



Interesterificación enzimática de aceite de palma híbrida (*Elaeis oleífera* x *Elaeis guineensis*, OxG) en procesos batch mediante el uso del látex parcialmente purificado de *Carica pentagona*

Enzymatic Interesterification of Hybrid Oil Palm (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*, OxG) in Batch Processes Using Partially Purified *Carica pentagona* Latex

Kevin Vera Loor¹

kevinvera@pg.uleam.edu.ec

ORCID

José Coloma Hurel²

jose.coloma@uleam.edu.ec

ORCID

Resumen.

La interesterificación de aceites y grasas es un proceso industrial crucial para modificar sus propiedades funcionales y hacerlas aptas para diversas aplicaciones de interés en la industria alimentaria. Tradicionalmente, se ha empleado la lipasa inmovilizada de *Thermomyces lanuginosus* (TLIM). Sin embargo, este estudio explora el látex de babaco (*Carica pentagona*) parcialmente purificado como una alternativa prometedora, dada su actividad lipolítica previamente documentada, comparable o incluso superior a la de la *Carica papaya*.

La metodología implicó la extracción y purificación del látex de babaco mediante centrifugación para eliminar proteasas, seguido de un secado a 40 °C para evitar la inactivación enzimática. La actividad enzimática se evaluó utilizando Resonancia Magnética Nuclear (RMN). El diseño experimental factorial incluyó la variación de la concentración de enzima (0.5, 1.0, 2.0 UI/g) y la temperatura de reacción del proceso de interesterificación (40, 50, 60 °C). Los resultados confirmaron que el látex de babaco purificado destaca como un biocatalizador eficaz y sostenible para la modificación de grasas en procesos batch, específicamente en interesterificación donde el % SFC a 10°C, 30 °C, 35 °C del experimento de 40 °C y 2 UI/g fue de 19.29

%, 1.70 %, 1.07%, mientras que para la enzima comercial a 60 °C y 2 UI/g a estas temperaturas fueron de 22.92%, 1.78% y 0.436% respectivamente. Siendo el valor de la PO OXG de entrada de 26%, 1,34 % y 0.22 % para las temperaturas de 10°C, 30 °C, 35 °C, garantizando comportamientos reológicos deseables para la formulación de grasas plásticas tipo margarina o shortening.

Palabras clave: Interesterificación, Látex, *Carica pentagona*, Batch, Solid fat, content, Palma Híbrida OXG

Abstract

Interesterification of oils and fats is a crucial industrial process for modifying their functional properties and making them suitable for various applications in the food industry. Traditionally, immobilized lipase from *Thermomyces lanuginosus* (TLIM) has been used. However, this study explores partially purified babaco (*Carica pentagona*) latex as a promising alternative, given its previously documented lipolytic activity, comparable to or even superior to that of *Carica papaya*.

The methodology involved the extraction and purification of babaco latex by centrifugation to remove proteases, followed by drying at 40 °C to avoid enzyme inactivation. Enzyme activity was assessed using Nuclear Magnetic Resonance (NMR). The factorial experimental design included varying the enzyme concentration (0.5, 1.0, 2.0 IU/g) and the reaction temperature of the interesterification process (40, 50, 60 °C). The results confirmed that purified babaco latex stands out as an effective and sustainable biocatalyst for fat modification in batch processes, specifically in interesterification. The % SFC at 10°C, 30°C, and 35°C in the experiment with 40°C and 2 IU/g was 19.29%, 1.70%, and 1.07%, respectively, while for the commercial enzyme at 60°C and 2 IU/g, the values were 22.92%, 1.78%, and 0.436%, respectively. The input PO OXG value was 26%, 1.34%, and 0.22% for the temperatures of 10°C, 30°C, and 35°C, guaranteeing desirable rheological behavior for the formulation of margarine-type plastic fats or shortening.

Keywords: Interestification, Latex, *Carica Pentagona*, Batch, Solid fat content, OXG Hybrid Palm

Introducción

Los aceites y las grasas pueden someterse a procesos que alteran sus propiedades fisicoquímicas, con el objetivo de hacerlos útiles en distintas aplicaciones tales como en la elaboración de margarinas, shortenings y chocolates (Singh et al., 2022) (Mursalín et al., 2024) (Zeng et al., 2024).

Entre los procesos de modificación de grasas más especializados son la hidrogenación y la interesterificación. La hidrogenación consiste en la incorporación de hidrógeno a los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados, lo que modifica la textura de las grasas. En cambio, la interesterificación es un término que describe reacciones en las que se producen intercambios de ácidos grasos (Sivakanthan & Madhujith, 2020).

La importancia del proceso de interesterificación se traduce por el valor que tiene en las industrias de aceites y grasas para la producción de alimentos. Entre los productos que destacan principalmente son: los de palma, palmiste y sus derivados, cuya interesterificación brinda características diferentes como maleabilidad y dureza a la grasa (Singh et al., 2022) (Sulaiman et al., 2022) (Okpe, 2022).

Existen dos tipos de interesterificación: la química, que reordena los ácidos grasos de forma aleatoria y la enzimática que según el tipo de enzima puede causar reordenamiento de los ácidos grasos en posiciones sn 1,2 o sn 1,3. Las lipasas (triacilglicerol acilhidrolasas, EC 3.1.1.3) son enzimas ampliamente usadas que catalizan la hidrólisis de triacilgliceroles a glicerol y ácidos grasos libres (Salgado et al., 2022). Sin embargo, en condiciones de baja actividad de agua, favorecen reacciones de síntesis e interesterificación. (Sivakanthan & Madhujith, 2020).

