible.

Al PhD. Carlos Bucaram, por ser nuestro tutor y guía, aportando su experiencia y conocimiento con generosidad y compromiso, y ayudándonos a navegar este proyecto con éxito.

A los docentes que nos brindaron su invaluable apoyo: Maribel Jaramillo, Miriam Santos, Nadia Flores, Tyrone Alcívar y Michael Rendón, quienes con su generosidad y conocimientos nos proporcionaron el respaldo necesario y los recursos que necesitábamos.

A los amigos que hemos tenido el privilegio de hacer en el camino, quienes con su presencia y camaradería han convertido cada día ordinario en una experiencia extraordinaria.

*Marián y Silvia*

## Declaración Expresa

---

Nosotros **LOVATO YAGUAL MARIAN ANGELINE** y **MARQUEZ CORDOVA SILVIA NELLY**, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá a los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor de los autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 23 de Mayo del 2024.

  
\_\_\_\_\_  
**LOVATO YAGUAL**  
**MARIAN ANGELINE**

  
\_\_\_\_\_  
**MARQUEZ CORDOVA**  
**SILVIA NELLY**

## **EVALUADORES**

---

**Mgtr Nadia Flores**

Profesor de materia

---

**PhD Carlos Bucaram**

Tutor de proyecto

## Resumen

Tradicionalmente, la fabricación de mantecas se realiza mediante hidrogenación parcial y otros métodos como el fraccionamiento y la transesterificación. Sin embargo, para mejorar el proceso, se propone el uso de una nueva tecnología: la interesterificación enzimática. Este método promete producir grasas libres de ácidos grasos trans y evitar la generación de subproductos no deseados. Este proyecto se centró en la evaluación y mejora del proceso de interesterificación enzimática de mezclas de aceites de palma y oliva para la producción de manteca vegetal, destinada a la industria panificadora. A través de una metodología experimental, se comprobó la efectividad de este proceso en la modificación de la composición de ácidos grasos, mejorando las propiedades físicas y químicas del producto final. Asimismo, se confirmó que la manteca producida no contiene ácidos grasos trans y que no se generan subproductos no deseados. En particular de los análisis en el laboratorio, se destacó que las condiciones a 60°C durante 4 horas, a 350 RPM y 4 horas a 700 RPM resultaron especialmente efectivas. A través de un perfil lipídico, se comprobó un aumento significativo en la formación de ácidos grasos monoinsaturados bajo estas condiciones. Con base en los resultados experimentales, se diseñó conceptualmente una planta de interesterificación enzimática a nivel industrial, seleccionando y dimensionando los equipos adecuados. El análisis económico arrojó un periodo de recuperación de la inversión (PBP) de 3.8 años, una tasa interna de retorno (TIR) del 36.28%, y un valor actual neto (VAN) de \$658,000. Estos resultados confirmaron la viabilidad financiera del proyecto, demostrando que el diseño propuesto no solo es técnicamente factible, sino también rentable para su implementación a escala industrial.

**Palabras clave:** Lipozyme TL IM, ácidos grasos trans, grasas saludables, nutrición.

## Abstract

Traditionally, the production of shortenings has been carried out through partial hydrogenation and other methods such as fractionation and transesterification. However, to enhance the process, the use of a new technology is proposed: enzymatic interesterification. This method aims to produce trans fat-free fats and avoid the generation of unwanted by-products. This project focused on the evaluation and improvement of the enzymatic interesterification process of palm and olive oil blends to produce vegetable shortening aimed at the baking industry. Through an experimental methodology, the effectiveness of this process in modifying the fatty acid composition was proven, improving the physical and chemical properties of the final product. Additionally, it was confirmed that the produced shortening contains no trans fats and that no unwanted by-products are generated. Laboratory analyses highlighted those conditions at 60°C for 4 hours at 350 RPM and 4 hours at 700 RPM proved to be especially effective. A lipid profile analysis showed a significant increase in the formation of monounsaturated fatty acids under these conditions. Based on the experimental results, a conceptual design of an industrial-scale enzymatic interesterification plant was developed, selecting and sizing the appropriate equipment. The economic analysis showed a payback period (PBP) of 3.8 years, an internal rate of return (IRR) of 36.28%, and a net present value (NPV) of \$658,000. These results confirmed the financial viability of the project, demonstrating that the proposed design is not only technically feasible but also profitable for industrial-scale implementation.

**Keywords:** Lipozyme TL IM, trans fatty acids, healthy fats, nutrition.

## Índice general

<b>RESUMEN.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>III</b>
<b>ABREVIATURAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>SIMBOLOGÍA.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>1. CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.4 OBJETIVOS .....	5
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	5
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	5
1.5 MARCO TEÓRICO.....	6
1.5.1 <i>Industria para la elaboración de mantecas vegetales</i> .....	6
1.5.2 <i>Procesos tradicionales de modificación de grasas</i> .....	6
1.5.3 <i>Grasas Trans</i> .....	7
1.5.4 <i>Interesterificado</i> .....	7
1.5.5 <i>Normativas INEN</i> .....	10
<b>2. CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>13</b>
2.1 DISEÑO METODOLÓGICO .....	14
2.1 MATERIAS PRIMAS.....	16
2.1.1 <i>Aceite de palma</i> .....	16
2.1.2 <i>Aceite de oliva</i> .....	16
2.2 REACTIVOS EMPLEADOS DURANTE EL PROCESO DE INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA.....	16
2.2.1 <i>Enzima Lipozyme TL IM como catalizador</i> .....	16
2.3 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS .....	17

2.4	ACTIVACIÓN DE LA ENZIMA .....	18
2.5	MEZCLA DE MATERIAS PRIMAS .....	19
2.6	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA MANTECA VEGETAL .....	20
2.6.1	Índice de refracción .....	20
2.6.2	Índice de Acidez .....	20
2.6.3	Perfil de ácidos grasos.....	20
2.7	ACONDICIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE ACEITE .....	21
2.8	FILTRADO .....	22
2.9	ANÁLISIS ORGANOLÉPTICO DEL ACEITE INTERESTERIFICADO .....	23
2.9.1	Olor.....	24
2.9.2	Color .....	24
2.9.3	Textura.....	24
2.10	ELABORACIÓN DE LA MANTECA VEGETAL .....	25
2.11	DIAGRAMA DE BLOQUE DE PROCESO PARA DISEÑO CONCEPTUAL DE LA INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA .....	26
2.11.1	Diagrama de Bloques (BFD).....	27
2.11.2	Justificación del Diseño.....	28
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>29</b>
3.1	EVALUACIÓN SENSORIAL Y SELECCIÓN DEL MEJOR ACEITE DE PALMA PARA MEZCLAS 30	
3.2	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS .....	31
3.2.1	Índice de refracción .....	31
3.2.2	Índice de acidez.....	33
3.2.3	Punto de fusión .....	34
3.2.4	Perfil lipídico de la manteca obtenida.....	36
3.3	EVALUACIÓN DE LA MANTECA EN LA INDUSTRIA PANADERA .....	39
3.3.1	Selección de la mejor mezcla.....	39
3.3.1	Elaboración de pan con la manteca .....	41
3.4	DISEÑO DE UN REACTOR PARA LA PRODUCCIÓN A ESCALA.....	44
3.4.1	Dimensiones y características técnicas .....	44
3.4.2	Diagrama de flujo del proceso .....	46
3.5	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROCESO.....	48
3.5.1	Estimación de costos de producción.....	48

3.5.2	<i>Análisis Comparativo del Uso de Manteca</i> .....	50
3.5.3	<i>Evaluación de la rentabilidad</i> .....	51
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>53</b>
4.1	CONCLUSIONES .....	54
4.2	RECOMENDACIONES .....	55
<b>5.</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>56</b>
	<b>APÉNDICE A – ESTADÍSTICA</b> .....	<b>60</b>
	<b>APÉNDICE B – CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE LA ENZIMA</b> .....	<b>67</b>
	<b>APÉNDICE C – PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS BÁSICAS DE LIPOZYME TL IM</b> .....	<b>68</b>

## Abreviaturas

AOCS	American Oil Chemists' Society
CAPCOST	Capital Cost – Costo capital
CG	Cromatografía de gases
FAME	Fatty Acid Methyl Esters - Ésteres metílicos de ácidos grasos
FID	Flame Ionization Detector - Detector de ionización de llama
HDL	Lipoproteína de Alta Densidad
LDL	Lipoproteína de Baja Densidad
Lipozyme TL IM	Lipase Thermomyces Lanuginosus Immobilized - Lipasa inmovilizada de Thermomyces Lanuginosus
NTE INEN	Normativa Técnica Instituto Ecuatoriano de Normalización
OMS	Organización Mundial de la Salud
PBD	Process Block Diagram – Diagrama de bloque de proceso
PFD	Process Flow Diagram – Diagrama de flujo de proceso
TAG	Triacilgliceroles
TFA	Trans Fatty Acids - Ácidos grasos trans
3-MCPD	3-monocloropropano1,2-diol

**Simbología**

°C	Grados celsius
$m^3$	Metro cubico
$m$	Metro
rpm	Revoluciones por segundo
rpm	Revoluciones por minuto
$W$	Watts

## Índice de tablas

<b>TABLA 1.1</b> <i>COMPARACIÓN DE PROCESOS DE INTERESTERIFICACIÓN</i> .....	9
<b>TABLA 1.2</b> <i>RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD PARA MEZCLA DE ACEITES VEGETALES - NTE INEN 34</i> .....	11
<b>TABLA 1.3</b> <i>RESUMEN DE REQUISITOS FÍSICOQUÍMICOS EN MANTECAS - NTE INEN 1313</i> .....	12
<b>TABLA 2.1</b> <i>VARIABLES E INDICADORES DEL PROCESO</i> .....	14
<b>TABLA 2.2</b> <i>VOLUMEN DE ACEITES EN LAS DISTINTAS MUESTRAS</i> .....	19
<b>TABLA 3.1</b> <i>COMPARACIÓN SENSORIAL DE ACEITES DE PALMA A Y B EN DIFERENTES PROPORCIONES</i> .....	30
<b>TABLA 3.2</b> <i>ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE LA MEZCLA INICIAL DE ACEITES EN DIFERENTES PROPORCIONES</i> .....	31
<b>TABLA 3.3</b> <i>ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE LA MEZCLA DE ACEITES - 4 HORAS DE INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</i> .....	31
<b>TABLA 3.4</b> <i>ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE LA MEZCLA DE ACEITES - 6 HORAS DE INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</i> .....	32
<b>TABLA 3.5</b> <i>ÍNDICE DE ÁCIDEZ EN DIFERENTES PROPORCIONES DE MEZCLA Y CONDICIONES DE AGITACIÓN DURANTE LA INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</i> .....	33
<b>TABLA 3.6</b> <i>COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DEL PAN ELABORADO CON MANTECA No INTERESTERIFICADA VS. MANTECA INTERESTERIFICADA</i> .....	43
<b>TABLA 3.7</b> <i>DIMENSIONES DEL REACTOR</i> .....	44
<b>TABLA 3.8</b> <i>EQUIPOS Y OPERACIONES EN EL PROCESO DE INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</i> .....	47
<b>TABLA 3.9</b> <i>EQUIPOS NECESARIOS PARA UNA PLANTA DE INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</i> .....	49
<b>TABLA 3.10</b> <i>COSTOS ANUALES DE MATERIA PRIMA PARA UNA PLANTA DE INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</i> .....	49
<b>TABLA 3.11</b> <i>PRODUCCIÓN DE PANES</i> .....	50
<b>TABLA 3.12</b> <i>COSTOS POR PAN</i> .....	50

## Índice de figuras

<b>FIGURA 1.1</b> <i>MECANISMO DE REACCIÓN DE LA INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</i> .....	9
<b>FIGURA 2.1</b> <i>MÉTODOS</i> .....	15
<b>FIGURA 2.2</b> <i>BALANZA ANALÍTICA</i> .....	18
<b>FIGURA 2.3</b> <i>ESTUFA MEMMERT</i> .....	19
<b>FIGURA 2.4</b> <i>ACONDICIONAMIENTO DE UNA MEZCLA 70/30 EN UNA PLANCHA DE CALENTAMIENTO Y AGITACIÓN</i> .....	22
<b>FIGURA 2.5</b> <i>TEXTURA DE LA ENZIMA ANTES DE REALIZAR EL FILTRADO AL VACÍO</i> .....	23
<b>FIGURA 2.6</b> <i>TEXTURA DE LA ENZIMA DESPUÉS DE REALIZAR EL FILTRADO AL VACÍO</i> .....	23
<b>FIGURA 2.7</b> <i>DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</i> .....	27
<b>FIGURA 3.1</b> <i>ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE MEZCLAS DE ACEITES DE PALMA Y OLIVA BAJO DIFERENTES CONDICIONES</i> .....	32
<b>FIGURA 3.2</b> <i>PUNTO DE FUSIÓN DE LA MISMA MEZCLA DE ACEITES BAJO DIFERENTES CONDICIONES</i> .....	34
<b>FIGURA 3.3</b> <i>DISTRIBUCIÓN DE ÁCIDOS GRASOS EN LA MUESTRA INICIAL</i> .....	36
<b>FIGURA 3.4</b> <i>DISTRIBUCIÓN DE ÁCIDOS GRASOS EN LA MUESTRA DE 4H/350 RPM</i> .....	37
<b>FIGURA 3.5</b> <i>DISTRIBUCIÓN DE ÁCIDOS GRASOS EN LA MUESTRA DE 4H/700 RPM</i> .....	38
<b>FIGURA 3.6</b> <i>PORCENTAJE DE ÁCIDOS GRASOS DE TRES MUESTRAS</i> .....	39
<b>FIGURA 3.7</b> <i>COMPARACIÓN VISUAL DE PAN CON MANTECA INTERESTERIFICADA Y NO INTERESTERIFICADA</i> .....	42
<b>FIGURA 3.8</b> <i>DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN REACTOR CON AGITACIÓN</i> .....	44
<b>FIGURA 3.9</b> <i>DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE INTERESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</i> .....	46
<b>FIGURA 3.11</b> <i>DIAGRAMA DEL FLUJO DE CAJA</i> .....	51

## **1. Capítulo 1**

## **1.1 Introducción**

En la industria alimentaria, la búsqueda de métodos sostenibles y saludables para la producción de grasas vegetales ha llevado al desarrollo y a la adopción de tecnologías avanzadas como la interesterificación enzimática. Este método permite modificar las propiedades de los aceites vegetales sin los efectos adversos asociados con la hidrogenación parcial, como la formación de ácidos grasos trans, conocidos por su impacto negativo en la salud cardiovascular.

El proceso de interesterificación enzimática es una técnica innovadora en la vanguardia de la investigación sobre grasas vegetales desde una perspectiva científica y tecnológica, se basa en la modificación de triglicéridos de manera controlada sin generar subproductos nocivos. Sin embargo, existe una carencia de estudios sistemáticos sobre su aplicación a mezclas específicas de aceites.

Este proyecto explora la producción mejorada de una manteca vegetal mediante interesterificación enzimática, utilizando una mezcla de aceite de palma y oliva para la industria panificadora. Se estudiarán las variables de reacción y las características fisicoquímicas del producto final. También se considerará la norma NTE INEN 34 de Ecuador, asegurando que la manteca vegetal cumpla con los estándares de calidad y seguridad alimentaria requeridos.

## **1.2 Descripción del Problema**

En la industria panificadora, la calidad y funcionalidad de las grasas utilizadas en la elaboración de productos son de suma importancia. Tradicionalmente, se han utilizado grasas saturadas de origen animal, como la manteca de cerdo. Sin embargo, debido a preocupaciones de salud y demandas del mercado, existe una creciente necesidad de desarrollar mantecas vegetales que puedan sustituir eficazmente a estas grasas saturadas, contribuyendo así a la prevención de enfermedades (Cabezas-Zábala et al., 2016).

Actualmente, muchas de las grasas vegetales empleadas en la industria panificadora se obtienen mediante procesos químicos, como la hidrogenación parcial, que producen ácidos grasos trans. Estos ácidos grasos trans son subproductos no deseados, los cuales han demostrado que incrementan el riesgo de enfermedades cardiovasculares al elevar los niveles de colesterol LDL (lipoproteína de baja densidad) y disminuyen los niveles de colesterol HDL (lipoproteína de alta densidad). Cabe mencionar que la Organización Mundial de la Salud [OMS] (2024) afirma que “Las grasas trans obstruyen las arterias y aumentan el riesgo de infarto de miocardio y muerte”. Además, otros procesos químicos pueden generar contaminantes como el 3-monocloropropano1,2-diol (3-MCPD) y ésteres glicídicos, que también representan riesgos para la salud.

Abordar esta problemática es esencial para el desarrollo de alternativas más saludables y sostenibles en la industria panificadora. La investigación propuesta tiene como objetivo identificar las condiciones óptimas para la interesterificación enzimática de una mezcla de aceites de palma y oliva, facilitando así la producción de una manteca vegetal con propiedades específicas y adecuadas para su uso industrial. Esto contribuirá no solo a mejorar la calidad nutricional de los productos finales, y promover la salud pública al ofrecer una alternativa con un perfil de ácidos grasos más saludable, sino también a fomentar la sostenibilidad ambiental mediante la reducción de la dependencia de grasas saturadas de origen animal.

El proyecto de diseño del proceso de interesterificación enzimática para la estructuración de lípidos de palma y oliva enfrenta diversas restricciones y consideraciones cruciales para su éxito y sostenibilidad. En términos de salud pública según la Agencia Nacional de Regulación (2024), la seguridad del producto final es de suma importancia, debiendo cumplir con las normativas sanitarias y estándares de calidad alimentaria para evitar el uso de aditivos perjudiciales o compuestos nocivos. Entre las restricciones comunes que

emergen durante el desarrollo del proyecto se encuentran la disponibilidad y los elevados costos de las enzimas, lo cual, sumado a las dificultades para obtener enzimas de alta pureza y al riesgo de contaminación cruzada en procesos continuos (Rohm et al., 2018), puede afectar significativamente la viabilidad económica del mismo.

Asimismo, el acceso a materias primas esenciales, como los lípidos de palma y oliva, y la disponibilidad de otros insumos necesarios, pueden constituir restricciones importantes, especialmente frente a fluctuaciones en el mercado o problemas de suministro. La capacidad de las instalaciones existentes, así como la disponibilidad de personal capacitado y equipos adecuados, también pueden limitar el alcance y la escala del proyecto.

