

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/minerva.v6i17.190>

# Obtención de grasas lubricantes a partir de la epoxidación del aceite de las semillas de Sacha Inchi

Fernando David García Pallo\*  
<https://orcid.org/0009-0006-6664-9285>  
fgarcia5251@utm.edu.ec  
Universidad Técnica de Manabí  
Portoviejo, Ecuador

Segundo García Muentes  
<https://orcid.org/0000-0002-8152-3406>  
segundo.garcia@utm.edu.ec  
Universidad Técnica de Manabí  
Portoviejo, Ecuador

Brando José Ponce Holguín  
<https://orcid.org/0009-0008-7636-4317>  
bponce2046@utm.edu.ec  
Universidad Técnica de Manabí  
Portoviejo, Ecuador

Manuel Saltos Giler  
<https://orcid.org/0000-0001-8908-5116>  
manuel.saltos@utm.edu.ec  
Universidad Técnica de Manabí  
Portoviejo, Ecuador

Gonzalo García Vincés  
<https://orcid.org/0000-0001-9819-7451>  
gonzalo.garcia@utm.edu.ec  
Universidad Técnica de Manabí  
Portoviejo, Ecuador

\*Autor de correspondencia: fgarcia5251@utm.edu.ec

Recibido (14/10/2024), Aceptado (08/01/2025)

**Resumen:** El presente estudio se enfoca en la obtención de grasas lubricantes a partir de la epoxidación del aceite extraído de las semillas de Sacha Inchi. La investigación aborda la creciente necesidad de alternativas sostenibles a los lubricantes tradicionales a base de petróleo, esto mediante el aprovechamiento de las propiedades de la semilla del Sacha Inchi. Mediante un proceso de epoxidación, se modificó químicamente el aceite para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y adaptarlo a aplicaciones como lubricante. Se incluyó el diseño experimental para optimizar las condiciones de reacción, evaluando factores como la concentración de reactivos, la temperatura y el tiempo de reacción. Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad de esta semilla como una opción sostenible y efectiva en la formulación de grasas lubricantes, concluyendo que este posee características físico-químicas favorables tanto en su forma cruda como epoxidada y hallándose dentro de las normativas INEN e ISO especificadas para este tipo de grasas.

**Palabras clave:** aceites vegetales, biolubricantes, química verde, sostenibilidad.

Obtaining lubricating greases from the epoxidation of Sacha Inchi seed oil

**Abstract.-** This study focuses on the production of lubricant fats from the epoxidation of oil extracted from Sacha Inchi seeds. The research addresses the growing need for sustainable alternatives to traditional petroleum-based lubricants by leveraging the properties of the Sacha Inchi seed. Through an epoxidation process, the oil was chemically modified to enhance its physicochemical properties and adapt it for lubricant applications. An experimental design was implemented to optimize the reaction conditions, evaluating factors such as reactant concentration, temperature, and reaction time. The results demonstrated the viability of this seed as a sustainable and effective option in the formulation of lubricant fats, concluding that it has favorable physicochemical characteristics both in its crude and epoxidized forms and complies with the INEN and ISO standards for such lubricants.

**Keywords:** vegetable oils, biolubricants, green chemistry, sustainability.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria está cada vez más interesada en el desarrollo de productos que sean sostenibles y que minimicen la dependencia de recursos no renovables. Los aceites vegetales se utilizan ampliamente en la producción de alimentos en diferentes campos: como el doméstico, el comercial o el industrial [1]. Esta es una realidad sobre todo en Latinoamérica, en donde las regulaciones y leyes ambientales para el uso y manejo de lubricantes no están establecidas de manera clara. Siendo esto una problemática, ya que podría provocar un claro deterioro del ecosistema, además de una reacción en cadena que eventualmente afectaría a la sociedad a largo plazo, presentando un alto riesgo de contraer ciertas enfermedades [2].

De manera global, el consumo anual promedio de lubricantes fluctúa de 30-40 millones de toneladas métricas, de los cuales el 95% son de origen mineral, a su vez se estima que alrededor del 75% de estos lubricantes usados tienen como último fin cuerpos de agua u otros ecosistemas, a través de fugas, derrames o accidentes industriales, lo que trae como consecuencia una alta contaminación ambiental que ya es preocupante al ser generalmente precedida por la presencia de componente con baja biodegradabilidad como lo son metales pesados y aditivos altamente tóxicos [3].