Las enzimas inmovilizadas de mayor uso en la interesterificación industrial de grasas y aceites son las lipasas de origen microbiano. (Hasan et al., 2006). (Chandra et al., 2020). El proceso enzimático, debido a la alta selectividad de las enzimas, tiene la ventaja de producir sustituciones 1,3 que crea productos más maleables y 1,2 que crea más saturados (Alves et al., 2024). A pesar de que la interesterificación enzimática (EIE) puede ser más costosa que la química, la EIE se prefiere por sus ventajas significativas ya que utiliza condiciones de procesamiento más suaves y facilita la producción precisa de lípidos sin mayor generación de

subproductos (Singh et al., 2022), (Manzoor et al., 2024), (Zuin et al., 2022), (Sivakanthan & Madhujith, 2020), (Alves et al., 2024).

En el sector industrial destacan las variantes comerciales **Lipozyme RMIM** (proveniente de *Rhizomucor miehei*) y **Lipozyme TLIM** (*Thermomyces lanuginosus*). Estas enzimas son comúnmente inmovilizadas en soportes hidrofóbicos para permitir su reusabilidad y mejorar su estabilidad en entornos no acuosos (Miranda et al., 2024).

En cuanto a las proporciones de uso, la cantidad de enzima inmovilizada suele expresarse como un porcentaje del peso total de los sustratos grasos, oscilando comúnmente entre 2 al 10 % (p/p) en reactores por lotes. Esta dosificación, junto con una temperatura de reacción entre 40 a 70 °C y tiempos de 2 a 8 horas, permite alcanzar el grado deseado de reordenamiento de los ácidos grasos (Sivakanthan & Madhujith, 2020)

Investigaciones recientes resaltan que la inmovilización de Lipozyme TLIM en soportes específicos no solo mejora su estabilidad térmica y operativa, sino que facilita su separación del medio de reacción, lo que la convierte en una opción económicamente viable para procesos industriales. (Ismail & Baek, 2020).

La versatilidad de la TLIM ha sido explorada en diversas aplicaciones, desde la síntesis de ésteres complejos hasta la modificación de grasas y aceites para la industria alimentaria, confirmando su importancia como biocatalizador clave en la química verde (Wang et al., 2025). Además, la eficacia de Lipozyme TLIM en la producción de biocombustibles y otros ésteres ha sido documentada; destacando su rol en la optimización de rendimientos y la reducción de subproductos no deseados (Gómez-Calvo et al., 2022) (Mota et al., 2020).

Otra lipasa con múltiples aplicaciones industriales es la proveniente del látex de *Carica papaya*. Esta enzima ha despertado un interés creciente debido a su condición de enzima naturalmente inmovilizada, lo que le confiere propiedades bioquímicas únicas y una estabilidad superior sin los costos asociados a los soportes sintéticos (Abdelkafi et al., 2011). Esta ventaja operativa justifica su implementación en procesos de alta especificidad, como la síntesis de sustitutos de grasa de leche humana

mediante la interesterificación de aceite de palma (Soares et al., 2023) (Singh et al., 2022) o la producción de equivalentes de manteca de cacao a partir de la interesterificación de aceite de palma, mejorando las propiedades físicas de grasas vegetales económicas (Pinyaphong & Phutrakul, 2009) (Ferreira-Dias, 2022).

La robustez del látex de *Carica papaya* en medios no acuosos ha permitido escalar la producción de ésteres de ácidos grasos para biocombustibles, consolidando a esta lipasa como una herramienta biotecnológica versátil, de bajo costo y altamente eficiente para la modificación de lípidos en diversas áreas industriales (Su & Wei, 2014) (Ortega Afanador et al., 2018).

Dada la importancia de las lipasas para reacciones de interesterificación en la industria de aceites y grasas; la búsqueda de nuevos catalizadores es intensa. Estudios anteriores caracterizaron la actividad de la lipasa presente en el látex crudo de babaco (*Carica pentagona*) en reacciones de alcoholólisis y esterificación. Los resultados revelaron que este látex es un biocatalizador tan eficaz como el látex crudo de papaya (*Carica papaya*), logrando rendimientos similares de aproximadamente 70-72% para alcoholólisis y 32-34% para esterificación.

El látex de babaco (*Carica pentagona*) exhibe un elevado potencial para aplicaciones industriales debido a su eficiencia biocatalítica superior en comparación con la papaína comercial cruda (Cambon et al., 2008) (Dhuique-Mayer et al., 2003). Su extracto enzimático presenta actividades proteolíticas de 5.73 U mg^{-1} y lipolítica de 1.01 U mg^{-1} comparables a las del látex de *Carica papaya* de 4.57 U mg^{-1} y 0.90 U mg^{-1} respectivamente. No obstante, en reacciones de esterificación, el látex de babaco demuestra una actividad específica significativamente mayor (0.77 U mg^{-1}) frente al látex comercial de papaya (0.28 U mg^{-1}), consolidándose como una alternativa biotecnológica altamente eficiente (Dhuique-Mayer et al., 2003).

Considerando que tanto el látex de *Carica Papaya* como el látex de *Carica pentagona* comparten estructuras similares y enzimas lipasas inmovilizadas de manera natural dentro de su matriz polimérica compleja (Abdelkafi et al., 2011), (Cambon et al., 2008), resulta de gran interés la evaluación de procesos de interesterificación

catalizados por lipasas inmovilizadas naturalmente presentes en el látex de *Carica pentagona*. Ya que estudios anteriores efectuados en el látex de *Carica pentagona*, sitúan como una fuente de lipasas (alta actividad lipolítica) (Cambon et al., 2008).