Finalmente, garantizar la aceptación del producto por parte de los consumidores, teniendo en cuenta la adaptación a preferencias culturales, es un desafío crucial que puede impactar en la comercialización y el éxito del proyecto (Topolska et al., 2021). La calidad sensorial percibida por el consumidor es un factor determinante en la aceptación de nuevos alimentos (Osorio-Oviedo, 2019). Considerar estas limitaciones es esencial al planificar y ejecutar el proyecto para asegurar su éxito a largo plazo.

### **1.3 Justificación**

Las industrias de alimentos en Ecuador requieren mantecas vegetales de alta calidad. Una forma innovadora de producir estas mantecas es utilizando aceites vegetales y procesos enzimáticos. Al combinar aceite de palma, cuyo cultivo abarca actualmente 3795 hectáreas, con aceite de oliva, una fuente rica en antioxidantes y polifenoles, se puede aplicar el proceso de interesterificación enzimática. Este método modifica las propiedades físicas y químicas de los aceites mediante una enzima inmovilizada, produciendo así una manteca vegetal adecuada para la industria (Santana & Luisana, 2020).

La interesterificación enzimática mejora las propiedades funcionales de la manteca vegetal y puede contribuir a una producción más sostenible y económica. Comparada con el proceso químico tradicional, esta técnica reduce el número de etapas requeridas.

En el proceso químico, se realizan seis etapas: secado, reacción, enfriamiento, enjuague, secado y desodorización. Sin embargo, la interesterificación enzimática simplifica el proceso a solo tres etapas: secado, reacción y desodorización (Volpato, 2004). Este enfoque más eficiente reduce el tiempo y los recursos necesarios para la producción. Además, la interesterificación enzimática es más respetuosa con el medio ambiente y requiere menos energía al operar a temperaturas más bajas.

Desarrollar una manteca vegetal saludable y sostenible puede aumentar la competitividad de la industria panificadora ecuatoriana a nivel global, lo que potencialmente impulsará la producción y generará empleo local. Además, al ajustarse a las preferencias dietéticas de los consumidores ecuatorianos, el proyecto promoverá hábitos alimentarios más saludables en la población.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Evaluar el desempeño de un proceso de interesterificación enzimática mediante la metodología experimental para la propuesta del diseño conceptual de producción de manteca vegetal apta en el uso de la industria panificadora.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- 1) Analizar las condiciones óptimas para el proceso de interesterificación enzimática de lípidos de palma y oliva en el laboratorio, para la obtención de un producto final de alta calidad.
- 2) Elaborar un producto a partir del material final del proceso de interesterificación enzimática para la determinación de sus propiedades físico-químicas que asegure la calidad del producto.
- 3) Diseñar conceptualmente el conjunto de equipos necesarios para la interesterificación enzimática a nivel industrial, partiendo del proceso a escala de laboratorio.

## **1.5 Marco teórico**

### ***1.5.1 Industria para la elaboración de mantecas vegetales***

Las grasas empleadas en la elaboración de margarinas y mantecas vegetales se modifican mediante diferentes métodos. Algunos de estos procesos son la hidrogenación parcial, el fraccionamiento, y la interesterificación, ya sea química o catalizada por enzimas lipásicas (Zhang et al., 2000).

Los lípidos cumplen funciones trascendentales en la nutrición humana al proveer energía, compuestos nutricionales esenciales, además de aportar una textura y sabor característicos a los alimentos. Si bien el fraccionamiento y el mezclado físico ofrecen ciertas ventajas, también presentan algunas desventajas como elevados costos energéticos y de materias primas, cuestiones de inocuidad, aceptación por parte de los consumidores, recuperación de solventes y baja eficiencia en la separación. Además, estos métodos se basan en prueba y error, lo que dificulta alcanzar la cantidad apropiada de aceite (Manzoor et al., 2022).

Cabe destacar que mientras la margarina es una emulsión con un 80% de fase grasa y un 20% de agua, la manteca vegetal está compuesta íntegramente por lípidos sólidos a temperatura ambiente. El aceite de palma suele mezclarse con aceites más fluidos para lograr la consistencia deseada en este tipo de productos alimenticios semisólidos y viscoelásticos (Lee et al., 2012)

### ***1.5.2 Procesos tradicionales de modificación de grasas***

Históricamente, la industria alimentaria ha utilizado diversos métodos para modificar las propiedades físicas y químicas de las grasas, adaptándolas a las necesidades específicas de los productos. Estos métodos incluyen la hidrogenación parcial, la transesterificación química y otros procesos que, aunque efectivos, presentan varios inconvenientes para la salud y el medio ambiente.

### **1.5.3 Grasas Trans**

Los TFA o ácidos grasos trans son una variedad de ácidos grasos insaturados que se caracterizan por tener al menos un enlace doble con configuración trans en su estructura molecular, la fórmula general que representa a estos compuestos es  $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_x\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_y\text{-COOH}$ , donde x e y indican la cantidad de grupos metileno (-CH<sub>2</sub>-) presentes a cada lado del enlace doble trans (Wanders et al., 2010). A diferencia de los ácidos grasos cis insaturados que se encuentran de forma natural en los aceites vegetales, los (Nagpal et al., 2021) ácidos grasos trans se producen principalmente como resultado del proceso industrial de hidrogenación parcial de aceites vegetales líquidos. Durante este tratamiento, algunos de los enlaces dobles cis presentes originalmente en los ácidos grasos se isomerizan y adquieren una configuración trans (Organización Mundial de la salud, 2018). Esta modificación en la estructura molecular se realiza con el fin de aumentar la vida útil y el punto de fusión de las grasas, haciéndolas más resistentes a la oxidación. Sin embargo, la formación de ácidos grasos trans es un efecto no deseado de la hidrogenación parcial, ya que se ha comprobado que su consumo tiene un impacto negativo en la salud cardiovascular (Nagpal et al., 2021).

### **1.5.4 Interesterificado**

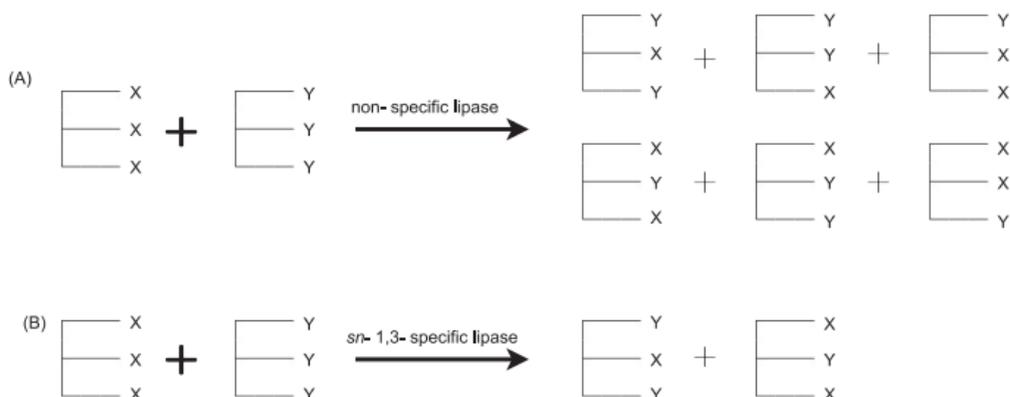
Este término general hace referencia a reacciones donde un compuesto formado por ácidos grasos esterificados en una molécula de glicerol reacciona con ácidos grasos, alcoholes o ésteres. La denominación específica dependerá del tipo de sustrato que reaccione con el triglicérido. La interesterificación propiamente dicha implica el intercambio de grupos acilos entre dos triglicéridos, resultando en la formación de nuevos triglicéridos con propiedades químicas y físicas distintas a los de partida (Palla & Carrín, 2014).

**1.5.4.1 Interesterificado químico.** El proceso comienza activando el catalizador, seguido del mecanismo de interesterificación. Se utilizan catalizadores inespecíficos que permiten realizar la reacción a bajas temperaturas, evitando así reacciones no deseadas como isomerización, polimerización y descomposición. Es importante mantener niveles muy bajos de humedad, ácidos grasos libres y peróxidos, ya que pueden disminuir el rendimiento del catalizador. Una vez finalizada la reacción, se añade agua y ácido diluido para retirar el catalizador, aunque esto causa una pérdida apreciable de grasa (Sosa Siverio, 2022.)

**1.5.4.2 Interesterificado enzimático.** La interesterificación enzimática emplea lipasas inmovilizadas de origen biológico como catalizadores, operando a temperaturas cercanas a 70°C. Es un proceso libre de tratamientos de blanqueo y eliminación de subproductos, sin generar color ni jabones. La enzima cataliza la reacción alterando las propiedades fisicoquímicas de la grasa (sustrato), iniciando con la unión sustrato-centros activos de la enzima. Luego se forma un complejo que, al transformar el sustrato inicial, da como resultado un producto con las características deseadas (Ojeda Romero & Valencia Ávila, 2022)

**Figura 1.1**

*Mecanismo de reacción de la interesterificación enzimática*



*Nota.* La figura muestra el mecanismo de reacción empleando una lipasa no específica y una lipasa sin- 1, 3 (Singh et al., 2022)

### 1.5.4.3 Comparación de los procesos de interesterificado.

**Tabla 1.1**

*Comparación de Procesos de Interesterificación*

Característica	Interesterificación enzimática	Interesterificación química
Catalizador	Biocatalizador (lipasas microbianas)	Catalizador químico (alquilatos de sodio, sodio metálico, mezclas de sodio/potasio, hidróxidos de sodio o potasio con glicerol)
Condiciones de reacción	Condiciones de procesamiento suaves	Condiciones de procesamiento severas

Tipo de reacción	Reacción aleatoria o estereoespecífica más específica que la interesterificación química	Reacción aleatoria que produce la randomización posicional de los grupos acilo en los TAG
Producción de subproductos	Baja	Alta
Control de la reacción	Las enzimas pueden ser fácilmente inactivadas para detener la reacción	El control es más difícil que con las enzimas
Recuperación del producto	Fácil	Difícil
Especificidad	No se produce grasa trans	No se produce grasa trans
Costo	El costo de las enzimas es elevado, pero puede reducirse si se utilizan enzimas inmovilizadas	Relativamente menor, aunque los altos requisitos de temperatura aumentan el costo
Desafío técnico	La actividad y estabilidad de las enzimas pueden afectarse por la temperatura, el pH y la presencia de metales pesados. Se requiere desodorización	Es necesaria la purificación posterior para eliminar subproductos (jabones), blanqueo y desodorización
Impacto ambiental	Amigable con el medio ambiente	No es amigable con el medio ambiente

*Nota.* Comparación de características de interesterificado. (Sivakanthan & Madhujith, 2020)

### **1.5.5 Normativas INEN**

En la industria alimentaria, la calidad y seguridad de los productos finales dependen en gran medida del cumplimiento de normativas específicas que regulan las propiedades y características de las materias primas utilizadas.

En Ecuador, el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) ha establecido una serie de normativas que garantizan la calidad de aceites y mantecas vegetales, esenciales para la producción de alimentos.

Estas normativas son fundamentales para el desarrollo de este proyecto, que busca mejorar las condiciones de producción de manteca vegetal mediante interesterificación enzimática, asegurando que el producto final no solo sea apto para la industria panificadora, sino también conforme a los altos estándares de calidad y seguridad alimentaria exigidos tanto a nivel nacional como internacional.

**1.5.5.1 Propiedades fisicoquímicas regidas por la norma NTE INEN 34.** La normativa NTE INEN 34 es aquella que rige los requisitos necesarios para comercializar una mezcla de aceites vegetales.

**Tabla 1.2**

*Resumen de Características de Calidad para Mezcla de Aceites Vegetales - NTE INEN 34*

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo
Acidez libre	%	-	0,2
Perdida de calentamiento	%	-	0,05
Índice de refracción a 25°C	-	1,454	1,476
Índice de peróxido	meqO <sub>2</sub> /kg	-	10
Hierro	mg/kg	-	1,5
Cobre	mg/kg	-	0,1

*Nota.* Requisitos de la normativa INEN 34: (Instituto Ecuatoriano de Normalización. 2016b).

**1.5.5.2 Propiedades fisicoquímicas regidas por la norma NTE INEN 1313.** En el 2016 se publicó la última actualización de la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1313 la cual proporciona los requisitos específicos que debe cumplir una manteca vegetal.

**Tabla 1.3**

*Resumen de Requisitos Fisicoquímicos en Mantecas - NTE INEN 1313*

Requisitos	Unidad	Min	Max
Grasa	%(m/m)	99,5	-
Perdida por calentamiento a 103°C	%(m/m)	-	0,2
Acidez libre	%	-	0,2
Punto de fusión	°C	20	42
Materia insaponificable	%	-	0,5
Impurezas insolubles	%	-	0,05
Contenido de jabón	%	-	0,005

*Nota.* Requisitos de la normativa INEN 1313 (Instituto Ecuatoriano de Normalización. 2016a).

## 2. Capítulo 2

## 2.1 Diseño metodológico

El estudio se basó en un enfoque metodológico que examinó las variables detalladas en la Tabla 2.1. El proceso de investigación se dividió en cuatro etapas principales, ilustradas en la Figura 2.1. La fase inicial comprendió la preparación y combinación de los aceites de palma y oliva en diversas proporciones. A continuación, se procedió con la incorporación de la enzima Lipozyme TL IM y la ejecución del proceso de interesterificación enzimática. La tercera fase se centró en la evaluación del aceite interesterificado resultante, incluyendo su filtración y batido. La etapa final abarcó la producción de la manteca vegetal y su subsecuente caracterización.

Complementando estos pasos, se llevaron a cabo análisis adicionales para asegurar la calidad del producto. Estos incluyeron la cromatografía de gases para determinar el perfil lipídico, la medición del punto de fusión, la evaluación de las propiedades organolépticas y la determinación del índice de refracción. Estas pruebas se realizaron para verificar que la manteca vegetal obtenida cumpliera con los estándares de calidad establecidos y las especificaciones requeridas para su uso previsto.

**Tabla 2.1**

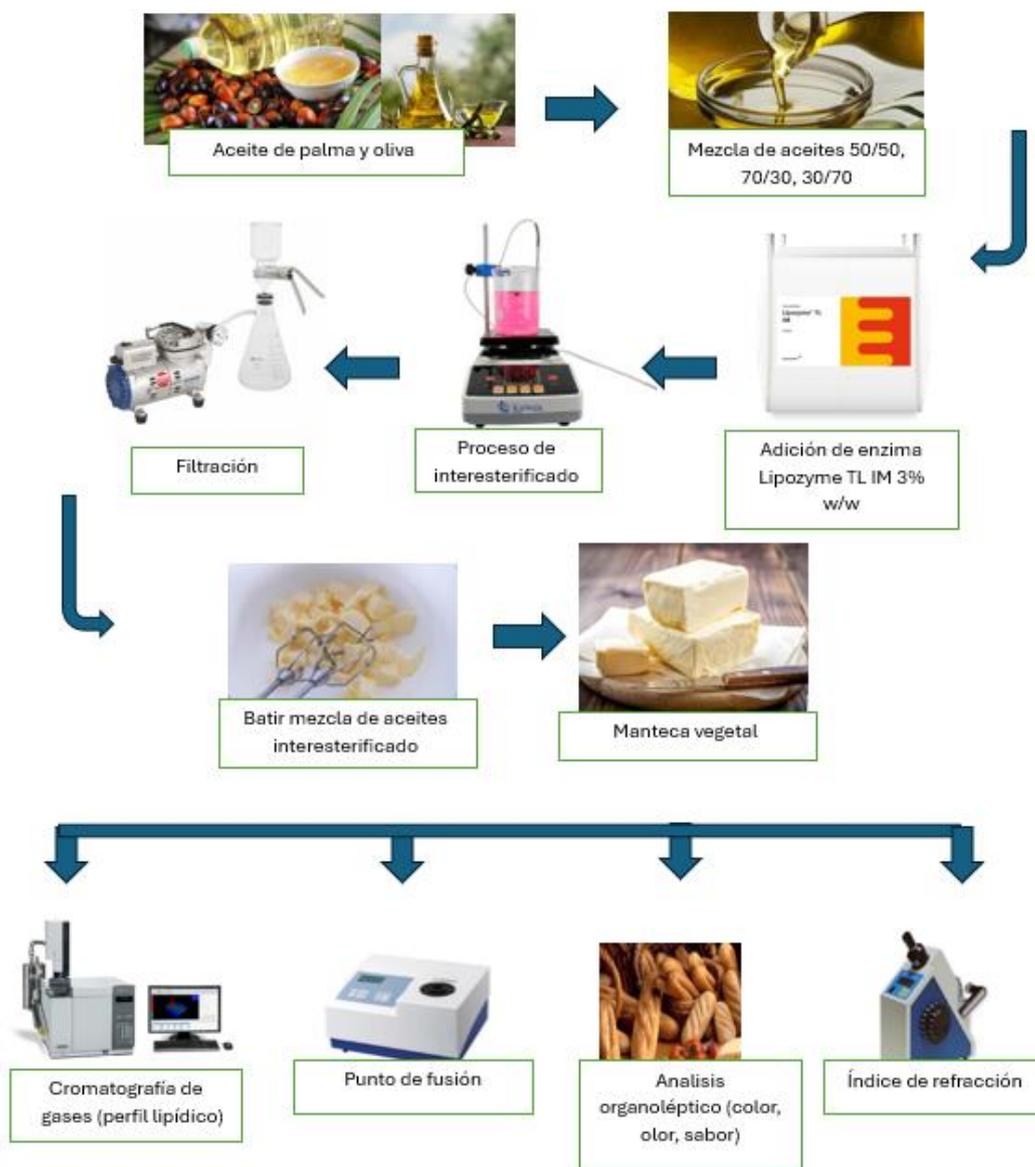
*Variables e Indicadores del Proceso*

<b>Variable</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Indicador</b>	<b>Instrumento de medición</b>
Tiempo de reacción	Duración del proceso	Horas (h)	Cronómetro
Velocidad de agitación	Velocidad de mezclado	Revoluciones por minuto (rpm)	Control mediante agitador magnético
Proporción de aceites	Relación entre aceite de palma y oliva	Proporción de volumen	Probeta

*Nota.* Variables en el proceso de interesterificación enzimática.

**Figura 2.1**

*Métodos*



*Nota.* Diagrama de flujo del proceso de producción de manteca vegetal mediante interesterificación enzimática, desde la mezcla de aceites de palma y oliva hasta los análisis finales del producto.