En el Ecuador, actualmente no existen registros estadísticos sobre la elaboración de aceites lubricantes, ya que, en su mayoría, estos son importado. Entre los años de 2017 y 2018, la importación de lubricantes alcanzó las 4.020.000 toneladas métricas, lo que representó un valor aproximado de 333 millones de dólares americanos [4]. Dichos datos sugieren que el desarrollo de la industria local de lubricantes podría constituirse una alternativa sostenible, especialmente si se basa en investigaciones que utilicen materia prima cultivada en Ecuador.

La materia prima vegetal del lubricante es derivada de semillas como la de Sacha Inchi (*Plukenetia Volubilis* L.) para la epoxidación se ofrece como una alternativa ideal a los recursos fósiles y ha sido propuesta como una fuente sostenible equivalente al petróleo. Entre las diferentes fuentes de biomasa se encuentran los aceites vegetales no comestibles, como el aceite de Sacha Inchi [4]. Los aceites epoxidados son fluidos viscosos de apariencia translúcida y una leve coloración blanca, están compuestos por triacilglicerol cuyas insaturaciones fueron sustituidas por la inclusión de una molécula de oxígeno que forma un anillo carbono oxígeno-carbono, confiriéndole la estructura de un éter cíclico. Los aceites epoxidados se usan principalmente en la elaboración de lubricantes, alcoholes, alcanos amidas, compuestos carbonílicos y glicoles. En el sector de los polímeros, los aceites epoxidados son empleados para elaborar resinas de poliuretano, poliéster y epóxicas [5].

En Ecuador hay 13 provincias que cultivan Sacha Inchi, entre las que se encuentran: Manabí, El Oro, Pichincha, Loja, Morona Santiago, Esmeraldas, Napo, Orellana, Pastaza, Santo Domingo de los Tsáchilas, Azuay, Cañar y Guayas; por tanto, desde el año 2021 se ha incentivado su producción pues representa grandes beneficios económicos [6]. El sachá Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) es una planta amazónica que presenta floración y fructificación continua, su aceite contiene un alto porcentaje de ácidos grasos poliinsaturados, considerados de gran importancia para la salud humana [7]. El ácido  $\alpha$ -linolénico es el principal ácido graso en este aceite, con porcentajes superiores al 51 %, seguido de los ácidos  $\alpha$ -linoleico y oleico, 2,3 [8].

De acuerdo con lo expuesto, se plantea la obtención de grasas lubricantes a partir de la epoxidación del aceite de las semillas de Sacha Inchi ("*Plukenetia volubilis* L"), del cantón "San Vicente" de la provincia de Manabí. Esta investigación busca brindar una alternativa al uso de lubricantes a base de petróleo, proponiendo un enfoque que aproveche recursos renovables y no tan conocidos como lo es las semillas de Sacha Inchi, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo de una futura industria local.

## II. DESARROLLO

El Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*), una planta nativa de la Amazonía peruana produce semillas ricas en aceites insaturados, principalmente ácidos grasos como el linoleico y el linolénico. Estas propiedades hacen que su aceite sea una excelente materia prima para procesos de modificación química orientados a la obtención de compuestos industriales como grasas lubricantes.

Por su parte, la epoxidación es una reacción química que introduce grupos epóxido (anillos oxiranos) en las moléculas de ácidos grasos insaturados, a partir de sus dobles enlaces carbono-carbono. Este proceso se lleva a cabo generalmente mediante la acción de un agente oxidante, como el ácido peracético o ácido performico, en condiciones controladas de temperatura y pH. El producto resultante, un aceite epoxidado, exhibe mejoras en estabilidad térmica, resistencia a la oxidación y características de viscosidad, lo cual lo hace adecuado para aplicaciones como lubricantes, plastificantes y resinas.

A partir del aceite de Sacha Inchi epoxidado, las grasas lubricantes se desarrollan mediante procesos adicionales de modificación, tales como la apertura controlada del anillo epóxido y la incorporación de aditivos estabilizantes. Estas grasas presentan propiedades deseables como alta capacidad de lubricación, resistencia a la degradación térmica y química, así como una menor huella ambiental en comparación con lubricantes derivados de petróleo. De esta manera, el aprovechamiento del aceite de Sacha Inchi para la obtención de grasas lubricantes no solo agrega valor a un recurso natural renovable, sino que también promueve prácticas de producción más sostenibles y reduce la dependencia de recursos fósiles. Esta alternativa verde es especialmente relevante en el contexto actual de transición hacia productos ecoamigables.