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la interesterificación del aceite de palma híbrida OXG utilizando un extracto enzimático parcialmente purificado del látex de babaco (*Carica pentagona*) en procesos batch; esto contribuirá a desarrollar nuevos procesos para la modificación de las propiedades físicas de aceites vegetales con características deseables para la industria de las grasas y aceites.

▪ Metodología

2.1 Materiales

Se utilizaron frutos de babaco (*Carica pentagona*) en estado verde, adquiridos en la ciudad de Patate, provincia de Tungurahua en Ecuador. Para todas las preparaciones y diluciones, se empleó agua destilada. El sustrato fue aceite de palma OXG, un cruce entre palma africana (*Elaeis guineensis*) y la palma americana (*Elaeis oleifera*) adquirido de una empresa aceitera de la ciudad de Manta.

2.2. Extracción y Recolección del Látex

La extracción de látex de *Carica pentagona* se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito por (Rivera-Botonares et al., 2023). Se realizaron tres cortes longitudinales en los frutos de babaco a primeras horas de la mañana, momento en el que la fruta presenta mayor firmeza debido a la rehidratación nocturna y a la baja demanda transpiratoria. El látex recolectado se transportó inmediatamente en un recipiente con hielo y sal, almacenándose finalmente a -12 °C durante 2 días.

2.3. Purificación parcial de la Enzima

La purificación parcial de las lipasas de *Carica pentagona* presente en el látex e inmovilizada naturalmente se llevó a cabo mediante repetidos procesos de centrifugación y lavado con agua destilada con el fin de eliminar proteasas presentes en el látex, en concordancia con la metodología propuesta por Rivera, Mateos-Díaz y Sandoval (2012) con ligeras modificaciones en la purificación de lipasas provenientes del látex de papaya (*Carica papaya*). El látex crudo se centrifugó a 8000 RPM durante 20 minutos a 4 °C para eliminar proteasas. Se agregaron 45 g de agua por cada 7.5 g de látex. Este proceso se repitió 5 veces.

Luego, el látex se filtró con una bomba de vacío a una presión manométrica de 0.5 bar a temperatura de 25 °C durante 2 horas para ser trasladado a una cámara a 40 °C donde se secó por 48 horas para retirar humedad residual.

2.4. Determinación de la Actividad Enzimática

La actividad enzimática de interesterificación del extracto de látex de (*Carica pentagona*) se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito por Novozymes (NZNAQC-1.02.24) mediante resonancia magnética nuclear (NMR). La actividad enzimática se refiere a la capacidad de una enzima a catalizar una reacción específica; en este caso una reacción de interesterificación. Se pesó 1 g de látex parcialmente purificado junto con una mezcla de 14.4 g de soya Refinada-Blanqueada-Desodorizada (RBD) y 5.6 g de soya hidrogenada (H₂). La reacción se realizó a 50 °C por 30 minutos para luego medir el contenido de grasa sólida (%SFC) a 40 °C (N40) al final. También se preparó un blanco de la mezcla sin catalizador y se realiza una diferencia absoluta entre %SFC del blanco y la muestra. Con las siguientes fórmulas se obtiene el valor de actividad enzimático de interesterificación:

1 UI = 0,01% disminución de triestearina/min g enzima

1% SFC = 12.6 % triestearina/min bajo las condiciones explicadas

%SFC/min = [SFC40(B) – SFC40(M)]/30 min

% Triestearin /min = %SFC/min *12.6

$$UI = [\%Triestearin/min]/0,01$$

$$UI/g = IUN/peso \text{ del látex (g)}$$

Una unidad de actividad enzimática (UI) se definió como la cantidad de enzima que cataliza la conversión de 0.01 % de triestearina / min *g bajo las condiciones de ensayo estándar a 50 °C. En este proceso específico, para lograr que el contenido de sólidos de la grasa cambie un 1%, la enzima debe haber procesado o disminuido la triestearina en un 12,6% por cada minuto de reacción.

2.5 Reacción de Interesterificación de aceite de palma híbrida mediante extracto enzimático del látex de babaco (*Carica pentagona*)

La interesterificación enzimática (EIE) utiliza una lipasa como biocatalizador con especificidad y selectividad para producir los lípidos deseados. El reordenamiento de las posiciones de los ácidos grasos en el esqueleto de glicerol tras la interesterificación ayuda a modificar las características fisicoquímicas, funcionales, oxidativas y nutricionales de las grasas y aceites.

Debido a su alta eficiencia en la reacción de intercambio de acilos, su proceso de reacción sencillo, flexibilidad, carácter ecológico y generación de menos subproductos, la EIE está ganando más atención como enfoque de modificación de lípidos sustitutivo (Singh et al., 2022).

El diseño experimental se fundamentó en la modulación del microentorno enzimático para desplazar el equilibrio hacia la síntesis. Según Cambon et al. (2008), la lipasa de *Carica pentagona* presenta una marcada especificidad por ácidos grasos de cadena larga y una regioselectividad sn-1,3, características esenciales para la obtención de lípidos estructurados. (Cambon et al., 2008).