## **2.1 Materias Primas**

### **2.1.1 *Aceite de palma***

El producto se obtuvo del fruto de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Este aceite se utilizó en la industria alimentaria por sus propiedades fisicoquímicas únicas. Su composición rica en ácidos grasos saturados, principalmente ácido palmítico (44-45%), le confirió una consistencia semisólida a temperatura ambiente (fusión a 33-39°C). Además, contenía cantidades significativas de ácido oleico (39-40%) y pequeñas cantidades de ácidos linoleico y esteárico. Esta composición le otorgó una alta estabilidad oxidativa y térmica, haciéndolo resistente a la rancidez y adecuado para frituras a altas temperaturas (Rincón & Martínez, 2009).

### **2.1.2 *Aceite de oliva***

El aceite de oliva se extrajo del fruto del olivo (*Olea europaea*). Su composición se caracterizó por un alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados, principalmente ácido oleico (55-83%), junto con menores cantidades de ácidos grasos saturados y poliinsaturados. Las propiedades antioxidantes del aceite se debieron a la presencia de compuestos fenólicos (100-300 mg/kg), tocoferoles (100-300 mg/kg) y carotenoides, que le confirieron estabilidad oxidativa y beneficios para la salud (Jiménez, 2023).

## **2.2 Reactivos empleados durante el proceso de interesterificación enzimática**

### **2.2.1 *Enzima Lipozyme TL IM como catalizador***

En el proceso de interesterificación enzimática de aceites, se utilizó la enzima Lipozyme TL IM como catalizador. Esta enzima, relativamente nueva en el mercado, es una lipasa inmovilizada derivada del microorganismo *Thermomyces lanuginosus* (Simas et al., 2009). Su formulación granulada, apta para uso alimentario, se obtiene mediante un proceso de fermentación sumergida. La enzima está fijada en una matriz de gel de sílice, lo que mejora su estabilidad y facilita su manejo. Sus propiedades físicas incluyen una densidad

aproximada de 1.5 g/mL y partículas con diámetros que oscilan entre 0.3 y 1.0 mm, con un contenido de humedad del 5% en peso (Safra & Perea, 2009).

Lipozyme TL IM muestra su máxima eficacia en un rango térmico de 55 a 70°C. Para esta investigación se empleó una concentración de enzima del 3% en peso, con duraciones de reacción de 4 a 6 horas y una temperatura constante de 60°C. Una característica crucial de esta enzima es su capacidad para funcionar en sistemas continuos y discontinuos, gracias a su robustez mecánica en forma granular. No obstante, es fundamental utilizarla en un entorno no acuoso, ya que la exposición al agua puede comprometer la integridad de los gránulos (Safra & Perea, 2009).

Esta lipasa se clasifica como 1,3-específica, lo que significa que cataliza preferentemente el intercambio de ácidos grasos en las posiciones 1 y 3 de los triglicéridos. Esta especificidad permite modificar la estructura de los lípidos de manera controlada, preservando en gran medida el perfil de saturación original de los aceites mientras se logran las propiedades deseadas en el producto final (Simas et al., 2009)

### **2.3 Recolección de muestras**

Los criterios de selección para las materias primas principales, aceite de palma y aceite de oliva, incluyeron su disponibilidad comercial y representatividad en el mercado ecuatoriano. Se adquirieron en un supermercado local, asegurando que fueran productos de fácil acceso. Estos aceites se seleccionaron además por ser ampliamente utilizados en la industria alimentaria (Zapata, 2004), cumpliendo así con los criterios de relevancia industrial y accesibilidad.

Por otro lado, los criterios de selección para la enzima Lipozyme TL IM, utilizada como catalizador en el proceso de interesterificación, se centraron en la calidad y autenticidad del producto. Se obtuvo a través del proveedor especializado Cymitquímica. Esta empresa fue elegida por su reputación en el suministro de reactivos de alta calidad para investigación y

aplicaciones industriales. La adquisición de la enzima a través de este proveedor garantizó el cumplimiento de los criterios de calidad y autenticidad necesarios para el estudio.

#### 2.4 Activación de la enzima

Para asegurar la máxima eficiencia catalítica de la Lipozyme TL IM en el proceso de interesterificación enzimática, fue crucial realizar una activación previa de la enzima. Este procedimiento implicó pesar la cantidad exacta de Lipozyme TL IM que se utilizó en la reacción y fue sometido a un calentamiento controlado a 40 grados centígrados durante 30 minutos. Este calentamiento suave fue necesario para activar la enzima sin desnaturalizarla, ya que las lipasas, como la Lipozyme TL IM, alcanzaban su actividad óptima a temperaturas moderadas. La activación térmica a 40°C durante 30 minutos permitió que la enzima alcanzara un estado conformacional ideal para catalizar la interesterificación, garantizando así una interacción eficiente con los sustratos de aceite de palma y oliva (Oliveira et al., 2021)

#### Figura 2.2

*Balanza analítica*



*Nota.* Cantidad de enzima necesaria para realizar tres ensayos.

### Figura 2.3

#### *Estufa Memmert*



*Nota.* Se realizó a 40°C la activación de la enzima.

#### **2.5 Mezcla de materias primas**

La mezcla de las materias primas, aceites de palma y oliva, se realizó mediante agitación constante a 700 revoluciones por minuto (rpm) durante 10 minutos. Este proceso de agitación fue fundamental para asegurar que los dos aceites se mezclen de manera homogénea, lo cual es crucial para la posterior interesterificación enzimática.

La velocidad de agitación de 700 rpm fue seleccionada específicamente para proporcionar suficiente fuerza de cizallamiento que promovió una dispersión uniforme de los componentes, evitando la formación de fases separadas. Además, se estableció la duración de 10 minutos para que los componentes se mezclen sin inducir excesiva oxidación o degradación de los aceites, que podría afectar negativamente la calidad del producto final.

#### **Tabla 2.2**

##### *Volumen de Aceites en las Distintas Muestras*

<b>Mezcla</b>	<b>Aceite de palma</b>	<b>Aceite de oliva</b>
<b>1</b>	70 %	30 %
<b>2</b>	50 %	50 %
<b>3</b>	30 %	70 %

*Nota.* Mezclas volumétricas empleadas en los ensayos.

## **2.6 Caracterización fisicoquímica de la manteca vegetal**

Se realizó una serie de análisis fisicoquímicos para caracterizar la manteca vegetal obtenida tras el proceso de interesterificación enzimática. Estos análisis proporcionaron información crucial sobre las propiedades del producto final, permitiendo evaluar su calidad y comparar sus características con las de las materias primas originales y con los estándares de la industria.

### ***2.6.1 Índice de refracción***

Se determinó el índice de refracción de la manteca vegetal utilizando un refractómetro a una temperatura controlada de 23°C. Este parámetro se midió por triplicado para asegurar la precisión de los resultados. El índice de refracción proporciona información valiosa sobre la pureza y la composición de la manteca, siendo un indicador útil de posibles adulteraciones o cambios en la estructura molecular debido al proceso de interesterificación.

### ***2.6.2 Índice de Acidez***

El índice de acidez se determinó mediante titulación, siguiendo el método oficial de la AOCS (American Oil Chemists' Society) Ca-5a-40. Se disolvió una muestra pesada de la manteca en una mezcla de solventes y se tituló con una solución estandarizada de hidróxido de potasio, utilizando fenolftaleína como indicador. El índice de acidez es crucial para evaluar la calidad de la manteca, ya que indica la cantidad de ácidos grasos libres presentes, lo cual puede afectar la estabilidad y las propiedades organolépticas del producto.

### ***2.6.3 Perfil de ácidos grasos***

El perfil de ácidos grasos de la manteca vegetal se determinó mediante cromatografía de gases (CG) siguiendo el método oficial AOCS Ce 1h-05. Este método proporciona una caracterización cuantitativa precisa de los ácidos grasos presentes en la muestra, permitiendo evaluar los cambios en la composición lipídica resultantes del proceso de interesterificación enzimática.

Inicialmente, se prepararon los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) a partir de la muestra de manteca vegetal. El análisis se realizó en un cromatógrafo de gases equipado con un detector de ionización de llama (FID) y una columna capilar de sílice fundida (100 m x 0.25 mm de diámetro interno) recubierta con una película de 0.2  $\mu\text{m}$  de cianopropil polisiloxano.

La identificación de los ácidos grasos se realizó comparando los tiempos de retención con estándares certificados de FAME. La cuantificación se llevó a cabo mediante el método de normalización de áreas, expresando los resultados como porcentaje en peso del total de ácidos grasos identificados.

### **2.7 Acondicionamiento de las mezclas de aceite**

El acondicionamiento térmico de las mezclas de aceites se llevó a cabo mediante un proceso de calentamiento controlado. Las mezclas se sometieron a un incremento gradual de temperatura hasta alcanzar los 60°C, lo cual requirió aproximadamente 33 minutos. Una vez alcanzada esta temperatura objetivo, se mantuvo constante durante un período adicional de 5 minutos. Este intervalo de estabilización térmica fue crucial para mejorar las condiciones de reacción y garantizar la eficacia de la interesterificación enzimática subsiguiente. Se utilizó un termómetro de mercurio para monitorear y registrar la temperatura durante todo el proceso de acondicionamiento, permitiendo una medición precisa y confiable de la temperatura de la mezcla.

## Figura 2.4

*Acondicionamiento de una mezcla 70/30 en una plancha de calentamiento y agitación*



*Nota.* Sistema empleado para llevar a cabo la interesterificación enzimática.

### 2.8 Filtrado

Una vez completado el proceso de interesterificación enzimática, se procedió al filtrado del aceite resultante. Este paso fue esencial para eliminar cualquier partícula residual de la enzima Lipozyme TL IM y asegurar la pureza del producto final. El filtrado se realizó utilizando un filtro de papel de celulosa con porosidad de 0.45 micrómetros, adecuado para retener las partículas enzimáticas sin afectar la composición del aceite.

El aceite interesterificado se vertió lentamente sobre el filtro previamente montado en un embudo de Büchner, conectado a un sistema de vacío. Este sistema permitió una filtración rápida y eficiente, garantizando la remoción completa de las partículas sólidas. El proceso de filtrado se llevó a cabo a temperatura ambiente para evitar la alteración de las propiedades del aceite. Una vez finalizado, el aceite filtrado se almacenó en refrigeración para prevenir su oxidación.

**Figura 2.5**

*Textura de la enzima antes de realizar el filtrado al vacío*



*Nota.* La enzima presentó una apariencia gelatinosa antes de la filtración.

**Figura 2.6**

*Textura de la enzima después de realizar el filtrado al vacío*



*Nota.* La enzima cambió su apariencia a granulada después de la filtración.

**2.9 Análisis organoléptico del aceite interesterificado**

Se realizó un análisis organoléptico utilizando dos tipos de aceite de palma, A y B, mezclados con aceite de oliva, con el fin de seleccionar la mejor combinación en términos de olor, color y textura. Este análisis fue llevado a cabo en condiciones controladas de laboratorio y contó con la participación de 15 personas, quienes evaluaron las características perceptibles de los aceites resultantes del proceso de interesterificación enzimática.

### **2.9.1 Olor**

El olor del aceite interesterificado se evaluó colocando muestras en recipientes limpios e inodoros. Se describieron las notas olfativas percibidas, comparándolas con los olores característicos de los aceites de palma y oliva originales. Se registraron las impresiones sobre la intensidad y cualidad del aroma, notando cualquier cambio aparente en el perfil olfativo que pudiera haber resultado del proceso de interesterificación.

### **2.9.2 Color**

Para la evaluación del color, se colocaron muestras del aceite interesterificado en recipientes transparentes sobre una superficie blanca, bajo iluminación natural. Se describió la tonalidad, la intensidad y la uniformidad del color observado. Se realizaron comparaciones visuales con los aceites de partida para identificar cualquier cambio cromático producido por la interesterificación enzimática.

### **2.9.3 Textura**

La textura del aceite interesterificado se evaluó mediante observación y tacto. Se observó la fluidez del aceite a temperatura ambiente y su comportamiento al ser manipulado. Se registraron características sobre la viscosidad aparente, la presencia o ausencia de cristales visibles, y la sensación al tacto. Esta evaluación buscó identificar cambios en la estructura física del aceite resultantes del proceso de interesterificación, comparándola con las texturas de los aceites originales de palma y oliva.

## 2.10 Elaboración de la manteca vegetal

La elaboración de la manteca vegetal se llevó a cabo mediante un proceso de tres etapas: refrigeración, batido y almacenamiento. En primer lugar, la mezcla interesterificada se sometió a refrigeración hasta alcanzar su punto de solidificación. Después, se procedió al batido de la mezcla solidificada con un batidor eléctrico de la marca Oster. Este proceso de batido se continuó hasta observar un cambio de color significativo, pasando de su tonalidad original a un amarillo pálido, casi blanco, y alcanzando una textura cremosa característica.

Una vez obtenida la consistencia deseada, la manteca recién batida se sometió a un período adicional de refrigeración de 1 hora. Este paso fue crucial para estabilizar la estructura cristalina de la manteca. Finalmente, el producto se trasvasó a recipientes adecuados, se etiquetó con la información pertinente (fecha de elaboración, composición, etc.) y se almacenó en condiciones de refrigeración para mantener sus propiedades organolépticas y físicas. La temperatura de almacenamiento se mantuvo entre 3 y 4 °C para garantizar la estabilidad del producto final. Determinación de variables óptimas en el proceso de interesterificado enzimático.

La mejora de las variables del proceso de interesterificación enzimática es crucial para obtener una manteca vegetal de alta calidad que cumpla con los estándares de la industria alimentaria. Este estudio se centró en la determinación de las condiciones óptimas de reacción, considerando tres variables principales: la proporción de aceites (palma y oliva), el tiempo de reacción y la concentración de enzima.

Para determinar las condiciones adecuadas, se empleó un diseño experimental con un total de 12 experimentos. Las variables y sus niveles se establecieron de la siguiente manera:

- Proporción de aceites (palma: oliva): 30:70, 50:50, 70:30
- Tiempo de reacción: 4 y 6 horas
- Velocidad de agitación: 350 y 700 rpm

La elección de estos niveles se basó en estudios previos (Aktaş, 2019; Ojeda & Valencia, 2022;Oliveira et al., 2021) teniendo como objetivo evaluar cómo estas variables afectan el grado de interesterificación y las propiedades finales de la manteca vegetal. Los experimentos se realizaron manteniendo constantes otros parámetros como la temperatura (60°C) y la concentración de enzima (3% en peso), previamente establecidos en estudios preliminares (Aktaş, 2019; Ojeda & Valencia, 2022;Oliveira et al., 2021)

La evaluación de la eficacia de la interesterificación se realizó mediante la determinación del grado de interesterificación, utilizando cromatografía de gases para cuantificar los nuevos triglicéridos formados siguiendo el método oficial AOCS Ce 1h-05. Además, se evaluaron las propiedades físicas y químicas del producto final, incluyendo el punto de fusión, la textura y el perfil de ácidos grasos.

La optimización de estas variables no solo busca maximizar la eficiencia del proceso, sino también garantizar que la manteca vegetal resultante cumpla con los estándares de calidad establecidos, como un perfil de fusión adecuado y propiedades organolépticas deseables. Se prestó especial atención a cómo la proporción de aceites afecta el perfil lipídico final, cómo el tiempo de reacción influye en el grado de interesterificación, y cómo la velocidad de agitación impacta en la homogeneidad y eficiencia de la reacción.

### **2.11 Diagrama de bloque de proceso para diseño conceptual de la interesterificación enzimática**

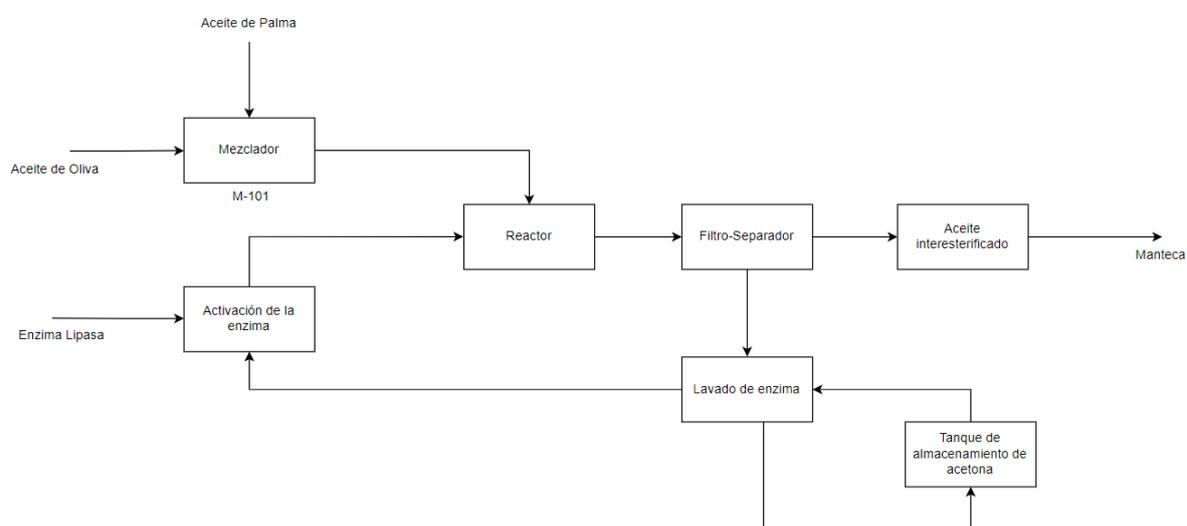
En esta sección se presenta el desarrollo de un diagrama de bloques de proceso (BFD) para el diseño conceptual del proceso de interesterificación enzimática de aceites vegetales. El BFD proporciona una representación visual de los pasos y equipos involucrados en el proceso, ofreciendo una visión clara del flujo de materiales y energía a través del sistema. Este diagrama es esencial para la planificación del proceso, ya que ayuda a entender la estructura general y las interacciones entre las diferentes etapas y equipos del sistema.