### A. Proceso de epoxidación del aceite de Sacha Inchi

La epoxidación del aceite de Sacha Inchi se desarrolla a través de varias etapas cuidadosamente controladas para asegurar la formación eficiente de los grupos epóxido (figura 1). Inicialmente, se lleva a cabo la preparación del sistema reactivo, en la cual se mezclan el aceite con un ácido carboxílico (como ácido acético) y un agente oxidante (generalmente peróxido de hidrógeno). Posteriormente, se inicia la formación in situ del ácido peracético mediante la reacción del ácido carboxílico con el peróxido, generando el oxidante activo responsable de atacar los dobles enlaces presentes en los ácidos grasos.

Una vez formado el agente epoxidante, se procede a la reacción de epoxidación, donde el ácido peracético interactúa con las insaturaciones del aceite, transformando los enlaces dobles en anillos de oxirano. Esta fase requiere un control estricto de la temperatura y la agitación para maximizar el rendimiento y minimizar la formación de subproductos indeseables. A continuación, se realiza la terminación de la reacción, que implica detener la actividad del oxidante mediante la adición de agentes neutralizantes o mediante lavados sucesivos con agua para eliminar residuos ácidos y peróxidos.

Finalmente, se efectúa la purificación del aceite epoxidado, la cual incluye procesos de separación de fases, secado y, en algunos casos, filtrado, con el objetivo de obtener un producto limpio, estable y apto para su posterior utilización en la formulación de grasas lubricantes. Cada una de estas fases es crítica para asegurar la calidad del producto final y su desempeño en aplicaciones industriales.



Fig. 1. Proceso de epoxidación del aceite de Sacha Inchi.

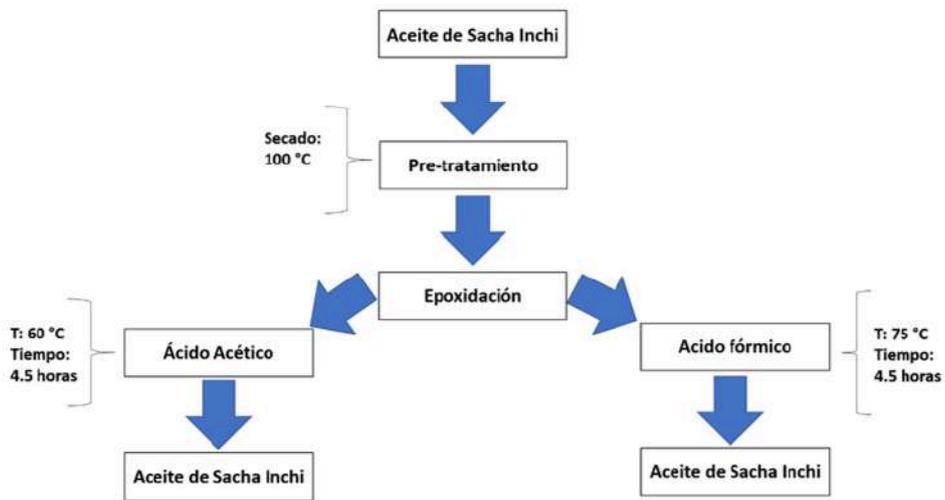
### III. METODOLOGÍA

El aceite de Sacha Inchi utilizado en este estudio fue obtenido durante la cosecha del mes de julio, proporcionado por un emprendimiento artesanal del cantón San Vicente (0.5976° S, 80.4194° O), ubicado en la provincia de Manabí. Para garantizar la pureza del material y evitar interferencias en el proceso de epoxidación, las muestras fueron sometidas a un pretratamiento de secado a 100 °C en una estufa Helos Heat, modelo H055N [9].