La reacción se diseñó para favorecer la reacción de interesterificación sobre la hidrólisis mediante el control estricto de la actividad de agua. En este caso menor a 0.2. Dado que el látex de *C. pentagona* posee una alta capacidad catalítica intrínseca, el uso de aceite de palma refinado, blanqueado y desodorizado (RBD), un medio esencialmente anhidro, actúa como un limitante de reactivo para la hidrólisis. Al restringir la disponibilidad de moléculas

de agua, el complejo acil-enzima se ve forzado a reaccionar con grupos hidroxilo de otros acilglicéridos, promoviendo la interesterificación (Villeneuve, 2003) (Peng et al., 2020).

El rango térmico escogido de 40-60 °C responde a una doble necesidad: reducir la viscosidad cinemática del aceite de palma para mejorar la transferencia de masa y operar dentro del umbral de termoestabilidad del látex, el cual mantiene su integridad estructural en este intervalo (Cambon et al., 2008)

Finalmente, el tiempo de 5 horas y la agitación de 130 rpm aseguran que el sistema alcance un equilibrio cinético de intercambio de acilos. Conforme a los modelos de sistemas libres de solvente (Urquijo Rodriguez et al., 2020). Este periodo es suficiente para maximizar la reestructuración de los triacilglicéridos sin inducir una acumulación significativa de ácidos grasos libres (AGL). La agitación moderada es crítica para mitigar la resistencia a la difusión en la interfase sólido-líquido, minimizando simultáneamente el esfuerzo de cizalla (shear stress) que podrían derivar en la destrucción de la enzima. (Urquijo Rodriguez et al., 2020)

Bajo este estándar se diseñaron las condiciones de reacción y se llevaron a cabo las condiciones de reacción a 3 diferentes temperaturas 40 °C, 50° C Y 60 °C. Las reacciones se llevaron a cabo en un volumen total de 25 g de sustrato y se inició por la adición de látex de Carica pentagona a las unidades enzimáticas de la tabla:

UNIDADES INTERESTERIFICACIÓN (UI/g)	TEMPERATURAS (°C)	Nº DE RÉPLICAS
0,5	40 °C	3
1	40 °C	3
2	40 °C	3
0,5	50 °C	3
1	50 °C	3
2	50 °C	3
0,5	60 °C	3
1	60 °C	3
2	60 °C	3

Combinación de temperatura y unidades de interesterificación para las reacciones de interesterificación de aceite de palma OXG

2.6. Análisis Estadístico

Se realizó un diseño experimental factorial para evaluar el efecto de diferentes unidades de actividad enzimática (0.5, 1.0 y 2.0 UI/g) a diferentes temperaturas (40, 50 y 60 °C) en la reacción de interesterificación catalizada por el extracto enzimático del látex de *Carica pentagona*. Todos los análisis se realizaron por triplicado resultando en un total de 27 experimentos individuales. Los resultados obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un 95% de confiabilidad. Se realizó el análisis de comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$). Los datos se analizaron mediante el software estadístico Infostat 2020.

Resultados y discusión

Actividad enzimática

La actividad enzimática del látex parcialmente purificado fue de 150 UI/g.

La Tabla 1 muestra el contenido de grasa sólida (%SFC) a cinco temperaturas de cristalización (10, 20, 30, 35 y 40 °C) para nueve combinaciones de temperatura de reacción (40, 50 y 60 °C) y concentración enzimática (0.5, 1.0 y 2.0 UI/g). El patrón más destacado es la tendencia descendente del %SFC a medida que aumenta la temperatura de medición, lo que es esperado en cualquier grasa cristalizada, pero la magnitud de esa caída varía significativamente según las condiciones de reacción. A 10 °C, los valores más bajos de %SFC se encontraron en el tratamiento 40 °C – 2 UI/g (19.21%) y los más altos en los tratamientos a 50 °C – 0.5 UI/g y 60 °C – 0.5 UI/g (ambos con 25.9%), lo que indica que la mayor concentración enzimática a temperatura moderada produce el mayor grado de conversión, reflejado en una grasa con menos sólidos a baja temperatura y, por ende, más suave.

A temperaturas de medición más altas (35 y 40 °C), el comportamiento se invierte en términos de lo que es deseable para aplicaciones plásticas: el tratamiento 40 °C – 2 UI/g fue también el que mostró mayor %SFC a 35 °C (1.15%) y 40 °C (0.33%), valores estadísticamente superiores (grupo C–D en la prueba de Tukey), lo que indica mejor

estabilidad térmica y resistencia al derretimiento. En contraste, los tratamientos a mayor temperatura de reacción y menor dosis enzimática (50–60 °C, 0.5 UI/g) produjeron grasas con %SFC muy bajos a 35–40 °C (≈ 0.40 – 0.06%), cercanos al aceite sin interesterificar, evidenciando que las lipasas presentes en el látex de babaco pierden eficiencia a temperaturas elevadas. En general, la tabla demuestra que el extracto de *Carica pentagona* es capaz de modificar el perfil de solidificación del aceite de palma OXG, siendo el tratamiento a 40 °C con 2 UI/g el que mejor aproxima el comportamiento reológico más deseable para la formulación de grasas plásticas tipo margarina o shortening.