### 2.11.1 Diagrama de Bloques (BFD)

El BFD desarrollado en este proyecto abarca todas las etapas críticas del proceso de interesterificación enzimática, desde la recepción de las materias primas hasta la obtención del producto final. A continuación, se detallan las principales etapas y componentes incluidos en el BFD:

**Figura 2.7**

*Diagrama de bloques del proceso de interesterificación enzimática*



El diagrama de bloques ilustra el proceso de interesterificación enzimática de aceites vegetales, comenzando con la entrada de materias primas, como aceite de palma y aceite de oliva. Estos aceites se mezclan en una unidad de mezcla, donde se combinan en proporciones específicas para asegurar una homogeneidad adecuada. La mezcla homogénea se transfiere al reactor, donde se lleva a cabo la interesterificación enzimática. Este reactor está equipado con un sistema de agitación para mantener la mezcla uniforme y un sistema de calefacción para controlar la temperatura durante la reacción. Posteriormente, la mezcla reaccionada pasa por una unidad de separación y filtración, que elimina los residuos sólidos. La enzima se somete a un lavado con acetona y luego se recircula para ser reutilizada en el proceso. Finalmente, el producto interesterificado se dirige a la salida del sistema, preparado para su uso.

### ***2.11.2 Justificación del Diseño***

El diseño conceptual del proceso y la selección de equipos se basaron en la necesidad de asegurar la calidad y consistencia del producto final, así como la eficiencia del proceso. Se propuso utilizar un tanque para la activación de la lipasa Lipozyme TL IM, lo que permitiría un control preciso de la temperatura y la agitación, asegurando que la enzima alcance su actividad óptima. Esta precisión sería esencial para mantener las propiedades deseadas en la mezcla de aceites interesterificados, que se utilizarían en la producción de mantecas vegetales.

La lipasa Lipozyme TL IM fue seleccionada por su alta especificidad y capacidad para operar bajo condiciones suaves, lo que reduciría el impacto ambiental y mejoraría la seguridad del proceso. Al evitar el uso de condiciones extremas y catalizadores químicos tradicionales, el diseño promovería prácticas sostenibles en la industria alimentaria. Además, el proceso enzimático minimizaría la formación de subproductos no deseados, mejorando la calidad del producto final y cumpliendo con los estándares de seguridad alimentaria. Este enfoque no solo garantizaría la eficiencia del proceso, sino que también se alinearía con los objetivos de sostenibilidad y responsabilidad ambiental de la industria.

### **3. Capítulo 3**

### 3.1 Evaluación sensorial y selección del mejor aceite de palma para mezclas

**Tabla 3.1**

*Comparación Sensorial de Aceites de Palma A y B en Diferentes Proporciones*

<b>Muestra \ Evaluación</b>	<b>Proporción</b>	<b>Aroma (1-5)</b>	<b>Textura (1-5)</b>	<b>Color (1-5)</b>
Aceite de Palma A	70/30	4,1	4,5	3,9
	50/50	3,9	3,8	3,8
	30/70	3,5	3,5	3
Aceite de Palma B	70/30	4,7	4,8	4,7
	50/50	4,2	4	4,1
	30/70	4	3,8	3,5

*Nota.* Los valores en la tabla representan las puntuaciones promedio obtenidas en una escala de 1 a 5, donde 1 es el puntaje más bajo y 5 es el más alto. Se evaluaron tres características sensoriales: Aroma, Textura y Color, en tres proporciones diferentes de mezclas (70/30, 50/50, 30/70) para los aceites de palma A y B con aceite de oliva.

En la tabla 3.1 se observa la evaluación sensorial promedio donde compararon dos tipos de aceite de palma (Aceite de Palma A y Aceite de Palma B) en diferentes proporciones de mezcla con aceite de oliva (70/30, 50/50 y 30/70). Las mezclas fueron evaluadas en tres parámetros sensoriales: aroma, textura y color. Los evaluadores asignaron puntuaciones en una escala del 1 al 5, donde:

- Aroma: 1 indica un olor desagradable y 5 un olor agradable, similar al de las mantecas vegetales.
- Textura: 1 representa una textura menos parecida a la manteca, y 5 una textura muy similar.
- Color: 1 indica una tonalidad menos adecuada, y 5 una tonalidad más adecuada, similar a la manteca.

En general, las mezclas realizadas con el Aceite de Palma B obtuvieron mejores evaluaciones que aquellas con el Aceite de Palma A. En particular, la mezcla con proporción 70/30 del Aceite de Palma B fue la mejor valorada en los tres parámetros: aroma (4,7), textura (4,8) y color (4,7). Por lo tanto, se seleccionó el Aceite de Palma B como el aceite preferido para futuras mezclas, dado que obtuvo las calificaciones más altas y se aproximó más a las características sensoriales deseadas en todos los parámetros evaluados.

Cabe mencionar que estas evaluaciones se realizaron después de someter las mezclas a un proceso de interesterificación enzimática de 2 horas, con una agitación de aproximadamente 500 rpm, lo cual permitió realizar las pruebas sensoriales en condiciones controladas.

### 3.2 Resultados de los análisis fisicoquímicos

Con esta selección, el Aceite de Palma B fue sometido a un proceso de interesterificación enzimática, donde se la llevó cabo la reacción en condiciones controladas. Se evaluarán dos tiempos de reacción, de 4 y 6 horas, con el fin de observar el impacto del tiempo en las propiedades del aceite modificado. Además, se utilizarán velocidades de agitación de 350 y 700 rpm, lo que permitió estudiar cómo la intensidad de la mezcla afecta la eficiencia del proceso enzimático y la calidad del producto final.

#### 3.2.1 Índice de refracción

**Tabla 3.2**

*Índice de Refracción de la Mezcla Inicial de Aceites en Diferentes Proporciones.*

Proporción de mezcla	Mezcla inicial		
	r1	r2	Promedio
70/30	1,4667	1,4667	1,4667
30/70	1,4673	1,4673	1,4673
50/50	1,4671	1,4671	1,4671

*Nota.* La tabla presenta el índice de refracción de diferentes proporciones de mezcla de aceites (Palma/Oliva), medido a una temperatura de 26°C. Donde "r1" y "r2" corresponden a la primera y segunda medición de la misma muestra, con el promedio calculado entre ambas mediciones.

**Tabla 3.3**

*Índice de Refracción de la Mezcla de Aceites - 4 Horas de Interesterificación Enzimática.*

Proporción de mezcla	4H/350RPM			4H/700RPM		
	r1	r2	Promedio	r1	r2	Promedio
70/30	1,4666	1,4667	1,4667	1,4666	1,4665	1,4666
30/70	1,4667	1,4666	1,4667	1,4670	1,4670	1,4670
50/50	1,4669	1,4669	1,4669	1,4668	1,4667	1,4668

*Nota.* La tabla presenta el índice de refracción de diferentes proporciones de mezcla de aceites (Palma/Oliva), medido a una temperatura de 26°C. A condiciones de operación de 4 horas a 350 rpm y 700 rpm.

**Tabla 3.4**

*Índice de Refracción de la Mezcla de Aceites - 6 Horas de Interesterificación Enzimática.*

Proporción de mezcla	6H/350RPM			6H/700RPM		
	r1	r2	Promedio	r1	r2	Promedio
70/30	1,4673	1,4673	1,4673	1,4665	1,4665	1,4665
30/70	1,4669	1,4668	1,4669	1,4670	1,4669	1,4670
50/50	1,4670	1,4670	1,4670	1,4666	1,4666	1,4666

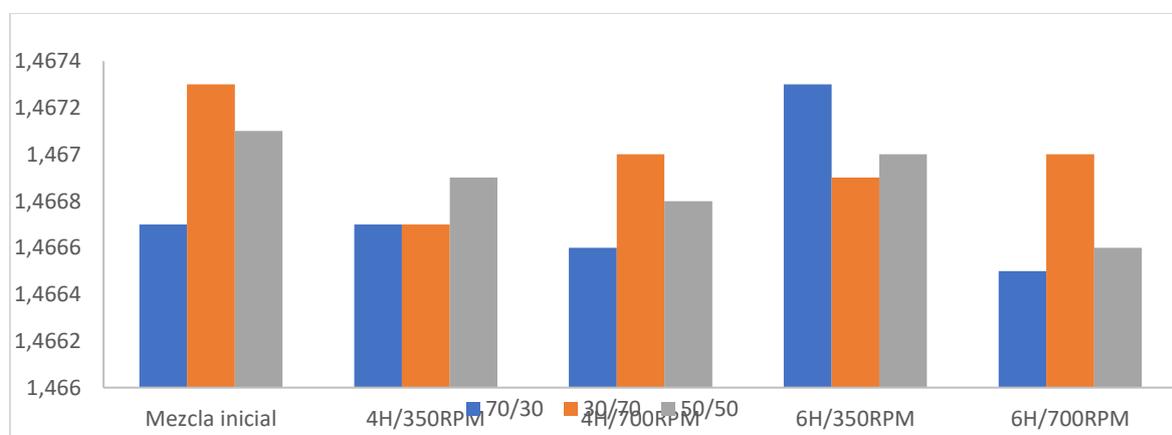
*Nota.* La tabla presenta el índice de refracción de diferentes proporciones de mezcla de aceites. (Palma/Oliva), medido a una temperatura de 26°C. A condiciones de operación de 6 horas a 350 rpm y 700 rpm.

El análisis integral de las tres tablas presentadas revela hallazgos importantes sobre el comportamiento del índice de refracción durante el proceso de interesterificación enzimática de mezclas de aceites de palma y oliva.

En primer lugar, se observa una notable consistencia y reproducibilidad en los valores del índice de refracción, tanto en las mediciones iniciales de las mezclas (tabla 3.2) como a lo largo del proceso de reacción (tablas 3.3 y 3.4). Los índices se mantienen prácticamente constantes entre las diversas proporciones de mezcla (70:30, 30:70 y 50:50) y entre las diferentes condiciones de operación analizadas (4H/350RPM, 4H/700RPM, 6H/350RPM y 6H/700RPM). Esta estabilidad del índice de refracción sugiere una alta calidad y control en la preparación de las materias primas, así como una robustez del proceso frente a variaciones en los parámetros de operación.

**Figura 3.1**

*Índice de Refracción de Mezclas de Aceites de Palma y Oliva Bajo Diferentes Condiciones*



*Nota.* Este gráfico muestra la variación del índice de refracción en diferentes mezclas de aceites de palma y sometidas a distintas condiciones de interesterificación enzimática.

Además, la uniformidad del índice de refracción entre las distintas formulaciones de mezcla demuestra la versatilidad de la planta de interesterificación enzimática. Esto indica que el proceso es capaz de adaptarse a diferentes composiciones de aceites sin comprometer la calidad y eficiencia de la reacción, lo cual brinda flexibilidad y oportunidades de optimización en la formulación de los productos finales.

En conjunto, estos hallazgos respaldan la solidez y confiabilidad del proceso de interesterificación enzimática implementado en esta planta. El control y estabilidad del índice de refracción, tanto en la preparación de las materias primas como durante la reacción, son señales positivas que contribuyen a la viabilidad y competitividad de esta operación de modificación de lípidos.

### 3.2.2 Índice de acidez

**Tabla 3.5**

*Índice de Ácidez en Diferentes Proporciones de Mezcla y Condiciones de Agitación durante la Interesterificación Enzimática.*

Proporción de mezcla	Mezcla inicial	4H/350RPM	4H/700RPM	6H/350RPM	6H/700RPM
70/30	0,38	4,30	8,61	5,57	8,22
30/70	0,56	4,02	7,54	9,74	8,54
50/50	0,47	6,55	11,08	6,08	9,15

*Nota.* La tabla muestra el índice de acidez obtenido en diferentes proporciones de mezcla de aceites (Palma/Oliva) después de la interesterificación enzimática bajo diferentes condiciones de tiempo y velocidad de agitación (4 horas y 6 horas a 350 RPM y 700 RPM).

En la tabla presentada se observa que las proporciones de mezcla inicial de 70/30, 30/70 y 50/50 presentan un índice de acidez inicial bajo, con valores de 0,38, 0,56 y 0,47 respectivamente, antes de ser sometidas al proceso.

Tras la interesterificación enzimática, se evidencia un aumento general en el índice de acidez en todas las proporciones de mezcla y bajo todas las condiciones evaluadas. Particularmente, la combinación de 50/50 muestra el mayor incremento en acidez, alcanzando un valor máximo de 11,08 bajo las condiciones de 4 horas y 700 RPM. Este resultado sugiere una mayor reacción de interesterificación en esta proporción, posiblemente debido a la mayor interacción entre los triglicéridos de ambos aceites.

Además, se puede notar que la velocidad de agitación tiene un impacto considerable en el índice de acidez, siendo más pronunciado el aumento bajo las condiciones de 700 RPM en comparación con 350 RPM, independientemente del tiempo de reacción. Esto indica que una mayor agitación favorece la reacción enzimática, lo que a su vez incrementa el índice de acidez final, reflejando un mayor grado de modificación de los ácidos grasos en la mezcla.

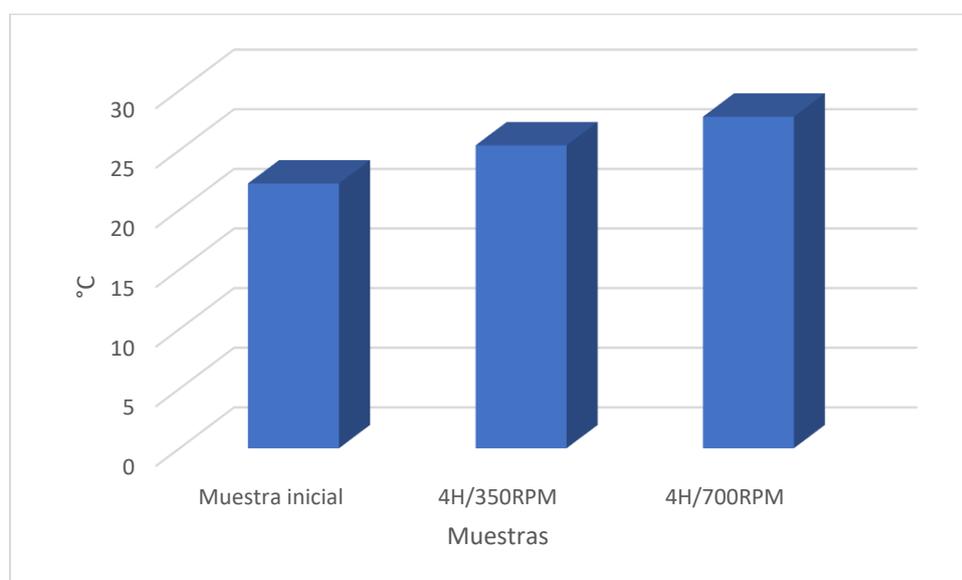
La tabla muestra que, entre las diferentes condiciones evaluadas, las mezclas con una proporción inicial de 70/30 (Palma/Oliva) sometidas a 700 RPM y 350 RPM durante 4 horas presentan resultados significativos en términos del índice de acidez. En específico, la mezcla tratada a 700 RPM por 4 horas alcanza un índice de acidez de 8,61, mientras que la misma mezcla a 350 RPM por 4 horas presenta un índice de acidez de 4,30. Estos valores, aunque diferentes, demuestran un nivel adecuado de modificación de los ácidos grasos, lo que sugiere un balance favorable entre la reacción enzimática y la estabilidad del producto final.

Se justifica la elección de estas condiciones como las mejores mezclas debido a que el índice de acidez obtenido bajo estas circunstancias es lo suficientemente alto como para indicar una reacción enzimática efectiva, pero no excesivamente elevado, lo que podría comprometer la calidad del producto final.

### 3.2.3 Punto de fusión

**Figura 3.2**

*Punto de Fusión de la Misma Mezcla de Aceites Bajo Diferentes Condiciones*



*Nota.* Este gráfico muestra la variación del punto de fusión de una mezcla en la misma proporción de aceites de palma y oliva antes y después de ser sometida a diferentes condiciones de interesterificación enzimática.

El gráfico presentado muestra la evolución del punto de fusión de una muestra inicial en comparación con las condiciones de interesterificación enzimática a 350 RPM y 700 RPM durante 4 horas. Se observa que el punto de fusión de la muestra inicial es inferior en comparación con las muestras sometidas a los procesos de agitación. Específicamente, el punto de fusión de la muestra inicial ronda los 26°C, mientras que las muestras tratadas a 350 RPM y 700 RPM alcanzan puntos de fusión más elevados, aproximadamente 28°C y 30°C, respectivamente.

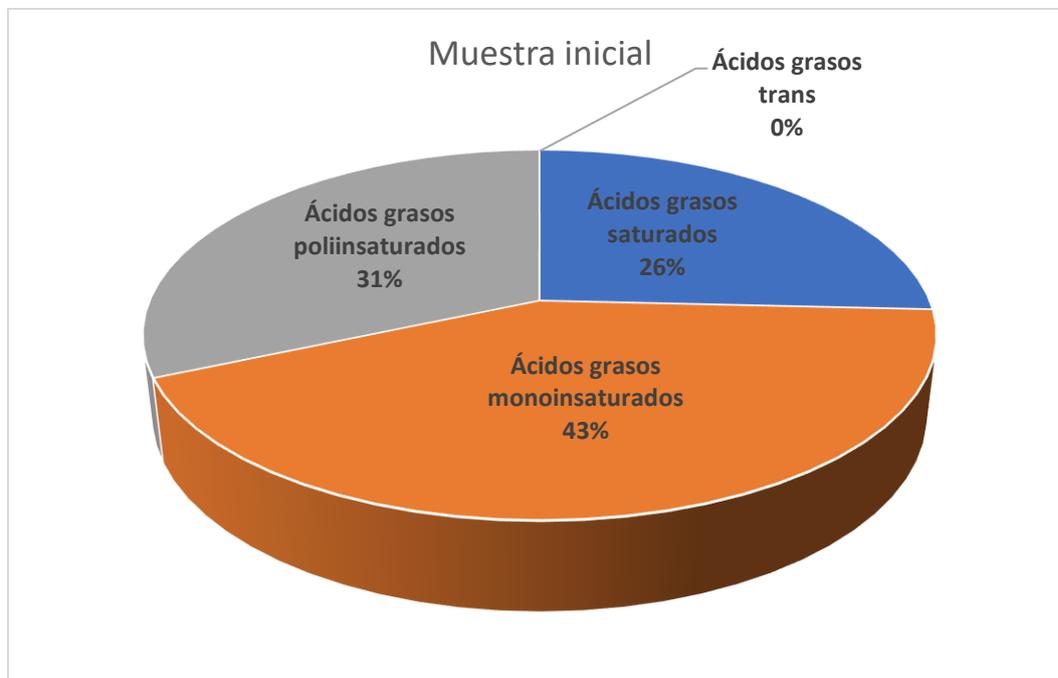
Este aumento en el punto de fusión tras el proceso de interesterificación indica un cambio en la estructura de los triglicéridos presentes en la mezcla. A medida que la velocidad de agitación aumenta de 350 RPM a 700 RPM, también lo hace el punto de fusión, lo que sugiere que una mayor agitación favorece la formación de triglicéridos con cadenas de ácidos grasos más saturadas o con mayor grado de ordenamiento molecular. Este comportamiento es coherente con una mayor reorganización de las moléculas de grasa bajo condiciones de agitación más intensas, resultando en un producto con mayor estabilidad térmica.