La epoxidación del aceite se llevó a cabo utilizando ácido acético (85%) y ácido fórmico (85%), siguiendo el procedimiento ilustrado en la figura 1. En cada ensayo, se emplearon 50 gramos de aceite de Sacha Inchi, manteniendo una temperatura constante de 75 °C. A la mezcla se añadieron 16,5 ml de ácido fórmico y 0,9 ml de ácido sulfúrico como catalizador, con un tiempo de reacción establecido de 4,5 horas. Finalizado este periodo, el pH de la mezcla fue ajustado mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) al 30%.

La separación de las fases acuosa y oleosa se realizó en un balón de 100 ml durante un reposo de 24 horas. Posteriormente, se llevaron a cabo varios lavados con agua destilada para eliminar impurezas residuales, y las muestras fueron secadas nuevamente en una estufa Helos modelo H055N a 105 °C. En este proceso, se empleó un volumen de 1,35 ml de ácido sulfúrico y 13,5 ml de hidróxido de sodio para catalizar y ajustar la reacción. Con respecto al análisis estadístico se utilizó como prueba paramétrica la ANOVA, además de un procedimiento para determinar la normalidad de los datos.

Antes de evaluar la ANOVA de dos factores, se evaluó el supuesto de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk, considerando el tamaño de la muestra. El análisis se realizó en Statgraphics Centurion XVIII, estableciendo como hipótesis nula la normalidad de los datos y como alternativa, su no normalidad.



**Fig. 2.** Esquema del proceso de obtención de grasas lubricantes a partir de aceite de las semillas de Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* "L").

En la tabla 1 se describen los análisis físico-químicos aplicados tanto al aceite crudo de Sacha Inchi, como al aceite epoxidado. Dichos ensayos fueron realizados según lo estipulan las normas INEN y ASTM.

**Tabla 1.** Análisis físico-químicos y bromatológicos aplicado al aceite crudo y epoxidado Sacha Inchi mediante métodos estandarizados.

Propiedades	Método	Norma
Índice de acidez (mg/KOH/g)	Titulación	NTC 2366
Índice de yodo (I <sub>2</sub> /100g)	Método de Wijs	EN 14111
Densidad 15 °C (Kg/m <sup>3</sup> )	Picnómetro	ASTM D-1217
Viscosidad cinemática 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	Viscosímetro de Ostwald	ASTM D-445
Humedad (%)	Pérdida por calentamiento	INEN 0039
Color	Cualitativo	-

Fuente: [9].

En la tabla 2 se describen las ecuaciones utilizadas para las principales propiedades, como el índice de acidez, de yodo, densidad, viscosidad y humedad.

**Tabla 2.** Propiedades y sus ecuaciones.

Propiedad	Ecuación	Descripción
Índice de acidez	$\begin{aligned} & \text{Índice de acidez} \\ & = \frac{V \times N \times EqKOH}{\text{Peso de la muestra (g)}} \quad (1) \end{aligned}$	Estima las propiedades físicas y químicas del aceite crudo y epoxidado. V: volumen de KOH consumido; N: normalidad del KOH (0,078); EqKOH: equivalente químico (56,1).
Índice de yodo	$= \frac{(Vs - Vn) \times N \times 12,69}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 100 \quad (2)$	Evalúa el contenido de insaturaciones en el aceite. Vs: volumen de tiosulfato en el blanco; Vn: volumen en la muestra; N: normalidad del tiosulfato.
Densidad	$\begin{aligned} & \text{Densidad} \\ & = \frac{\text{Peso del aceite (g)}}{\text{Volúmen del picnómetro}} \quad (3) \end{aligned}$	Determina la masa por unidad de volumen del aceite.
Viscosidad dinámica	$\begin{aligned} \text{Viscosidad dinámica} & = \frac{\eta H_2O}{\eta \text{ fluido}} \\ & = \frac{\rho H_2O t H_2O}{\rho \text{ fluido } t H_2O} \quad (4) \end{aligned}$	Calcula la viscosidad dinámica, donde $\rho$ es la densidad y $t$ el tiempo de flujo.
Viscosidad cinemática	$\text{Viscosidad cinemática} = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$	Calcula la viscosidad cinemática, siendo $\mu$ la viscosidad dinámica y $\rho$ la densidad del fluido.
Porcentaje de humedad	$= \left( 1 - \frac{\text{Peso de la muestra seca (g)}}{\text{Peso de la muestra húmeda (g)}} \right) \times 100 \quad (6)$	Determina el contenido de humedad en la muestra.