En el mundo de los aceites y las grasas para tener comportamientos plásticos se necesita que los valores a %SFC-10°C y %SFC-20°C bajen con la interesterificación y los valores a %SFC-35°C y %SFC-40°C se incrementen. Esto es porque la reducción de los valores de contenido de grasa sólida a bajas temperaturas 10°C y 20°C hace que la grasa sea más suave y untada a temperaturas de refrigeración o ambiente, evitando que sea demasiado dura o quebradiza. Paralelamente, el incremento de los valores de %SFC a altas temperaturas de 35°C y 40°C asegura que la grasa mantenga su estructura y ofrezca estabilidad térmica, evitando un rápido derretimiento y una sensación aceitosa en la boca. En esencia, esto crea una grasa con un rango de plasticidad ideal que es fácil de trabajar y estable a diferentes temperaturas de uso.

Tabla 1: Porcentajes de grasas sólidas (%SFC) a temperaturas de cristalización (10 °C, 20°C, 30°C, 35°C, 40°C) en función de temperatura y unidades enzimáticas.

Temperatura (°C)	Unidades enzimáticas (UI/g)	%SFC 10 °C	%SFC 20 °C	%SFC 30 °C	%SFC 35 °C	%SFC 40°C

40	0,5	23,95 ± 0,11 E	6,13 ± 0,09 C	1,59 ± 0,02 D	0,43 ± 0,02 A	0,01 ± 0,01 A
40	1	22,23 ± 0,13 C	5,83 ± 0,04 A	1,47 ± 0,02 C	0,89 ± 0,1 B	0,33 ± 0,01 D
40	2	19,21 ± 0,09 A	5,92 ± 0,05 AB	1,73 ± 0,02 E	1,15 ± 0,08 C	0,33 ± 0,01 D
50	0,5	25,9 ± 0,06 G	6,25 ± 0,05 C	1,61 ± 0,02 D	0,42 ± 0,01 A	0,05 ± 0,01 A
50	1	24,73 ± 0,18 F	6,19 ± 0,11 C	1,62 ± 0,03 D	0,52 ± 0,03 A	0,19 ± 0,02 B C
50	2	23,62 ± 0,14 D	6,27 ± 0,02 C	1,83 ± 0,05 F	0,95 ± 0,06 B	0,16 ± 0,06 B
60	0,5	25,9 ± 0,02 G	6,19 ± 0,11 C	1,55 ± 0,03 C D	0,4 ± 0,02 A	0,06 ± 0,01 A
60	1	24,82 ± 0,07 F	6,25 ± 0,03 C	1,29 ± 0,06 B	0,47 ± 0,02 A	0,19 ± 0,01 B C
60	2	21,17 ± 0,06 B	6,1 ± 0,01 BC	0,65 ± 0,04 A	0,79 ± 0,09 B	0,23 ± 0,01 C

Valores expresados como media \pm desviación estándar (n=3). Medias con una letra común dentro de la misma columna no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Investigaciones anteriores han demostrado que el látex de *Carica papaya* y el propio látex de babaco contienen lipasas y otras proteasas con aplicación en procesos de esterificación y alcoholólisis (Cambon et al., 2008) (Dhuique-Mayer et al., 2003), producción de ésteres metílicos para el desarrollo de biodiesel (Mazou et al., 2016) y en procesos de interesterificación para producción de leche materna (Tecelao et al., 2012). Sin embargo, el látex de *Carica pentagona* no ha sido estudiado en procesos de interesterificación. De acuerdo con la revisión de literatura realizada, esta es la primera investigación en donde se usa el látex de babaco como un biocatalizador específico en la interesterificación enzimática, ofreciendo una alternativa natural a enzimas costosas de origen microbiano.

En la figura 1, se puede notar que los resultados de Solid Fat Content (%SFC) a temperaturas de 10 °C, 30 °C y 35 °C del experimento de 40 °C y 2 UI/g fueron de 19.29 %, 1.70 %, 1.07%. mientras que para la enzima comercial a 60 °C y 2 UI/g a estas temperaturas de 10 °C, 30 °C y 35 °C son de 22.92%, 1.78% y 0.436%, Siendo los %SFC de palma OXG de entrada de 26%, 1,34 % y 0.22 %. Consecuentemente en la figura 2, se evidencia que el %SFC de la reacción con látex de *Carica pentagona* a 60°C y 2 UI/g a temperaturas de 10 °C, 30 °C y 35 °C fueron de 21.195 %, 0.654 %, 0,708 respectivamente. Estos resultados muestran que el látex de babaco (*Carica pentagona*) es una fuente promisoriosa y económica de enzimas lipolíticas, con potencial de actividad 1,3-regioespecífica comparable a la lipasa comercial de referencia, como la Lipasa Inmovilizada de *Thermomyces lanuginosus* (TLIM).

Los tratamientos de las figuras 1 y 2 fueron escogidos porque la enzima comercial TLIM, trabaja entre 40-70°C, entonces se propuso un estudio para comparar el desempeño del látex purificado parcialmente de *Carica pentagona* a un intervalo entre 40-60 °C. Debido a que la lipasa de *Carica pentagona* al ser familia de la *Carica Papaya*, no es tan termoestable como la TLIM (Perea et al., 2007) (Rivera & Sandoval, 2014), también se evaluó el efecto de la variación de concentraciones de actividad enzimática (0.5 a 2 UI/g)