El aumento del punto de fusión es un indicador clave en la calidad del producto final, ya que determina la funcionalidad y aplicación potencial del aceite modificado en productos alimenticios que requieren ciertas características de solidez a temperatura ambiente. Las condiciones de 700 RPM durante 4 horas parecen ser las más efectivas para aumentar el punto de fusión, lo que podría ser beneficioso para aplicaciones donde se necesite un aceite con mayor resistencia al calor o donde se busque una textura más firme en el producto final.

### 3.2.4 Perfil lipídico de la manteca obtenida

**Figura 3.3**

*Distribución de Ácidos Grasos en la Muestra Inicial*



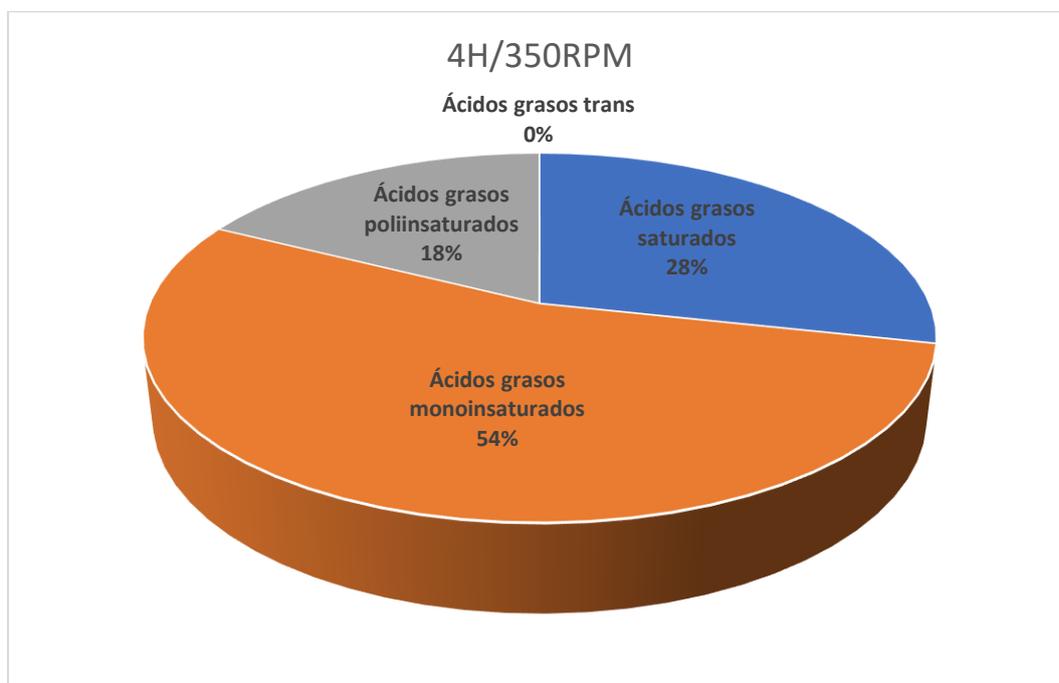
*Nota.* El gráfico muestra la composición de ácidos grasos de la muestra inicial

El gráfico de la "Muestra inicial" presenta la distribución de los diferentes tipos de ácidos grasos en la mezcla de aceites antes de someterse al proceso de interesterificación enzimática. La composición muestra un predominio de ácidos grasos monoinsaturados (43%) y poliinsaturados (31%), mientras que los ácidos grasos saturados representan una menor proporción (26%). Esta distribución es típica en mezclas de aceites vegetales, como los de palma y oliva, que suelen emplearse como materias primas en procesos de modificación de lípidos debido a sus propiedades nutricionales y funcionales.

La alta proporción de ácidos grasos monoinsaturados en la muestra inicial es beneficiosa desde el punto de vista nutricional, ya que estos ácidos grasos están asociados con efectos positivos en la salud cardiovascular. Por otro lado, la presencia de ácidos grasos poliinsaturados, aunque en menor cantidad, también es relevante, dado su papel esencial en la dieta y sus propiedades antioxidantes. Sin embargo, la relativamente baja proporción de ácidos grasos saturados indica que la mezcla inicial podría tener un punto de fusión más bajo y, por ende, una textura más blanda, lo cual puede ser menos deseable para ciertas aplicaciones alimentarias que requieren productos más sólidos o con mayor estabilidad a temperatura ambiente.

**Figura 3.4**

*Distribución de Ácidos Grasos en la Muestra de 4H/350 rpm*



*Nota.* El gráfico muestra la composición de ácidos grasos de la muestra sometida a 4h/350rpm

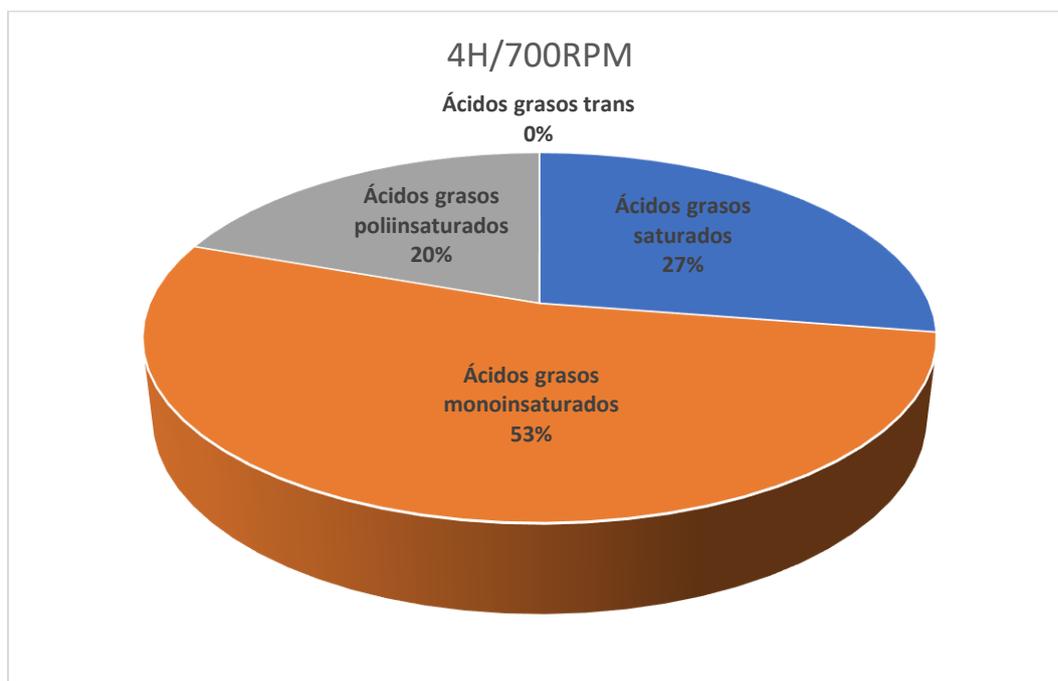
En las condiciones de operación de 4H/350RPM, se observa un cambio notable en la composición de los ácidos grasos de la mezcla tratada. Específicamente, los ácidos grasos monoinsaturados aumentan su participación al 54%, mientras que los ácidos grasos poliinsaturados disminuyen al 18%. Este cambio en la composición sugiere que el proceso de interesterificación enzimática bajo estas condiciones está favoreciendo la reordenación de las cadenas de ácidos grasos de manera que se promueve la formación de triglicéridos con un mayor contenido de ácidos grasos monoinsaturados.

Este comportamiento puede atribuirse a la especificidad enzimática y a las condiciones de reacción, como la velocidad de agitación y la duración del proceso. En un entorno de menor agitación, como es el caso de 350 RPM, la enzima utilizada en la interesterificación parece tener una preferencia por la redistribución de los ácidos grasos monoinsaturados, lo que podría deberse a la menor energía cinética disponible en el sistema, favoreciendo reacciones menos agresivas, pero más selectivas. La disminución en los ácidos grasos poliinsaturados podría ser consecuencia de su conversión en monoinsaturados o de su desplazamiento en la mezcla en favor de la formación de triglicéridos más estables y menos susceptibles a la oxidación, lo que es típico de los ácidos grasos monoinsaturados.

Este cambio en la composición de ácidos grasos tiene importantes implicaciones para las propiedades funcionales y nutricionales del aceite resultante. Un mayor contenido de ácidos grasos monoinsaturados es generalmente deseable, ya que estos compuestos son más estables frente a la oxidación y tienen beneficios conocidos para la salud cardiovascular. Al mismo tiempo, la reducción en ácidos grasos poliinsaturados podría reducir la susceptibilidad del aceite a la rancidez, mejorando su vida útil. En conjunto, estos resultados sugieren que las condiciones de operación de 4H/350RPM no solo optimizan la estabilidad del producto final, sino que también pueden mejorar su perfil nutricional, haciendo que el aceite sea más adecuado para aplicaciones en la industria alimentaria que requieren estabilidad y un perfil graso saludable.

### Figura 3.5

*Distribución de Ácidos Grasos en la Muestra de 4H/700 rpm*



*Nota.* El gráfico muestra la composición de ácidos grasos de la muestra sometida a 4h/700rpm

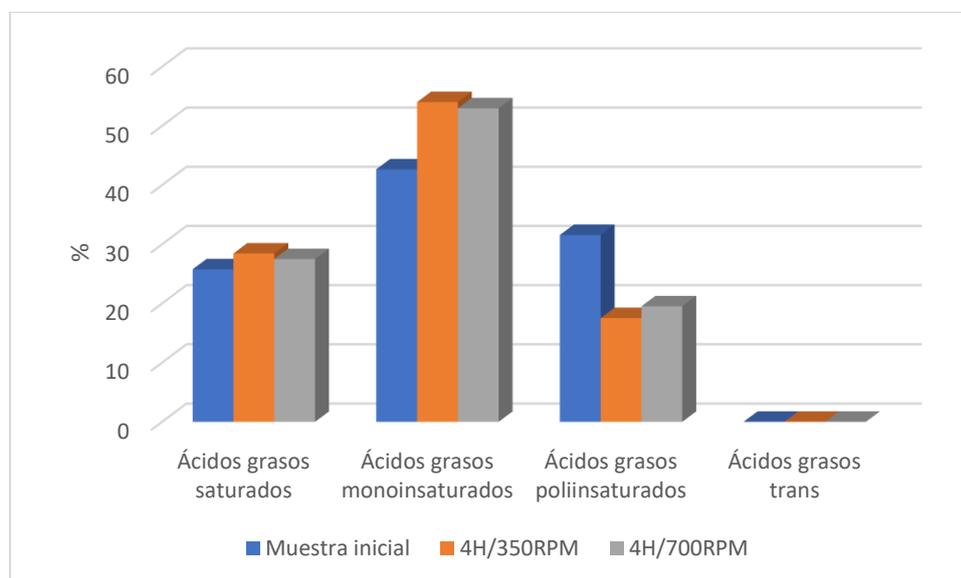
El gráfico correspondiente a las condiciones de 4H/700RPM muestra un patrón similar al observado en 4H/350RPM, con un aumento significativo en la proporción de ácidos grasos monoinsaturados, alcanzando el 53%, y una reducción en los ácidos grasos poliinsaturados, que descienden al 20%. Esta consistencia en los resultados a diferentes velocidades de agitación sugiere que el proceso de interesterificación enzimática es robusto y

eficaz en la modificación de la composición de ácidos grasos, independientemente de las variaciones en la intensidad de la agitación.

El aumento en la proporción de ácidos grasos monoinsaturados es un resultado deseable en muchas aplicaciones alimentarias y nutricionales, dado que estos ácidos grasos son reconocidos por su estabilidad térmica y sus beneficios para la salud cardiovascular. La capacidad del proceso de mantener una alta eficiencia en la conversión de ácidos grasos poliinsaturados a monoinsaturados, incluso bajo diferentes condiciones de agitación, resalta la flexibilidad y la eficacia del enfoque enzimático utilizado.

**Figura 3.6**

*Porcentaje de Ácidos Grasos de Tres Muestras*



*Nota.* El gráfico muestra la composición de ácidos grasos de las tres muestras

### 3.3 Evaluación de la manteca en la industria panadera

#### 3.3.1 Selección de la mejor mezcla

El proceso de selección de la mejor mezcla para la interesterificación enzimática comenzó con la evaluación de tres proporciones diferentes de aceites: 70/30, 50/50 y 30/70 (palma/oliva). Se utilizaron dos aceites de palma distintos, y la evaluación sensorial de estas mezclas se centró en el olor, la textura y el color. Esta evaluación se llevó a cabo con la participación de 15 personas, quienes calificaron cada característica en una escala del 1 al 5, donde 1 representaba una característica poco deseable y 5 la más deseable para una manteca de alta calidad.

De este análisis sensorial de las distintas proporciones de palma/oliva, el aceite de palma B combinado con aceite de oliva obtuvo la mayor aceptación en términos de olor, textura y color. En comparación con el otro aceite de palma, las mezclas que contenían el aceite de palma B recibieron mejores puntuaciones, lo que permitió seleccionarlo para las siguientes pruebas. Este paso aseguró que la base de las mezclas tuviera una buena aceptación sensorial desde el inicio del proceso.

Posteriormente, se realizaron pruebas adicionales utilizando el aceite de palma B combinado con aceite de oliva en las tres proporciones mencionadas. El enfoque se centró en la evaluación del índice de refracción y el índice de acidez, ya que ambos son parámetros críticos en mezclas de aceites.

Al analizar las muestras, se observó que no hubo diferencias significativas en el índice de refracción entre las distintas proporciones. Sin embargo, el índice de acidez mostró una variación medianamente significativa según la proporción y las condiciones de reacción. En particular, se observó que el índice de acidez aumentó con el tiempo de reacción y con la velocidad de agitación en todas las proporciones evaluadas.

Con base en estos resultados, se decidió utilizar un tiempo de reacción de 4 horas para las siguientes pruebas a velocidades de 350 y 700 rpm. Esta decisión se tomó porque el índice de refracción no mostró variaciones significativas, lo que permitió mejorar el proceso y reducir los costos operativos al acortar el tiempo de reacción. Además, el índice de acidez mostró valores más bajos a las 4 horas en comparación con las pruebas realizadas a 6 horas, lo que reforzó la decisión de mantener el tiempo de reacción en 4 horas.

Por ende, la proporción 70/30 (palma/oliva) fue seleccionada debido a que también presentó una mejor evaluación sensorial general. En esta etapa, se compararon las mezclas interesterificadas y no interesterificadas. Se observó que la mezcla interesterificada a 4 horas y 700 rpm presentó un punto de fusión más alto que las otras muestras, lo cual es ideal para la elaboración de manteca, ya que se requiere una consistencia más sólida a temperatura ambiente. Un punto de fusión más alto es favorable porque asegura que la manteca mantenga su estructura sólida, necesaria para su manipulación y uso en productos alimentarios.

El perfil lipídico es un factor crucial en la evaluación de la calidad y funcionalidad de las mezclas de aceite de palma y aceite de oliva. En las pruebas realizadas, la mezcla de 4 horas a 700 rpm presentó un perfil lipídico favorable con un 53% de ácidos grasos monoinsaturados, 27% de ácidos grasos saturados, 20% de ácidos grasos poliinsaturados y 0% de ácidos grasos trans. Esta mezcla se destaca frente a la de 4 horas a 350 rpm, que mostró un 54% de ácidos grasos monoinsaturados, 28% de ácidos grasos saturados, 18% de

ácidos grasos poliinsaturados y también 0% de ácidos grasos trans. Aunque la mezcla a 700 rpm tiene una proporción ligeramente menor de ácidos grasos monoinsaturados, su combinación equilibrada y la ausencia de ácidos grasos trans proporcionan una estabilidad óptima y una buena funcionalidad para el producto final.

Los ácidos grasos monoinsaturados son beneficiosos para la salud cardiovascular y la estabilidad oxidativa del producto. Los ácidos grasos saturados contribuyen a la estructura y consistencia, esenciales en la producción de mantecas. Los ácidos grasos poliinsaturados aportan beneficios nutricionales sin comprometer la estabilidad del producto. La ausencia de ácidos grasos trans mejora el perfil nutricional y cumple con normativas alimentarias. La mezcla de 4 horas a 700 rpm ofrece una combinación equilibrada que asegura tanto una alta calidad del producto final como beneficios adicionales para la salud y durabilidad, convirtiéndola en la opción preferida para la producción de manteca.