## IV. RESULTADOS

El aceite de Sacha Inchi caracterizado presentó algunas diferencias significativas en sus propiedades en comparación con investigaciones anteriores. La tabla 3 muestra los resultados de las propiedades físico-química y bromatológicas analizadas para el aceite crudo de Sacha Inchi, a su vez se realiza una comparación con lo reportado por otros autores debido que este tipo de aceite no tiene una norma establecida en cuanto a su uso para fines de grasas lubricantes.

**Tabla 3.** Resultados de la caracterización del aceite crudo de Sacha Inchi ("Plukenetia Volubilis L.")

Propiedades	Aceite crudo	Aceite crudo Reportado por otros autores	Referencias
Índice de acidez (mg/KOH/g)	1,25	0,38	[10]
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	902	910	
Viscosidad Cinemática 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	41,2	-	
Índice de yodo (I <sub>2</sub> /100g)	146,94	192,5	[11]
Humedad (%)	0,048	0,05	
Color	Amarillo intenso	-	-

En la tabla 4, se presentan los valores obtenidos de la caracterización físico- química realizada al aceite epoxidado, teniendo una variación poco significativa entre los dos ácidos utilizados, lo que podría ser un indicativo de que ambos tienen una alta eficacia en el proceso de epoxidación y la elección entre ellos dependería de factores como costo o disponibilidad.

**Tabla 4.** Resultados de la Epoxidación del aceite crudo de Sacha Inchi ("Plukenetia volubilis L").

Propiedades	Aceites Epoxidados				Referencia	Norma	Valoración
	Ácido Fórmico	Ácido Acético	Media	Desviación Estándar			
Índice de acidez (mg/KOH/g)	1,84	1,44	1,64	0,20	2 máx.	ASTM 1298	Sí cumple/No Cumple
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	974	998	986	24	920-1000	ASTM 1298	Sí Cumple en ambos
Humedad (%)	0,035	0,041	0,038	0,003	0,05 máx.	ASTM D6304	Sí cumple en ambos
Color	Ligeramente amarillo	Ligeramente amarillo	-	-	-	-	-

El ácido fórmico parece tener una ligera ventaja en términos de un índice de yodo más bajo y un índice de acidez más cercano al estándar máximo permitido. Esto podría indicar que el ácido fórmico es marginalmente más eficiente en la epoxidación, resultando en un aceite con menos insaturaciones (menor índice de yodo) y una acidez ligeramente menor. La diferencia en densidad entre los dos aceites es notable, con el ácido acético produciendo un aceite ligeramente más denso. Esto podría influir en la decisión de elección del ácido dependiendo del uso final del lubricante. Ambos aceites tienen niveles de humedad muy bajos, lo que es visualmente apreciable en el gráfico, subrayando que ambos procesos de epoxidación son eficaces en mantener la baja humedad del producto final.

La tabla 5 se describe un análisis de t student aplicado a los resultados obtenidos, teniendo que en todas propiedades se halló una diferencia significativa  $p > 0,05$ , a excepción de la densidad en donde no se halló diferencias significativas ( $p=0,4861$ ), lo que podría indicar que no existe una diferencia relevante en la densidad de las dos muestras de aceite con los diferentes ácidos utilizados.

**Tabla 5.** Análisis de t student.

Propiedad	Valor t	Valor p	Diferencia Significativa
Índice de acidez (mg/KOH/g)	6,32	0,0327	Sí
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	0,96	0,4861	No
Viscosidad cinemática (40°C)	3,55	0,0129	Sí
Índice de yodo (I <sub>2</sub> /100g)	9,93	0,0000	Sí
Humedad (%)	7,25	0,0016	Sí

La muestra de aceite de Sacha Inchi presentó un índice de acidez mayor (1,25 mg/KOH/g) que el reportado por Paucar et al. [12](0,38 mg/KOH/g), lo que indica un mayor contenido de ácidos grasos libres presentes en el aceite, esto puede deberse a distintos factores entre los que destacan la calidad de materia prima, las condiciones de extracción del aceite y también la degradación oxidativa que este haya sufrido, si el aceite ha sido almacenado por un tiempo prolongado puede provocar una hidrólisis de los triglicéridos, liberando con ello más ácidos libres.