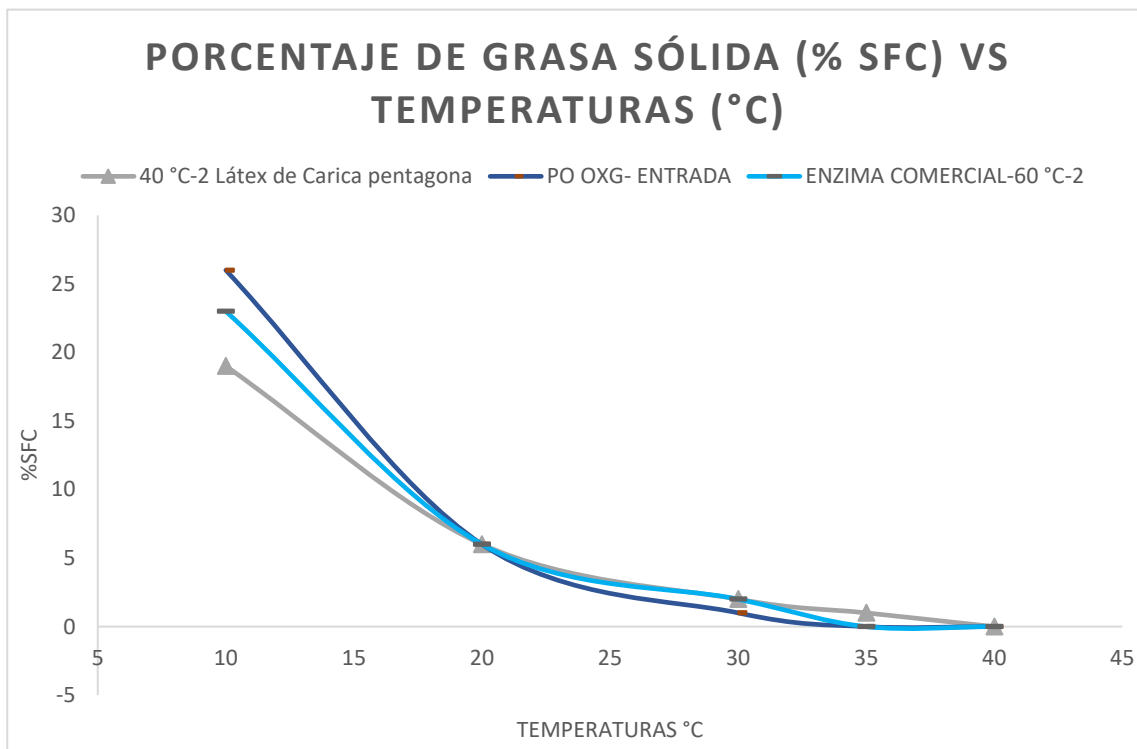


Figura 1: %SFC vs Temperaturas de los ensayos 40°C-2 UI/g, PO OXG-ENTRADA y enzima comercial a 60°C-2UI/g

Fuente: Elaboración propia. Gráfico de promedios de réplicas (n=3) de 40 °C-2 UI-/g y 60°C-2 UI-/g de porcentaje de grasa sólida vs temperatura con relación a enzima comercial y PO OXG de entrada.

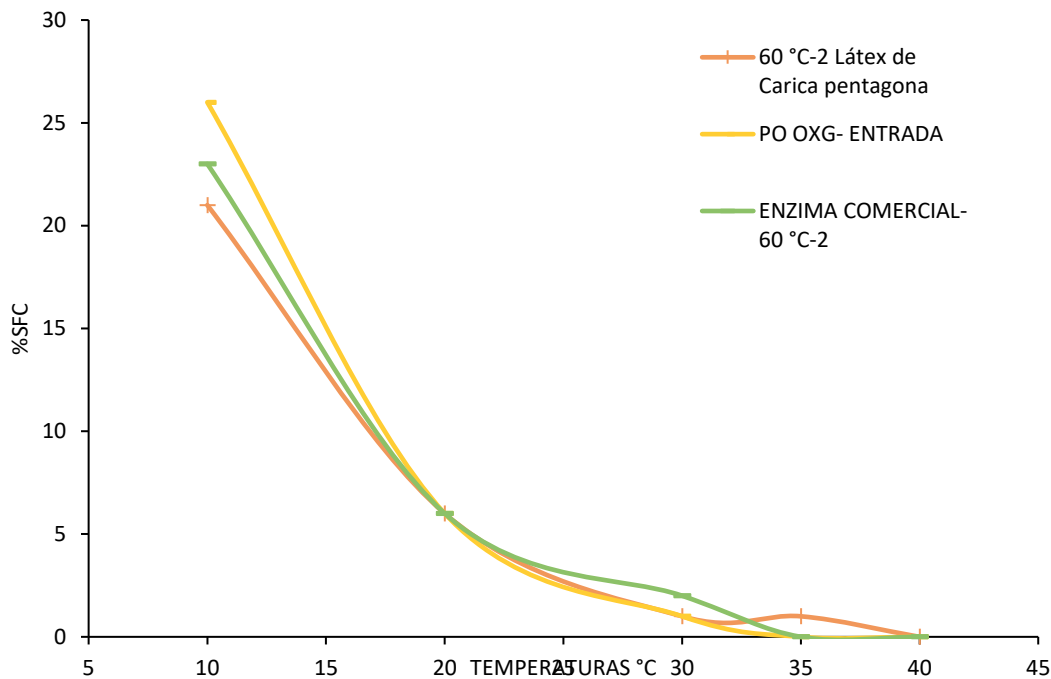


Figura 2: %SFC vs Temperaturas de los ensayos 60°C-2 UI/g, PO OXG-ENTRADA y enzima comercial a 60·C-2UI/g

Fuente: Elaboración propia. Gráfico de promedios de réplicas (n=3) de 60°C-2 UI-/g de porcentaje de grasa sólida vs temperatura con relación a enzima comercial y PO OXG de entrada.