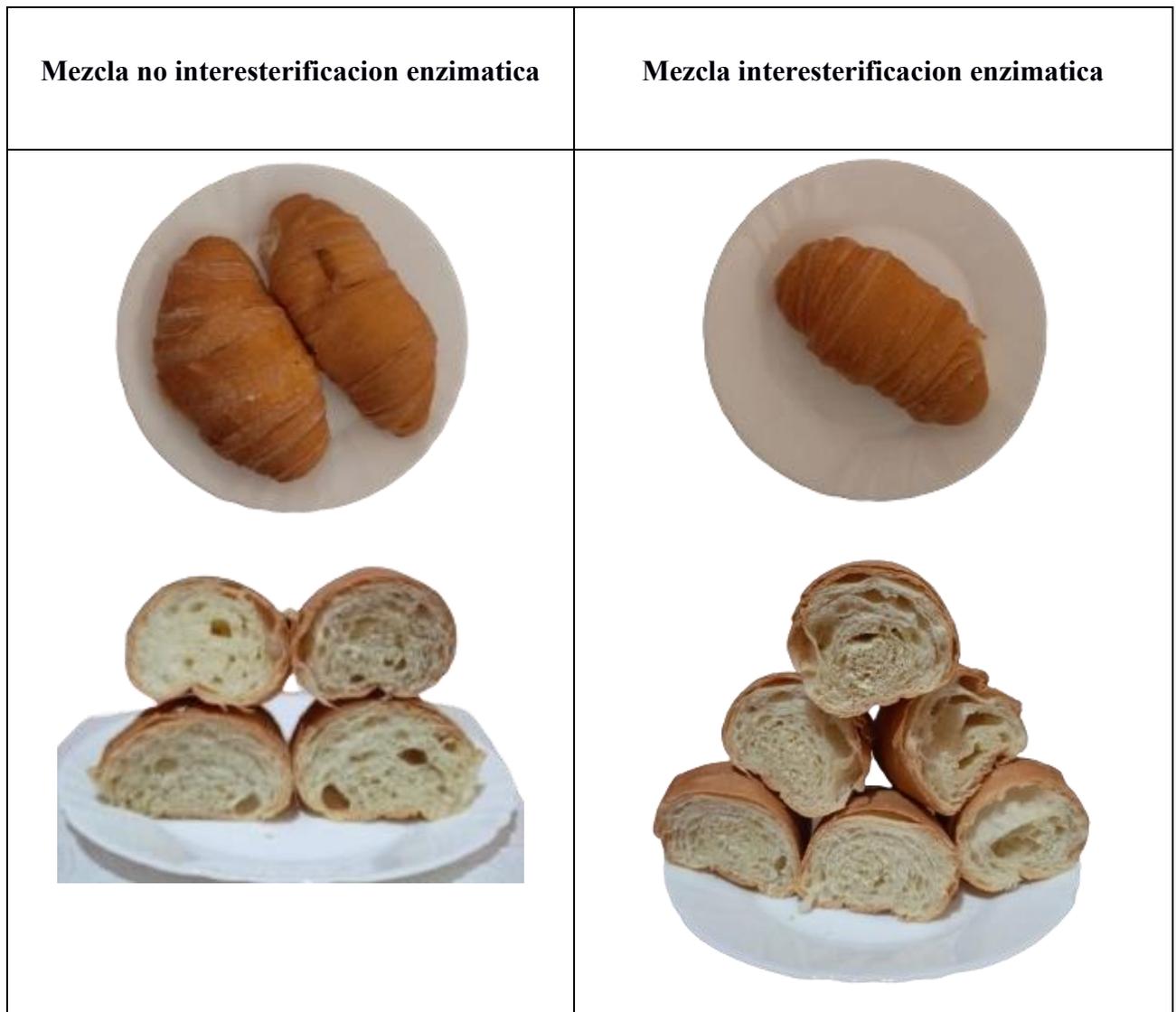
### ***3.3.1 Elaboración de pan con la manteca***

En cuestión de masa para pan con manteca producida por Interesterificación Enzimática, se utilizó la manteca obtenida después de someter las mezclas de aceites al proceso de interés. Las muestras serán preparadas siguiendo un protocolo estándar de panificación, observando y midiendo características como la textura, el volumen, la esponjosidad y el sabor del pan resultante. Esta evaluación determina si el proceso enzimático mejora el comportamiento de la manteca en la formulación del pan.

Por otro lado, la masa para pan con manteca sin proceso de Interesterificación Enzimática, en paralelo, se prepara pan utilizando manteca que no ha sido sometida a interesterificación enzimática. Esto cumple la función como control para comparar las propiedades del pan elaborado con manteca no modificada y evaluar las diferencias en textura, volumen, esponjosidad y sabor en comparación con las muestras tratadas enzimáticamente. Analizando el impacto directo del proceso de interés sobre la calidad final del producto.

**Figura 3.7**

*Comparación visual de pan con manteca interesterificada y no interesterificada*



*Nota.* La figura muestra al pan elaborado con manteca interesterificada y no interesterificada

**Tabla 3.6**

*Comparación de Características del Pan Elaborado con Manteca No Interesterificada vs. Manteca Interesterificada*

<b>Parámetros</b>	<b>Mezcla no interesterificada</b>	<b>Mezcla interesterificada</b>
Olor	Normal, ligeramente a manteca tradicional	Normal, sin cambios significativos
Color	Amarillo más uniforme y menos opaco	Amarillo pálido, ligeramente opaco
Textura	Más grasa, miga densa y menos uniforme	Más ligera, miga más uniforme y suave
Aspecto visual	Superficie ligeramente irregular, menos brillante	Superficie más uniforme y brillante
Volumen	Mayor, pan más alto	Menor, pan más plano
Peso (gr)	48	47
Sabor	característico normal del pan	diferente, con perfil alterado
Esponjosidad	Menos aireado, miga más densa	Más aireado, miga más ligera y esponjosa

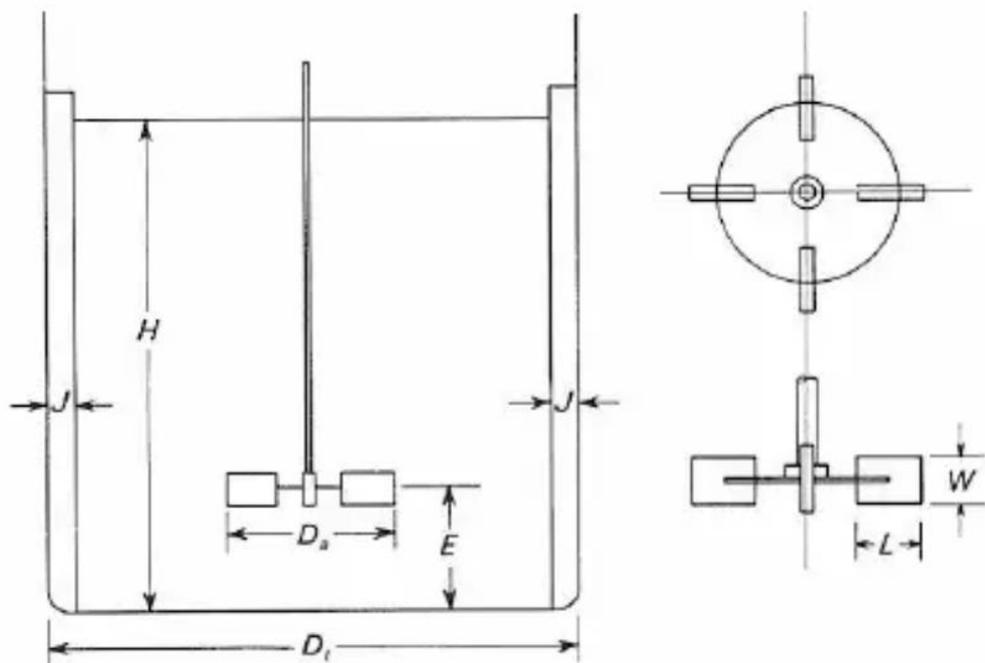
*Nota.* La tabla compara el pan elaborado con manteca no interesterificada y interesterificada, destacando diferencias en color, textura, aspecto visual, volumen, sabor y esponjosidad.

### 3.4 Diseño de un reactor para la producción a escala

#### 3.4.1 Dimensiones y características técnicas

**Figura 3.8**

Diagrama esquemático de un reactor con agitación



*Nota.* Reactor con agitación para proceso de interesterificación enzimático (McCabe,1991).

**Tabla 3.7**

*Dimensiones del Reactor*

Símbolo	Descripción	Medida
$N$	Velocidad de rotación	11.7 rps
$V_M$	Volumen ocupado en el reactor	$0.5 \text{ m}^3$
$V_T$	Volumen del tanque	$0.67 \text{ m}^3$
$H_T$	Altura del tanque	0.95 m
$D_T$	Diámetro del tanque	0.95 m
$D_a$	Diámetro del impulsor	0.32 m
$L$	Longitud del impulsor	0.08 m
$W$	Ancho del impulsor	0.064 m
$E$	Distancia de la base al impulsor	0.32 m

$J$	Ancho de los deflectores	0 m
$N_{Re}$	Número de Reynolds	54630.35
$P$	Potencia del impulsor	1644.48 W

---

*Nota.* La tabla muestra las dimensiones del reactor

El diseño del reactor incluye varias dimensiones clave y parámetros para asegurar un funcionamiento eficiente y efectivo. Estas dimensiones fueron calculadas por criterios de diseño usando el libro de Operaciones Unitarias en Ingeniería Química de McCabe y Manual de Perry para ingenieros químicos. El reactor tiene un volumen total de 0.67 m<sup>3</sup> y está diseñado para trabajar con un volumen ocupado de 0.5 m<sup>3</sup>, lo que representa entre el 75% y 80% de su capacidad máxima. Este rango de operación es crítico para mantener la eficiencia del proceso y evitar problemas relacionados con la sobrecarga o el mal mezclado.

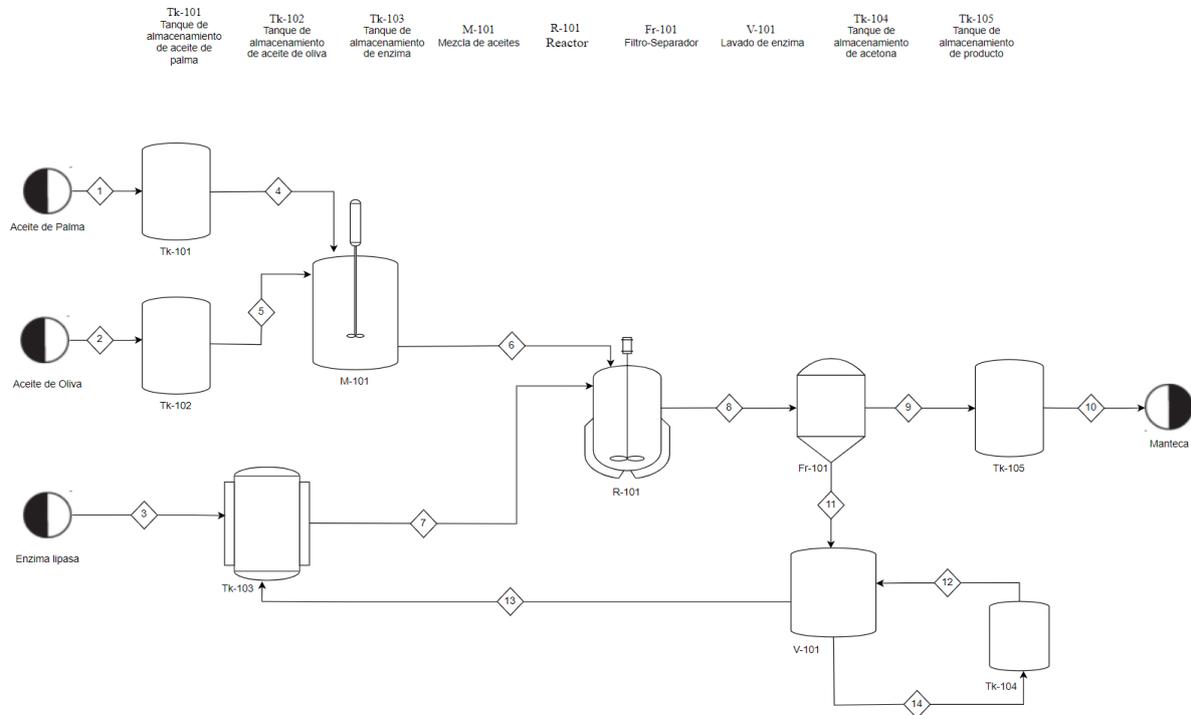
La velocidad de rotación del impulsor es de 11.7 rps, y la potencia requerida para la agitación es de 1644.48 W. La potencia del motor debe ser suficiente para proporcionar la agitación requerida y mantener el número de Reynolds en 54630.35, lo que indica un flujo turbulento eficiente en el reactor.

Además, el reactor está enchaquetado para mantener la temperatura de la reacción a 60 grados centígrados, asegurando que las condiciones de operación sean óptimas para la interesterificación enzimática. La combinación de estas características y parámetros garantiza un proceso de mezcla y reacción eficaz, maximizando el rendimiento y la calidad del producto final.

### 3.4.2 Diagrama de flujo del proceso

**Figura 3.9**

*Diagrama de flujo del proceso de interesterificación enzimática*



El diagrama de flujo del proceso de interesterificación enzimática con el reactor se desarrolla de la siguiente manera: Primero, los aceites de palma y oliva se almacenan en tanques separados. Luego, se mezclan en la proporción deseada en un mezclador previo. Esta mezcla se transfiere al reactor, el cual está encaquetado para mantener una temperatura constante de 60°C, y se asegura que el volumen ocupado no exceda el 75-80% de la capacidad total del tanque. Dentro del reactor, la mezcla se agita a una velocidad de 11.7 rps mientras se añade la enzima Lipozyme TL IM para catalizar la reacción de interesterificación. Durante el proceso, se monitorean la temperatura y la agitación para mantener condiciones óptimas. Después de completar el tiempo de reacción establecido, que se propone sea de 4 horas, se detiene la agitación y la mezcla se descarga del reactor. A continuación, se filtra para separar la enzima del producto. Finalmente, el producto interesterificado se almacena en tanques finales, para su enfriamiento, uso o envasado.

**Tabla 3.8***Equipos y Operaciones en el Proceso de Interesterificación Enzimática*

<b>Equipo</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Operación</b>	<b>Descripción</b>
Tanque de Almacenamiento de Aceite de Palma	T-101	Almacenamiento	En este tanque se almacena el aceite de palma antes de ser mezclado y procesado, asegurando su disponibilidad en cantidad y calidad adecuadas.
Tanque de Almacenamiento de Aceite de Oliva	T-102	Almacenamiento	En este tanque se almacena el aceite de oliva antes de ser mezclado y procesado, asegurando su disponibilidad en cantidad y calidad adecuadas.
Tanque de Almacenamiento de la Enzima Lipozyme TL IM	Tk-103	Almacenamiento	Aquí se almacena la enzima Lipozyme TL IM antes de su activación. Este tanque mantiene la enzima en condiciones óptimas de conservación hasta su uso, asegurando su eficacia y estabilidad.
Tanque Mezclador de Aceites	M-101	Mezcla	La mezcla de aceites de palma y oliva se realiza en este tanque, asegurando una combinación homogénea de los aceites antes de su procesamiento.
Tanque Activador de Enzima	Tk-103	Activación	En este tanque, la enzima Lipozyme TL IM es mantenida a 40 grados centígrados para su activación, asegurando su actividad catalítica óptima.
Reactor CSTR para Interesterificación Enzimática	R-101	Reacción	Este reactor es utilizado para el proceso de interesterificación enzimática, facilitando la reorganización de los ácidos grasos en los triglicéridos bajo condiciones controladas.
Tanque para Lavado de Enzima	V-101	Lavado	Tanque en el que se realiza el lavado de la enzima utilizando acetona, tras la filtración, para garantizar su limpieza y permitir su reutilización
Filtro-Separador de Enzima y Aceite Interesterificado	Fr-101	Separación	La filtración se utiliza para separar la enzima del producto interesterificado, permitiendo su recuperación y reutilización mediante un proceso de lavado con acetona.

Tanque de Almacenamiento de Aceite Interesterificado	Tk-105	Almacenamiento	Después de la reacción, el producto interesterificado se transfiere a este tanque, donde se almacena el producto final, permitiendo la separación eficiente de la enzima mediante filtración.
Tanque de Almacenamiento de Acetona	Tk-106	Almacenamiento	Tanque de almacenamiento de acetona que permite el lavado de la enzima después de la filtración.

*Nota.* Equipos del proceso de interesterificación enzimática, incluyendo su identificación, operación y función específica dentro del proceso.

### **3.5 Análisis económico del proceso**

Se realizó un estudio económico con el fin de evaluar si es viable elaborar una planta de interesterificado enzimático teniendo en cuenta el mercado ecuatoriano.

#### ***3.5.1 Estimación de costos de producción***

Con el uso de la herramienta económica Capcost, se realizó un análisis para determinar los costos operativos involucrados en la producción de manteca. Este análisis consideró múltiples factores, incluidos los costos asociados al consumo de equipos, la energía y el agua necesaria para el funcionamiento de estos, así como el trabajo de los operadores en una base anual. Además, se tomó en cuenta el costo de la materia prima. Como resultado de este análisis detallado, se calculó que el costo de producción por cada kilogramo de manteca es de \$3,00.

Por otro lado, para definir el precio de venta del producto, se llevó a cabo un estudio de mercado enfocado en la manteca utilizada en la panadería. Este estudio permitió identificar un precio competitivo que reflejara tanto la calidad del producto como las condiciones actuales del mercado. Con base en estos datos, se estableció un precio de venta de \$4,50 por kilogramo de manteca, lo que no solo cubre los costos de producción, sino que también asegura una rentabilidad adecuada para el negocio.

**Tabla 3.9***Equipos Necesarios para una Planta de Interesterificación Enzimática*

<b>Equipo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Precio de compra</b>
<b>E-101</b>	Intercambiador de superficie rascada	\$ 8200
<b>Fr-101</b>	Filtro de placa y marco	\$ 23
<b>M-101</b>	Mixer de turbina	\$ 17
<b>R-101</b>	Reactor de chaqueta agitada	\$ 31
<b>Tk-101</b>	Tanque de almacenamiento de aceite de palma	\$ 35
<b>Tk-102</b>	Tanque de almacenamiento de aceite de oliva	\$ 35
<b>Tk-103</b>	Tanque de almacenamiento de enzima	\$ 35
<b>Tk-104</b>	Tanque de almacenamiento de acetona	\$ 35
<b>Tk-105</b>	Tanque de almacenamiento de producto	\$ 35
<b>V-101</b>	Lavado de enzima	\$ 13,700

*Nota.* La tabla muestra los principales equipos requeridos para la implementación de una planta de interesterificación enzimática, incluyendo sus tipos y precios de compra.

**Tabla 3.10***Costos Anuales de Materia Prima para una Planta de Interesterificación Enzimática*

<b>Material</b>	<b>Flujo (kg/h)</b>	<b>Costo Anual</b>
<b>Aceite de oliva</b>	34.11	\$ 709,659
<b>Aceite de palma</b>	77.80	\$ 647,452
<b>Lipozyme TL IM</b>	3.30	\$ 1,373,130
<b>Acetona</b>	10.00	\$122.33

*Nota.* La tabla detalla los flujos y costos anuales de los principales materiales utilizados en una planta de interesterificación enzimática. Estos datos de flujo y costo proveen información clave para la planificación y presupuestación de la operación de dicha planta.

### 3.5.2 Análisis Comparativo del Uso de Manteca

Se compara la manteca interesterificada con la manteca comercial en la producción de panes, evaluando la cantidad de panes obtenidos y los costos asociados.