Se obtuvo una densidad de 902 kg/m<sup>3</sup>, considerándose un aceite con buena composición, similar a lo reportado por otros autores. En la investigación de Corach [13], se obtuvo un valor de 952,3 kg/m<sup>3</sup> utilizando aceite de oliva, la diferencia reside en que predomina el ácido oleico (un ácido graso monoinsaturado), lo que contribuye a su mayor densidad en comparación con el aceite de Sacha Inchi, que tiene un alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados como el ácido alfa-linolénico. Según la norma técnica ecuatoriana INEN (2014) la densidad debería tener un mínimo de 926 y máximo de 931, sin embargo, esta norma no es clara con respecto a si además de aplicar para el rango en que debe estar para consumo humano, también es aplicable para su posterior uso en grasas lubricantes.

La viscosidad cinemática obtenida del aceite crudo fue de 41,2 mm<sup>2</sup>/s, aquel valor se puede constatar en la investigación de Mejía [14] que obtuvo un valor de 41,639; además en comparación a los otros tipos de aceites vegetales, éste posee una mayor viscosidad; ya que en este tipo de aceite predomina más el ácido linoleico, un ácido graso que le brinda la propiedad de ser más viscoso.

El valor obtenido de índice de yodo en el aceite crudo es ligeramente bajo respecto a valores establecidos por (NTP 151.400, 2009) que anuncia un intervalo entre 176-186 g de I<sub>2</sub>/100g de grasa. Pérez-Romero [15], que en su trabajo de investigación obtuvieron un índice de yodo de 186,25 g de I<sub>2</sub>/100g, estas variaciones pueden deberse al tipo de extracción de aceite que usaron. Una mayor variación en el índice de yodo indica fluctuaciones en la cantidad de dobles enlaces, lo que es crucial para la epoxidación, ya que estos dobles enlaces son los sitios reactivos para la formación de epóxidos. Si el índice de yodo es bajo, habrá menos sitios disponibles para la epoxidación, resultando en un menor rendimiento de epóxidos.

El contenido de humedad es bajo (0,048%), alineado con otros estudios, lo que es favorable para la estabilidad del aceite. Aranda et al. [16], obtuvieron un valor similar al de esta investigación de 0,05%, casi al límite de lo recomendable. Una alta humedad en el aceite puede interferir con la epoxidación al promover reacciones secundarias, como la hidrólisis de los epóxidos formados, lo que reduce la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. Además, la presencia de agua puede catalizar la descomposición de los reactivos utilizados, comprometiendo el rendimiento del proceso.

El aceite de Sacha Inchi tiene un color amarillo debido a la presencia de carotenoides y otros pigmentos naturales. Este color puede ser más intenso en aceites no refinados o menos procesados, como en este caso era un aceite artesanal su color no podía ser tan claro al no haber pasado por un proceso de refinación industrial, es decir era un aceite crudo.

Se evidenció en la tabla 3 que el aceite epoxidado con ácido fórmico está dentro de la norma, mientras que el aceite epoxidado con ácido acético está fuera de la norma ASTM 1298 que establece un valor máximo de 2 mg/KOH/g. Sin embargo, en investigaciones como la de Baque et al. [9], en el que usaron ácido fórmico para la epoxidación de un aceite vegetal obtuvieron un valor de 18,94. Un aceite epoxidado no debe tener un índice de acidez alto porque los ácidos libres presentes pueden catalizar la apertura de los anillos epóxidos, lo que conduce a la formación de compuestos no deseados y reduce la estabilidad y calidad del aceite epoxidado.

Los resultados de la media de la densidad medidos a 27°C para el aceite epoxidado obtenido a partir del ácido fórmico y del ácido acético, cuyos valores son 974 y 998 kg/m<sup>3</sup> respectivamente; muestran un aumento que se debe principalmente a la estructura y composición de ambos ácidos cuya reacción conlleva a la formación de anillos aromáticos en la estructura de los triglicéridos del aceite crudo; estos anillos que tienen en su estructura un átomo de oxígeno provoca un incremento de las fuerzas intermoleculares tipo dipolo-dipolo llevando así al aumento de esta propiedad [17]. En ambos aceites la densidad se encuentra dentro del límite que indica la norma ASTM D-1298, que especifica un valor máximo de 920-1000kg/m<sup>3</sup> para su uso como lubricantes en motores a diésel. Un cambio en la densidad puede indicar alteraciones en la estructura del aceite después del proceso de epoxidación. Un aceite con una densidad demasiado baja o alta puede tener propiedades físicas y químicas diferentes a las esperadas, lo que puede afectar su desempeño en aplicaciones específicas.