Conclusiones

El extracto enzimático del látex de babaco (*Carica pentagona*) parcialmente purificado presento actividad enzimática de 150 UI/g para la interesterificación de aceite de palma. Los mejores resultados se obtuvieron a 40 °C y 2 UI/g de actividad enzimática con porcentajes de grasa sólida a 10 °C, 20 °C, 30 °C, 35 °C y 40 °C de 19.21%, 5.92%, 1.73%, 1.15% y 0.33 % respectivamente. La actividad de la enzima disminuyó a medida que se aumentó la temperatura del sistema.

La enzima comercial muestra un comportamiento de reacción similar al látex purificado de babaco, esta enzima trabaja a 60 °C, y con una concentración de 2 UI/g, con lo que se puede notar que el látex de babaco podría ser una alternativa adecuada para reacciones de interesterificación; este tipo de lipasas vegetales permiten discriminar entre diferentes tipos de ácidos grasos, lo cual las hace herramientas valiosas para la oleoquímica y la producción de alimentos funcionales.

1 References

- Abdelkafi, S., Barouh, N., Fouquet, B., Fendri, I., Pina, M., Scheirlinckx, F., Villeneuve, P., & Carrière, F. (2011). Carica papaya Lipase: A Naturally Immobilized Enzyme with Interesting Biochemical Properties. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66, 34–40. <https://doi.org/10.1007/s11130-010-0206-0>
- Alves, V., Furtado, G. D., & Alves Macedo, G. (2024). Lipases as Biocatalysts for Enzymatic Interesterification. In *Chemical and Enzymatic Interesterification for Food Lipid Production* (pp. 17-24). Springer Nature. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-67405-1_2
- Cambon, E., Rodriguez, J. A., Pina, M., Arondel, V., Carriere, F., Turon, F., Ruales, J., & Villeneuve, P. (2008). Characterization of typo-, regio-, and stereo-selectivities of babaco latex lipase in aqueous and organic media. *Biotechnology Letters*, 30, 769–774. <https://doi.org/10.1007/s10529-007-9603-3>
- Chandra, P., Enespa, Singh, R., & Arora, P. K. (2020). Microbial lipases and their industrial applications: a comprehensive review. *Microbial Cell Factories*, 19. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01428-8>
- Dhuique-Mayer, C., Villarreal, L., Caro, Y., Ruales, J., Villeneuve, P., & Pina, M. (. (2003). Lipase activity in alcoholysis and esterification reactions of crude latex from babaco fruit (*Carica pentagona*). *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 10(3) , 232-234.
- Ferreira-Dias, S. O. (2022). Bioprocess technologies for production of structured lipids as nutraceuticals. In *Current developments in biotechnology and bioengineering*. Elsevier, 209-237.
- Gómez-Calvo, A., Gallardo, M. E., & Ladero, M. (2022). Lipozyme® TL IM biocatalyst for castor oil FAME and triacetin production by interesterification: Activity, stability, and kinetics. *Catalysts*, 12(12), 1673. <https://doi.org/10.3390/catal12121673>
- Hasan, F., Shah, A. A., & Hameed, A. (2006). Industrial applications of microbial lipases. *Enzyme and Microbial technology*, 39(2), 235.
- Heinzl, G. C., Mota, D. A., Martinis, V., Martins, A. S., Soares, C. M., Osório, N., Gominho, J., Nampoothiri, K. M., Sukumaran, R. K., Pereira, H., & Ferreira-Dias, S. (2022). Integrated bioprocess for structured lipids, emulsifiers and biodiesel production using crude acidic olive pomace oils. *Bioresource Technology*, 346, 126646. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126646>
- Ismail, A. R., & Baek, K. H. (2020). Lipase immobilization with support materials, preparation techniques, and applications: Present and future aspects. , *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 1624-1639. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.021>
- Manzoor, S., Masoodi, F. A., Akhtar, G., & Rashid, R. (2024). Production of trans-free shortening by lipase catalysed interesterification using mustard oil and palm stearin: optimisation and characterisation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 13027-13043. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03315-1>
- Mazou, M., Djossou, A. J., Tchobo, F. P., Villeneuve, P., & Soumanou, M. M. (2016). Plant latex lipase as biocatalysts for biodiesel production. *African Journal of Biotechnology*, 15(28), 1487-1502. <https://doi.org/10.5897/ajb2015.14966>
- Miranda, F. C., Oliveira, K. S., Tardioli, P. W., Fernandez-Lafuente, R., & Guimaraes, J. R. (2024). Insights on the role of blocking agent on the properties of the lipase from *Thermomyces lanuginosus* immobilized on heterofunctional support for hydroesterification reactions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 275(0141-8130). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133555>
- Mota, D. A., Rajan, D., Heinzl, G. C., Osório, N. M., Gominho, J., Krause, L. C., Soares, C. M., & Madhavan, K. (2020). Production of low-calorie structured lipids from spent coffee grounds or olive pomace crude oils catalyzed by immobilized lipase in magnetic nanoparticles. *Bioresource Technology*, 307(0960-8524), 123223. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123223>
- Mursalim, M., Yernisa, Y., & Hizazi, A. (2024). Formulasi campuran olein minyak sawit untuk memproduksi shortening bebas lemak trans Formulation of palm oil olein mixture to produce trans-fat-free shortening. *Jurnal Teknologi & Industri Hasil Pertanian*.