**Tabla 3.11**

#### *Producción de Panes*

<b>Tipo de Manteca</b>	<b>Cantidad de Manteca Utilizada (lb)</b>	<b>Panes Producidos</b>	<b>Panes Producidos por 1 kg</b>
Manteca Interesterificada	0.25	34	300
Manteca Comercial	0.25	24	212

*Nota.* La tabla muestra la producción de panes utilizando diferentes tipos de manteca, destacando la cantidad de manteca utilizada, el número total de panes producidos y la cantidad de panes producidos por cada kilogramo de manteca.

Esto significa que con 1 kg de manteca interesterificada se produce aproximadamente un 41.51% más de panes en comparación con la manteca comercial.

**Tabla 3.12**

#### *Costos por Pan*

<b>Tipo de Manteca</b>	<b>Costo por 1 kg Manteca (\$)</b>	<b>Panes Producidos por 1 kg</b>	<b>Costo por pan (\$)</b>
Manteca Interesterificada	4.5	300	0.015
Manteca Comercial	1.87	212	0.009

*Nota.* La tabla detalla los costos asociados con la producción de panes utilizando diferentes tipos de manteca. Muestra el costo por kilogramo de manteca, la cantidad de panes producidos por kilogramo de manteca, y el costo por pan resultante.

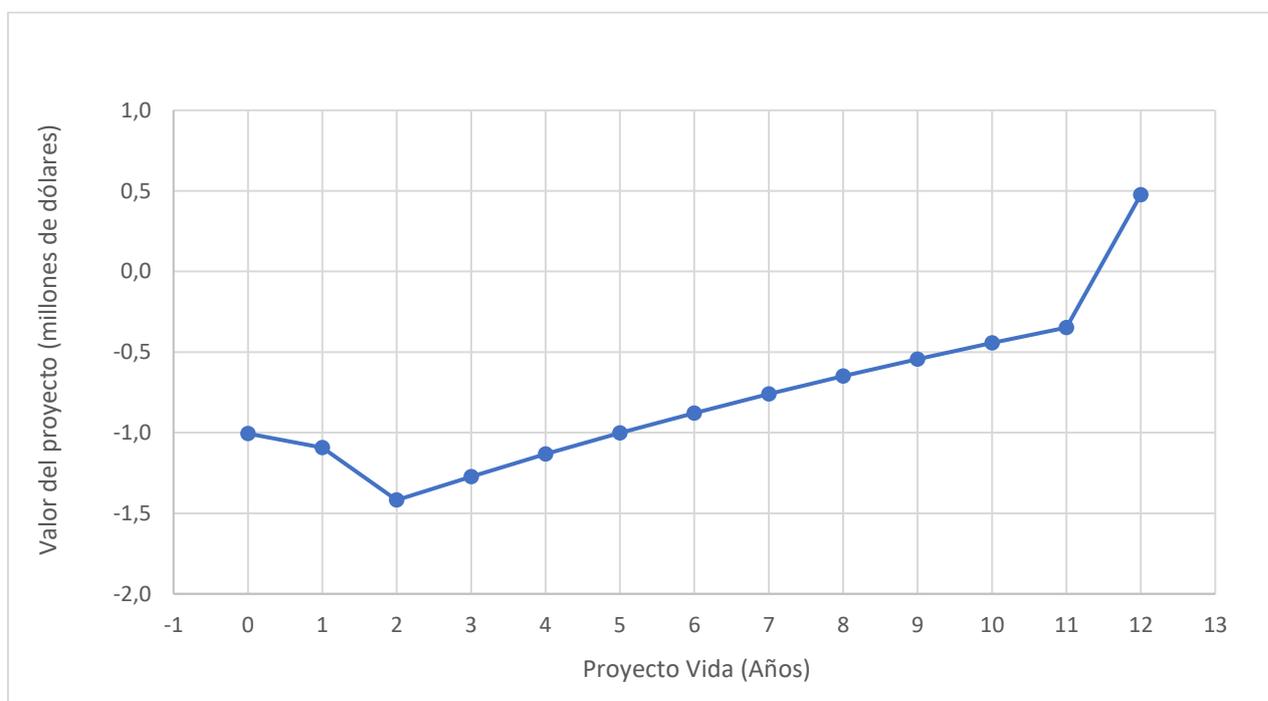
Al comparar los costos por pan, se observa que el uso de manteca interesterificada implica un 66.67% más de costo por pan en comparación con la manteca comercial. En términos absolutos, esto se traduce en un costo de \$0.006 más por pan cuando se utiliza manteca

interesterificada. Este incremento en el costo no llega a ser el doble, pero es significativo, considerando que cada pan elaborado con manteca interesterificada tiene un costo superior. Sin embargo, este costo adicional puede verse compensado por la mayor cantidad de panes producidos con manteca interesterificada, que es un 41.51% superior al de los panes producidos con manteca comercial. Además, este costo puede estar justificado dependiendo de los beneficios esperados de la manteca interesterificada, como la ausencia de ácidos grasos trans y una mejor percepción de calidad en términos de salud.

### 3.5.3 Evaluación de la rentabilidad

**Figura 3.10**

*Diagrama del Flujo de Caja*



*Nota.* Diagrama del flujo de caja del presente proyecto

El presente análisis del flujo de caja proyectado para la implementación de una planta de interesterificación enzimática revela un perfil financiero favorable que respalda la viabilidad del proyecto.

Durante los primeros tres años, se presentan flujos de caja negativos, lo cual es común en proyectos de alta inversión de capital como este, donde se requieren significativas inversiones iniciales en activos fijos y capital de trabajo antes de generar ingresos. Esta fase

inicial de egresos es necesaria para establecer la infraestructura y capacidad productiva requeridas.

A partir del cuarto año, los flujos de caja se vuelven positivos, indicando que la planta entra en una fase de operación rentable. Los ingresos generados superan los costos y gastos, lo que permite una generación constante de flujos de efectivo positivos hasta el final del horizonte de análisis de 13 años. Este patrón sugiere que el proyecto será viable y rentable a largo plazo.

Hacia el final del horizonte, se observa un pico significativo en el flujo de caja, posiblemente asociado a la venta de activos o la culminación del proyecto. Este evento refuerza aún más la viabilidad del proyecto a lo largo de su ciclo de vida.

#### **4. Capítulo 4**

#### 4.1 Conclusiones

- La evaluación del desempeño del proceso de interesterificación enzimática mediante la metodología experimental permitió confirmar su efectividad en la producción de manteca vegetal apta para la industria panificadora. Los resultados obtenidos demostraron que el proceso es capaz de modificar adecuadamente la composición de ácidos grasos en las mezclas de aceites de palma y oliva, mejorando las propiedades físicas y químicas del producto final.
- El análisis realizado en el laboratorio permitió identificar las condiciones adecuadas de temperatura, tiempo de reacción y velocidad de agitación para el proceso de interesterificación de las mezclas de aceites de palma y oliva. Los resultados mostraron que las condiciones de 4H/350RPM y 4H/700RPM, ambas a 60°C son efectivas para favorecer la formación de ácidos grasos monoinsaturados.
- La evaluación de las propiedades físicas y químicas del producto final obtenido mediante interesterificación enzimática demostró que cumple con los requisitos de calidad y funcionalidad requeridos para su aplicación en la industria panificadora. Los cambios observados en la composición de ácidos grasos, con un aumento en la proporción de monoinsaturados, mejoran las características nutricionales y de estabilidad oxidativa de la manteca vegetal.
- Se diseñó conceptualmente la planta de interesterificación enzimática a nivel industrial, seleccionando los equipos necesarios según los resultados del laboratorio. Además, se determinó que el costo de la manteca interesterificada es aproximadamente un 1.67 veces mayor que el de la manteca comercial y se realizó un análisis económico que demostró la viabilidad del proyecto, con un PBP de 3.8 años, TIR del 36.28%, y un VAN de \$658,000, confirmando que el diseño propuesto no solo es técnicamente sólido, sino también financieramente rentable.

## 4.2 Recomendaciones

- Se sugiere estudiar en mayor profundidad la cinética del proceso para entender mejor las velocidades de reacción bajo diversas condiciones operativas. Este conocimiento permitirá diseñar procesos más eficientes y controlar mejor las variables críticas, garantizando así una producción más consistente.
- Se recomienda realizar estudios a mayor escala para identificar posibles desafíos en la escalabilidad del proceso. Esto incluye la evaluación de la homogeneidad de la mezcla, el control de temperatura, y la eficacia de la agitación en volúmenes mayores, lo cual es crucial para asegurar que los resultados obtenidos en laboratorio se puedan replicar con éxito a nivel comercial.
- Se propone llevar a cabo investigaciones adicionales sobre la estabilidad a largo plazo del producto en diferentes condiciones de almacenamiento. Además, se deben abordar otras limitaciones identificadas, como la necesidad de explorar diferentes mezclas de aceites y su impacto en el comportamiento del proceso, para asegurar que el producto final mantenga su calidad durante toda su vida útil.

## 5. Referencias

- Agencia Nacional de Regulación, C. y V. S. (2024). Resolución ARCSA-DE-2024-010-DASP La Dirección Ejecutiva de la Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria-ARCSA, Doctor Leopoldo Izquieta Pérez.
- Aktaş, A. B. (2019). Chemical and enzymatic interesterification of tallow with different oils.
- Corporación Financiera Nacional. (2022). Ficha Sectorial.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2016a). Mantecas vegetales. Requisitos (NTE INEN 1313).
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2016b). Mezclas de aceites vegetales comestibles. Requisitos (NTE INEN 34).
- Jiménez Sánchez, A. (2023). Aceite de oliva en nutrición clínica. *Nutr Clin Med*, XVII(2), 141–165. <https://doi.org/10.7400/NCM.2023.17.2.5124>
- Lee, Y. Y., Tang, T. K., & Lai, O. M. (2012). Health benefits, enzymatic production, and application of medium- and long-chain triacylglycerol (mlct) in food industries: A review. *Journal of Food Science*, 77(8). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02793.x>
- Manzoor, S., Masoodi, F. A., Akhtar, G., & Rashid, R. (2022). Production of trans-free shortening by lipase catalysed interesterification using mustard oil and palm stearin: optimisation and characterisation. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03315-1>
- Mc. CABE, Warren y SMITH, W. Operaciones Básicas de la Ingeniería Química. Madrid: Mc Graw Hill, 1991; 1112p
- Mofijur, M., Siddiki, S. Y. A., Shuvho, M. B. A., Djavanroodi, F., Fattah, I. M. R., Ong, H. C., Chowdhury, M. A., & Mahlia, T. M. I. (2021). Effect of nanocatalysts on the

- transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources- A mini-review. *Chemosphere*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128642>
- Nagpal, T., Sahu, J. K., Khare, S. K., Bashir, K., & Jan, K. (2021). Trans fatty acids in food: A review on dietary intake, health impact, regulations and alternatives. En *Journal of Food Science* (Vol. 86, Número 12, pp. 5159–5174). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15977>
- Ojeda, L., & Valencia, L. (2022). Evaluación del proceso de interesterificación enzimática de una mezcla de aceites vegetales para la obtención de una base grasa para margarinas en SIGRA S.A. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/9027>
- Oliveira, P., Albuquerque, D., Pires, W., Bezerra, C., Silva, L., & Cruz, A. (2021). Enzymatic interesterification effect on the physicochemical and technological properties of cupuassu seed fat and inaja pulp oil blends. *Food Research International*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110384>
- Organización Mundial de la salud. (2018). La OMS planea eliminar los ácidos grasos trans de producción industrial del suministro mundial de alimentos. Organización Mundial de la salud . <https://www.who.int/es/news/item/14-05-2018-who-plan-toeliminate-industriallyproduced-trans-fatty-acids-from-global-food-supply>
- Osorio-Oviedo, Á. (2019). Pruebas de análisis sensorial para el desarrollo de productos de cereales infantiles en Venezuela Sensory analysis tests for the development of infant cereal products in Venezuela. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, 13, 27–37. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21791.51361>
- Palla, C., & Carrín, E. (2014). 0% Trans: Interesterificación y fraccionamiento como estrategias tecnológicas. [http://www.msal.gov.ar/ent/images/stories/ciudadanos/pdf/afiche\\_grasas-trans.pdf](http://www.msal.gov.ar/ent/images/stories/ciudadanos/pdf/afiche_grasas-trans.pdf)

- Rincón, S., & Martínez, D. (2009). Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. <https://publicaciones.fedepalma.org>
- Rohm, H., Schäper, C., & Zahn, S. (2018). Interesterified fats in chocolate and bakery + products: A concise review. En *LWT* (Vol. 87, pp. 379–384). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.076>
- Safra, N., & Perea, A. (2009). Interesterificación enzimática para la producción de grasas especiales usando lipasa de *thermomyces lanuginosus*. <https://publicaciones.fedepalma.org>
- Simas, A., Lapa, N., & Oliveira, A. C. (2009). Optimization of enzymatic transesterification of rapeseed oil using response surface methodology. <https://core.ac.uk/download/pdf/70656991>
- Singh, P., Chopra, R., Garg, M., Dhiman, A. (2022) Enzymatic Interesterification of Vegetable Oil: A Review on Physicochemical and Functional Properties, and Its Health Effects. 10.5650/jos.ess22118
- Sivakanthan, S., & Madhujith, T. (2020). Current trends in applications of enzymatic interesterification of fats and oils: A review. En *LWT* (Vol. 132). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109880>
- Sosa Siverio, G. (2022). Grasas modificadas en la industria alimentaria. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/31745/Grasas%20modificadas%20en%20la%20industria%20alimentaria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Thirumdas, R. (2022). Partial hydrogenation of oils using cold plasma technology and its effect on lipid oxidation. En *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05434-z>
- Topolska, K., Florkiewicz, A., & Filipiak-Florkiewicz, A. (2021). Functional food—consumer motivations and expectations. En *International Journal of Environmental*

Research and Public Health (Vol. 18, Número 10). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/ijerph18105327>

Wanders, A. J., Brouwer, I. A., Siebelink, E., & Katan, M. B. (2010). Effect of a high intake of conjugated linoleic acid on lipoprotein levels in healthy human subjects. *PLoS ONE*, 5(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009000>

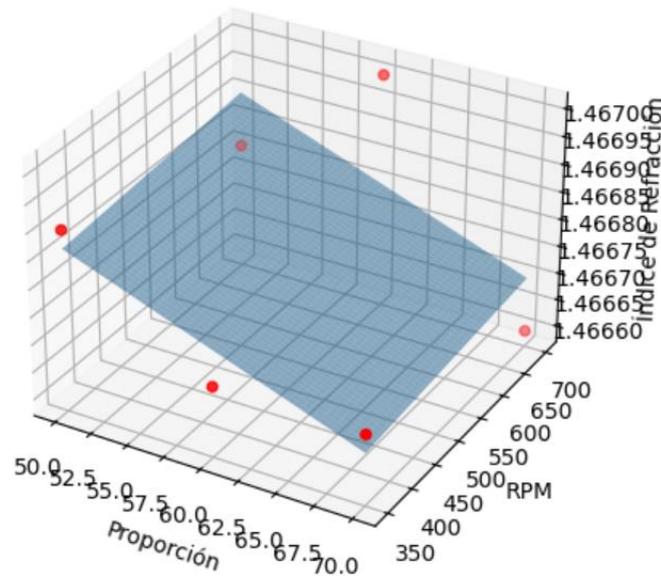
Zapata, M. (2004). Utilización de aceite de palma y otros aceites vegetales en la industria de alimentos. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1040>

Zhang, H., Xu, X., Mu, H., Nilsson, J., Adler-Nissen, J., & Høy, C. E. (2000). Lipozyme IM catalyzed interesterification for the production of margarine fats in a 1 kg scale stirred tank reactor. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102(6), 411– 418. [https://doi.org/10.1002/1438-9312\(200006\)102:63.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/1438-9312(200006)102:63.0.CO;2-T)

## Apéndice A – Estadística

### Anexo 1

#### Regresión Múltiple Proporción y RPM vs Índice de Refracción (Visualización 3D)

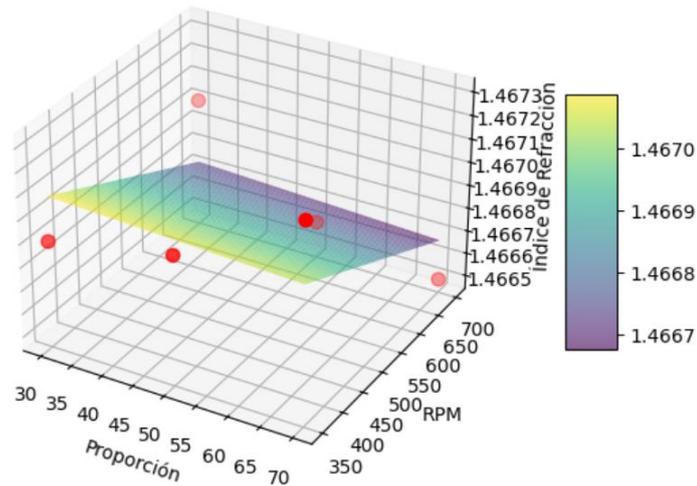


*Nota.* Representación tridimensional de la regresión múltiple mostrando la relación entre la proporción, RPM y el índice de refracción. Los puntos rojos representan las observaciones, mientras que la superficie azul indica el plano de regresión estimado.

El análisis de los coeficientes del modelo de regresión múltiple revela efectos sutiles de las variables independientes sobre el índice de refracción. La proporción muestra un impacto negativo muy pequeño ( $-0.00001$  por unidad), mientras que las RPM presentan un efecto positivo extremadamente reducido ( $0.0000000142$  por unidad). Estos coeficientes sugieren que un aumento en la proporción de la primera sustancia en la mezcla tiende a disminuir ligeramente el índice de refracción, mientras que un incremento en las revoluciones por minuto lo aumenta muy levemente. Sin embargo, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de  $0.3846$  indica que el modelo explica solo el  $38.46\%$  de la variabilidad en el índice de refracción, lo cual es relativamente bajo. Esto implica que existen otros factores no considerados en el modelo que influyen significativamente en el índice de refracción, o que la relación entre las variables no es estrictamente lineal.

## Anexo 2

### *Regresión Múltiple Proporción y RPM vs Índice de Refracción*



*Nota.* Gráfico tridimensional de la regresión múltiple con gradiente de color. El eje z y la escala de colores representan el índice de refracción, mientras que los ejes x e y muestran la proporción y RPM, respectivamente. Los puntos rojos indican las observaciones reales.