La viscosidad obtenida del aceite epoxidado con ácido fórmico fue de 69,3 mm<sup>2</sup>/s y del aceite epoxidado con ácido acético fue de 72,5 mm<sup>2</sup>/s; esta variación entre ambos aceites es causado básicamente por la reacción que se produce entre los ácidos grasos (linoleicos) y con el tipo de ácido y también por el aumento de la masa molar del aceite epoxidado [18]. De igual manera, ambos resultados están entre el límite que denota la norma ISO para el uso de lubricante ya que el valor máximo permisible es de 74,8 mm<sup>2</sup>/s, de manera que su empleo es óptimo en los distintos equipos de engranaje, bisagras, rodamientos, entre otras aplicaciones de alta viscosidad.

El índice de yodo de los aceites epoxidados se reducen considerablemente a 29,81 (para el ácido fórmico) y 36,51 (para el ácido acético), puesto que es un indicativo que hubo una conversión parcial de los enlaces dobles a grupos epoxi [19]. De acuerdo a la norma EN 14111, los índices de yodos obtenidos están dentro del rango máximo de 120. Un aceite epoxidado debe tener un índice de yodo bajo porque un alto índice de yodo indica una alta insaturación, lo que significa que hay muchos dobles enlaces en los ácidos grasos. Estos enlaces insaturados son reactivos y pueden llevar a una mayor formación de productos secundarios no deseados durante la epoxidación, como la oxidación o la formación de compuestos inestables. Un índice de yodo bajo, en cambio, sugiere que el aceite ya ha sido saturado, resultando en un producto más estable y con una mejor calidad en el proceso de epoxidación.

El porcentaje de humedad disminuyó notablemente en los dos aceites epoxidados (0,035 para el ácido fórmico y 0,041 para el ácido acético), de modo que ambos valores se encuentran dentro del límite que sugiere la norma ASTM D63304 [20], para la utilización de lubricantes en las plantas de producción y aplicaciones mecánicas. Aranda et al. [16], en su investigación sobre obtención y evaluación de epóxidos, obtuvo una humedad de 0,08% con aceite de palma y 0,07% con aceite de soya, esto podría variar por muchos factores como las condiciones durante la epoxidación, el tipo de reactivos y el método de secado, que pueden afectar el contenido de humedad.

El color del aceite epoxidado no suele estar regulado por normas específicas como ocurre con otros parámetros físico-químicos más críticos. Sin embargo, el color puede ser un indicador de la calidad, el color visualizado en este caso fue ligeramente amarillo, considerándolo aceptable ya que no afectó negativamente a las propiedades físico-químicas del lubricante.

## CONCLUSIONES

Se pudo demostrar que el aceite de Sacha Inchi presenta características físico-químicas favorables tanto en su forma cruda como epoxidada. Tras el proceso de epoxidación, tanto el ácido fórmico como el ácido acético resultan en aceites con índices de yodo bajos, lo que indica una conversión efectiva de enlaces insaturados a epóxidos, y una baja humedad, lo que favorece la estabilidad del producto final. Sin embargo, el ácido fórmico presenta una ligera ventaja en términos de un índice de yodo más bajo y un índice de acidez más cercano al estándar máximo permitido, sugiriendo una mayor eficiencia en la epoxidación.

Se pudo confirmar que ambos aceites epoxidados cumplen con los límites estipulados por las normativas de densidad y viscosidad para lubricantes, pero la elección entre los dos ácidos también dependerá de las aplicaciones específicas del lubricante. Este estudio presenta una base sólida para futuras investigaciones orientadas a la optimización del proceso y la implementación comercial del aceite de Sacha Inchi en la industria de lubricantes ecológicos.