- Okpe, A. (2022). A Comparative Study of Chemical Analysis of Locally Made and Refined Palm Kernel Oil (*Elaeis guineensis*). *Scienceopen preprints*.
- Ortega Afanador, V., Fontalvo Gómez, M., & Mendoza Meza, D. (2018). Comparación de diferentes fracciones del látex de *Carica papaya* L., y Novozyme 435 en la metanólisis del aceite de canola. *Revista de Ciencias*, 22(1). <https://doi.org/10.25100/rc.v22i1.7102>
- Peng, B., Chen, F., Liu, X., Hu, J.-N., Zheng, L.-F., Li, J., & Deng, Z.-Y. (2020). Trace water activity could improve the formation of 1,3-oleic-2-medium chain-rich triacylglycerols by promoting acyl migration in the lipase RM IM catalyzed interesterification. *Food Chemistry*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126130>.
- Perea, A., Amado, M., & Rodríguez, E. (2007). Obtención de biodiésel por transesterificación de aceite de palmiste utilizando lipasa de *Thermomyces lanuginosus*. *Fedepalma*, 28, 23–28.
- Pinyaphong, P., & Phutrakul, S. (2009). Synthesis of cocoa butter equivalent from palm oil by *Carica papaya* lipase-catalyzed interesterification. *Chiang Mai J. Sci.*, 36(3), 359-368. <https://doi.org/https://epg.science.cmu.ac.th/ejournal/journal-detail.php?id=191>
- Rivera, I., & Sandoval, G. (2014). Caracterización de diversas fracciones del látex *Carica papaya* como biocatalizadores en la hidrólisis de triglicéridos. *Grasas y aceites*, 65(1).
- Rivera, I., Mateos-Díaz, J. C., & Sandoval, G. (2012). Plant Lipases: Partial Purification of *Carica papaya* Lipase. Lipases and Phospholipases: Methods and Protocols. *Humana Press*, 861. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-61779-600-5_7
- Rivera-Botonares, R. S., Oliva-Cruz, S. M., & Tineo Flores, D. (2023). Extraction and purification of papain obtained from three native species of the genus *Vasconcellea*. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 25(2), 109-116. <https://doi.org/10.18271/ria.2023.447>
- Salgado, C. A., Santos, C. I., & Vanetti, M. C. (2022). Microbial lipases: Propitious biocatalysts for the food industry. *Food Bioscience*, 45, 2212-4292. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101509>.
- Singh, P. K., Chopra, R., Garg, M., Dhiman, A., & Dhyani, A. (2022). Enzymatic interesterification of vegetable oil: A review on physicochemical and functional properties, and its health effects. *Journal of Oleo Science*, 71(12), 1697-1709. <https://doi.org/10.5650/jos.ess22118>
- Sivakanthan, S., & Madhujith, T. (2020). Current trends in applications of enzymatic interesterification of fats and oils: A review. *LWT - Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109880>.
- Soares, C. M., Barbosa, M. S., Santos, S. B., Mattedi, S., Lima, Á. S., Pereira, M. M., & Ferreira-Dias, S. (2023). Production of human milk fat substitutes by lipase-catalyzed acidolysis: immobilization, synthesis, molecular docking and optimization. <https://doi.org/10.3390/catal13050825>
- Su, E., & Wei, D. (2014). Production of Fatty Acid Butyl Esters Using the Low Cost Naturally Immobilized *Carica papaya* Lipase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62. <https://doi.org/10.1021/jf501993v>
- Sulaiman, N. S., Sintang, M. D., Mantihal, S., Zaini, H. M., Munsu, E., Mamat, H., & Pindi, W. (2022). Balancing functional and health benefits of food products formulated with palm oil as oil sources. *Heliyon*, 8(10).
- Tecelao, C., Rivera, I., Sandoval, G., & Ferreira-Dias, S. (2012). *Carica papaya* latex: A low-cost biocatalyst for human milk fat substitutes production. *European journal of lipid science and technology*, 114(3), 266-276. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100226>
- Urquijo Rodríguez, M., Fontalvo Gómez, M. ..., Veloso de Paula, A., & Mendoza Meza, D. (2020). Hidrólisis enzimática del aceite de *Bactris guineensis* con fracciones del látex de *Carica papaya*: estudio del efecto de la temperatura, pH y concentración del sustrato. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(18\)70-81](https://doi.org/10.18684/BSAA(18)70-81)
- Verma, V., Singhal, G., Joshi, S., Choudhary, M., & Srivastava, N. (2022). Plant extracts as enzymes. In *Plant Extracts: Applications in the Food Industry*. *Academic Press*(Chapter 10), 209-223. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822475-5.00009-0>
- Villeneuve, P. (2003). Plant lipases and their applications in oils and fats modification. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ejlt.200390061>
- Wang, N., Wang, W., Su, Y., Zhang, J., Sun, B., & Ai, N. (2025). The current research status of immobilized lipase performance and its potential for application in food are developing toward green and healthy direction: A review. *Journal of Food Science*, 90(2), 70038. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70038>
- Zeng, Y., Shang, Z., Zheng, Z., Shi, N., Yang, B., Han, S., & Yan, J. (2024). A Review of Chemical Modification of Vegetable Oils and Their Applications. *Lubricants*, 12(5), 180.
- Zuin, J. C., Gandra, R. L., Ribeiro, A. P., Ract, J. N., Macedo, J. A., & Macedo, G. A. (2022). Comparing chemical and enzymatic synthesis of rich behenic lipids products: technological and nutritional potential. *Food Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.105821>
-