Contrariamente a los resultados previos, se observa ahora un efecto positivo de la proporción en el índice de refracción, sugiriendo que un incremento en la proporción del primer componente en la mezcla tiende a aumentar ligeramente este índice. Por otro lado, el coeficiente negativo asociado a las RPM indica que un aumento en las revoluciones por minuto tiende a disminuir muy ligeramente el índice de refracción, lo cual representa un efecto opuesto al observado en el análisis anterior. Estas discrepancias subrayan la importancia de considerar la interacción entre variables y la posible presencia de relaciones no lineales en el sistema estudiado.

## Anexo 3

### Resumen Estadístico y Ecuación del Modelo

Ecuación del modelo:

Índice de Refracción =  $1.467073 + -0.000003 * \text{Proporción} + -0.000000 * \text{RPM} + 0.000035 * \text{Horas}$

Resumen estadístico:

	Proporción	RPM	Horas	Indice_Refraccion
count	12.000000	12.000000	12.000000	12.000000
mean	55.000000	525.000000	5.000000	1.466833
std	14.459976	182.781539	1.044466	0.000227
min	30.000000	350.000000	4.000000	1.466500
25%	50.000000	350.000000	4.000000	1.466675
50%	55.000000	525.000000	5.000000	1.466850
75%	70.000000	700.000000	6.000000	1.467000
max	70.000000	700.000000	6.000000	1.467300

Correlaciones:

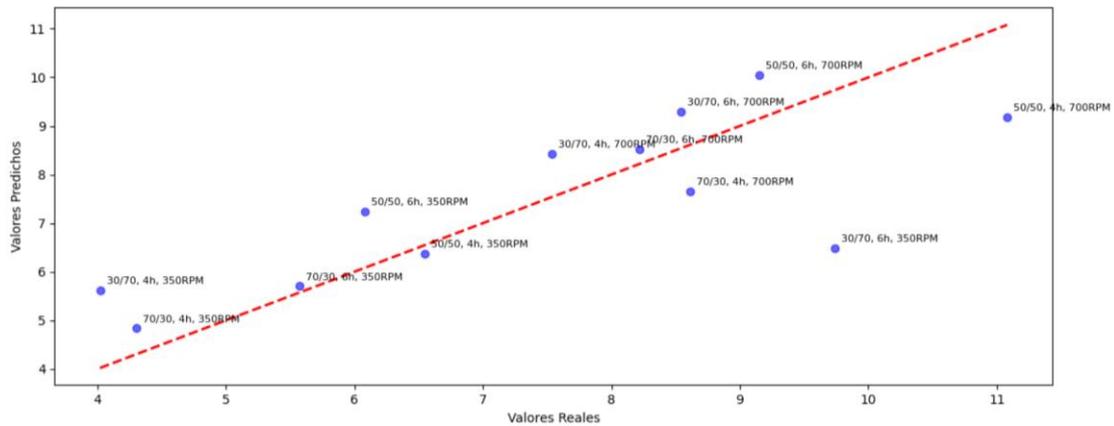
	Proporción	RPM	Horas	Indice_Refraccion
Proporción	1.000000e+00	-2.737257e-17	-3.611576e-01	-0.249296
RPM	-2.737257e-17	1.000000e+00	-2.706829e-17	-0.383482
Horas	-3.611576e-01	-2.706829e-17	1.000000e+00	0.230089
Indice_Refraccion	-2.492957e-01	-3.834825e-01	2.300895e-01	1.000000

*Nota.* Resumen estadístico del modelo de regresión múltiple, incluyendo la ecuación del modelo, estadísticas descriptivas de las variables y matriz de correlaciones.

El análisis de los coeficientes del modelo de regresión múltiple revela que tanto la proporción como las RPM tienen un efecto negativo sobre el índice de refracción, mientras que las horas de procesamiento muestran un efecto positivo, siendo este último el más pronunciado de los tres factores. Las correlaciones observadas corroboran estas tendencias, mostrando una correlación negativa débil entre la proporción y el índice de refracción (-0.249296), una correlación negativa moderada entre las RPM y el índice de refracción (-0.383482), y una correlación positiva débil entre las horas y el índice de refracción (0.230089). Estos resultados subrayan la complejidad de las relaciones entre las variables estudiadas y la necesidad de considerar factores adicionales para mejorar la capacidad predictiva del modelo.

## Anexo 4

### Valores Reales vs Predichos del Índice de Acidez

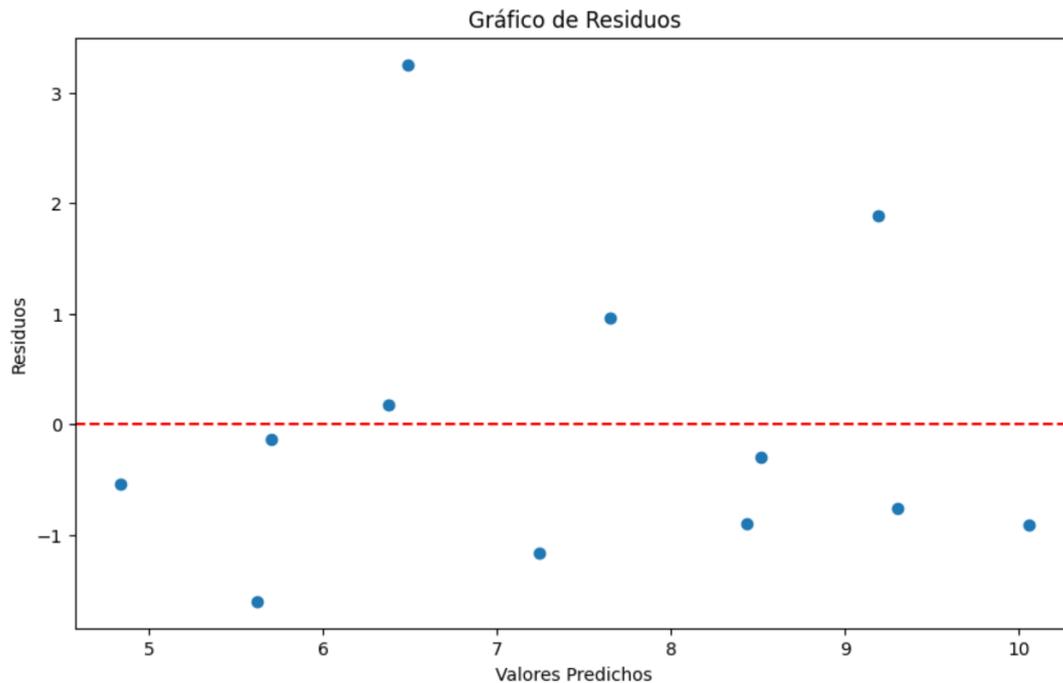


*Nota.* Gráfico de dispersión que muestra la relación entre los valores reales y predichos del índice de acidez. La línea roja punteada representa el ajuste perfecto. Las etiquetas indican las condiciones experimentales (proporción, tiempo, RPM) para cada punto

El análisis del modelo de regresión para el índice de acidez revela varios aspectos importantes. La intersección de 1.0339 representa el valor base del índice cuando todas las variables están en su nivel de referencia o son cero. El coeficiente de determinación (R-cuadrado) de 0.5872 indica que el modelo explica aproximadamente el 58.72% de la variabilidad en el índice de acidez, sugiriendo un ajuste moderado a los datos. El Error Cuadrático Medio (MSE) de 1.8011 proporciona una medida de la precisión de las predicciones, indicando que, en promedio, las estimaciones se desvían alrededor de 1.34 unidades del valor real. Este nivel de error sugiere que, aunque el modelo captura una parte significativa de la variabilidad, aún existe margen para mejorar la precisión de las predicciones. Notablemente, la proporción de mezcla y el tiempo emergen como los factores más influyentes en la determinación del índice de acidez, lo cual ofrece direcciones claras para futuras mejoras del proceso o para investigaciones más detalladas.

## Anexo 5

### Gráfico de Residuos

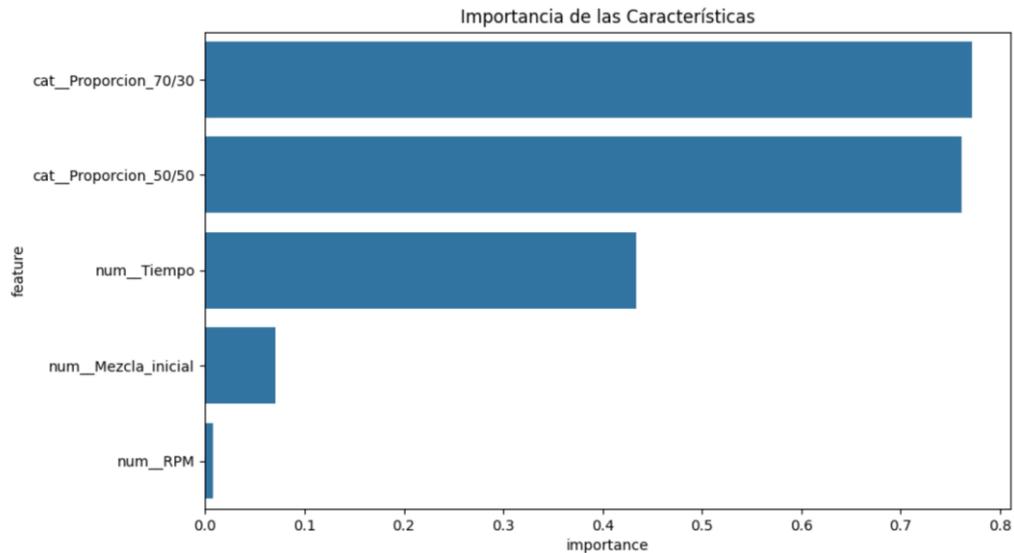


*Nota.* Gráfico de residuos que ilustra la diferencia entre los valores observados y predichos del índice de acidez. La línea roja punteada representa residuos nulos.

El análisis de los residuos del modelo proporciona insights valiosos sobre su rendimiento y posibles áreas de mejora. La distribución de los residuos, que se extiende tanto por encima como por debajo de la línea de cero, es inicialmente alentadora, ya que sugiere una cierta simetría en los errores de predicción. Sin embargo, se detecta una sutil tendencia en forma de "U" en la distribución de los residuos, caracterizada por valores más elevados en los extremos de los valores predichos y valores más bajos en la región central. Esta configuración indica que el modelo podría estar subestimando los valores extremos del índice de acidez mientras sobreestima los valores medios. Tal patrón sugiere la posible presencia de relaciones no lineales entre las variables predictoras y el índice de acidez que no han sido capturadas adecuadamente por el modelo lineal actual. Esta observación apunta hacia la necesidad de considerar transformaciones de variables o la inclusión de términos no lineales para mejorar la precisión y la capacidad predictiva del modelo en todo el rango de valores.

## Anexo 6

### Importancia de las Características en el Modelo Predictivo

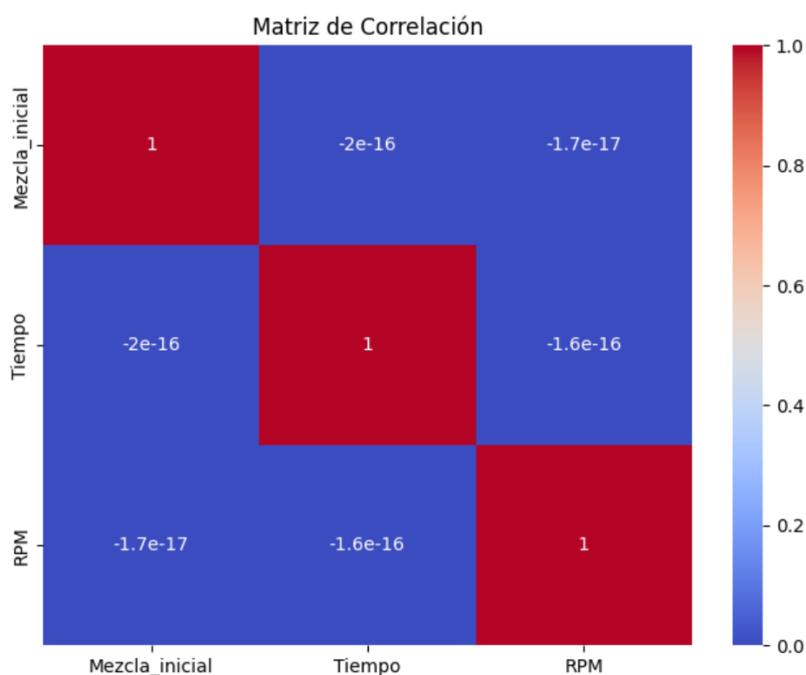


*Nota.* Gráfico de importancia de características que muestra la contribución relativa de cada variable al modelo predictivo. Las barras representan la importancia normalizada de cada característica, donde valores más altos indican mayor influencia en las predicciones del modelo.

El análisis de la importancia de las características en el modelo revela una jerarquía clara en la influencia de las variables sobre el índice de acidez. Las proporciones de mezcla, específicamente las relaciones 70/30 y 50/50, emergen como los factores más determinantes en el modelo predictivo. Estas son seguidas en importancia por el tiempo de procesamiento, que se posiciona como la tercera característica más influyente. En contraste, la mezcla inicial y las revoluciones por minuto (RPM) demuestran una importancia relativa menor en comparación con los factores anteriores. Esta distribución de importancia sugiere que las estrategias para mejorar el proceso o mejorar la precisión del modelo deberían enfocarse primordialmente en el ajuste de las proporciones de mezcla y el tiempo de procesamiento, mientras que la mezcla inicial y las RPM podrían considerarse como variables secundarias en términos de su impacto en el índice de acidez.

## Anexo 7

### Matriz de Correlación entre Variables del Estudio



*Nota.* Matriz de correlación que muestra las relaciones entre las variables Mezcla\_inicial, Tiempo y RPM. Los valores en la matriz representan los coeficientes de correlación de Pearson, mientras que la escala de colores indica la intensidad y dirección de las correlaciones.

El análisis de la matriz de correlación entre las variables independientes del estudio revela un hallazgo positivo para la robustez del modelo estadístico. La ausencia de correlaciones significativas entre las variables predictoras - mezcla inicial, tiempo y RPM - es un indicador favorable que sugiere la ausencia de multicolinealidad en el modelo. Esta característica es particularmente beneficiosa en el contexto de la regresión múltiple, ya que la multicolinealidad puede complicar la interpretación de los coeficientes del modelo y reducir su precisión predictiva. La independencia relativa entre estas variables permite una evaluación más clara y confiable de la contribución individual de cada factor al índice de acidez, fortaleciendo así la validez de las inferencias derivadas del modelo y proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en el proceso de mejora.

## Apéndice B – Certificado de análisis de la enzima



### CERTIFICATE OF ANALYSIS

**06-3155** Lipozymer TL IM

**Lot Number:** L01232403

**CAS Number:** 9001-62-1

Characteristic	Specification	Result
Color	Off-White	Conforms
Form	Immobilized Granulate	Conforms
Interestification Unit IUN	Report /g	545.00 unit/g
Bulk Density	Report g/ml	0.42 g/mL
Loss on Drying 105°C	Report %	3.30%
Laser Diffraction >1180 um	Report %	0.59%
Laser Diffraction <250 um	Report %	1.55%
TOTAL VIABLE COUNT	Report /g	<100/g
COLIFORM BACTERIA	Report /g	<10/g
E. COLI	Report	Not detected, 25 g
SALMONELLA	Report	Not detected, 25 g
Best Before date	Report	11/01/2026

This document has been electronically generated and does not require a signature.

**March 18, 2024**

*Corporate Headquarters:*  
7 Mulliken Way  
Newburyport, MA 01950-4098  
U.S.A.  
Tel: (978) 499-1600  
Fax: (978) 465-3104

**Strem Chemicals, Inc.**  
**www.strem.com**

*European Headquarters:*  
15, rue de l'Atome  
67800 BISCHHEIM (France)  
Tel: (33) 03 88 62 52 60  
Fax: (33) 03 88 62 26 81

## Apéndice C – Propiedades físicas y químicas básicas de Lipozyme TL IM

· <b>9.1 Information on basic physical and chemical properties</b>	
· <b>General Information</b>	
· <b>Appearance:</b>	
· <b>Form:</b>	<i>Granulate</i>
· <b>Colour:</b>	<i>Whitish</i>
· <b>Odour:</b>	<i>Characteristic</i>
· <b>Odour threshold:</b>	<i>Not determined.</i>
· <b>pH-value:</b>	<i>Not applicable.</i>
· <b>Change in condition</b>	
· <b>Melting point/freezing point:</b>	<i>Undetermined.</i>
· <b>Initial boiling point and boiling range:</b>	<i>Undetermined.</i>
· <b>Flash point:</b>	<i>Not applicable.</i>
· <b>Flammability (solid, gas):</b>	<i>Product is not flammable.</i>
· <b>Ignition temperature:</b>	
· <b>Decomposition temperature:</b>	<i>Not determined.</i>
· <b>Auto-ignition temperature:</b>	<i>Product is not selfigniting.</i>
· <b>Explosive properties:</b>	<i>Product does not present an explosion hazard.</i>
· <b>Explosion limits:</b>	
· <b>Lower:</b>	<i>Not determined.</i>
· <b>Upper:</b>	<i>Not determined.</i>
· <b>Vapour pressure:</b>	
<i>Not applicable.</i>	
· <b>Density:</b>	<i>Not determined.</i>
· <b>Relative density</b>	<i>Not determined.</i>
· <b>Vapour density</b>	<i>Not applicable.</i>
· <b>Evaporation rate</b>	<i>Not applicable.</i>
· <b>Solubility in / Miscibility with water:</b>	
<i>Insoluble.</i>	
· <b>Partition coefficient: n-octanol/water:</b>	<i>Not determined.</i>
· <b>Viscosity:</b>	
· <b>Dynamic:</b>	<i>Not applicable.</i>
· <b>Kinematic:</b>	<i>Not applicable.</i>
· <b>Solvent content:</b>	
· <b>Organic solvents:</b>	<i>0.0 %</i>
· <b>VOC (EC)</b>	<i>0.00 %</i>
· <b>9.2 Other information</b>	<i>No further relevant information available.</i>

*Nota.* La información proporcionada es un extracto de la hoja de seguridad de la enzima Lipozyme TL IM.