## REFERENCIAS

- [1] O. Cabrera-Blanco, V. A. Olgún-Jiménez, C. P. Bernal-Villavicencio, V. L. Montañó-Roldan y M. Cuello-Pérez, "Obtención de bio-grasa lubricante a partir del aceite vegetal usado en la cocina," *Tecnol. Quím.*, vol. 43, no. 1, pp. 101-120, 2023.
- [2] M. J. Mateus-Cruz, L. E. Trujillo-Toscano y M. I. Meza-Chavarro, "Análisis PESTEL en el contexto actual de los lubricantes térmicos en América Latina," *Mundo FESC*, vol. 11, no. 21, pp. 221-239, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.61799/2216-0388.804>
- [3] J. Sánchez-Hechavarría et al., "Propiedades físicoquímicas y tribológicas del aceite de *Jatropha curcas* L. epoxidado," *Tecnol. Quím.*, 2023. [En línea]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852023000100204&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852023000100204&script=sci_arttext&tlng=pt)
- [4] L. López-Zambrano, G. Zambrano-Moreira, S. García-Muentes, G. Burgos-Briones y G. García-Vinces, "Epoxidación de biodiesel obtenido a partir del aceite de la semilla *Jatropha Curcas* L, de la provincia de Manabí - Ecuador," *Rev. Científica INGENIAR*, vol. 5, no. 10, pp. 47-63, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.46296/IG.V5I10.0062>
- [5] E. E. Origlia, S. G. Casuscelli y A. L. Cánepa, "Síntesis de materiales como catalizadores en la epoxidación de FAME's obtenidos de aceite de ricino," *AJEA*, vol. 4, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.33414/AJEA.4.373.2019>
- [6] L. M. Ramírez Jiménez, "Modelo cinético para la reacción de epoxidación de aceite vegetal usado," 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77805>
- [7] J. Alarcón, K. Helguero y S. S. RECIAMUC, "Aceite de Sacha inchi: potenciador de exportaciones no tradicionales en el Ecuador," *Reciamuc.com*, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.26820/reciamuc/5.\(1\).ene.2021.491-510](https://doi.org/10.26820/reciamuc/5.(1).ene.2021.491-510)

- [8] L. M. Soto et al., "Caracterización de los compuestos de aroma del aceite de sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) por HS-SPME-GC-MS-O," 2019. [En línea]. Disponible en: 3] M. C. H. López, J. L. S. Román y J. D. C. V. González, "Estrategias de modelado del lenguaje para mejorar las habilidades de expresión oral," Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional, vol. 9, no. 1, pp. 1235–1253, 2024.
- [9] R. A. Rivera, "Evaluación de la vida útil de los aceites de Sacha Inchi (*Plukenetia huayllabambana* y *Plukenetia volubilis*) microencapsulados," 2019. [En línea]. Disponible en: 3] M. C. H. López, J. L. S. Román y J. D. C. V. González, "Estrategias de modelado del lenguaje para mejorar las habilidades de expresión oral," Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional, vol. 9, no. 1, pp. 1235–1253, 2024.
- [10] G. P. Baque, A. F. Intriago, S. M. García, G. B. Burgos y G. V. García, "Epoxidación de aceite de higuera (*Ricinus communis*) de la provincia de Manabí-Ecuador," Dialnet.unirioja.es, 2023. [En línea]. Disponible en: 3] M. C. H. López, J. L. S. Román y J. D. C. V. González, "Estrategias de modelado del lenguaje para mejorar las habilidades de expresión oral," Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional, vol. 9, no. 1, pp. 1235–1253, 2024.
- [11] R. Hidalgo et al., "Caracterización del aceite de la semilla de Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) del cantón San Vicente, Manabí, Ecuador, obtenida mediante procesos no," Rev. Ciencias, 2019. [En línea]. Disponible en: 3] M. C. H. López, J. L. S. Román y J. D. C. V. González, "Estrategias de modelado del lenguaje para mejorar las habilidades de expresión oral," Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional, vol. 9, no. 1, pp. 1235–1253, 2024.
- [12] L. Paucar-Menacho, R. Salvador-Reyes, J. Guillem-Sanchez, J. Capa-Robles y C. Moreno-Rojo, "Estudio comparativo de las características físico-químicas del aceite de sacha inchi (*Plukenetia volubilis*), aceite de oliva (*Olea europaea*) y aceite crudo de pescado," Scientia Agropecuaria, pp. 279–290, 2015.
- [13] J. Corach, "Propiedades eléctricas de biodiesel, aceites vegetales y sus mezclas con gasoil: Correlación con otras características físico-químicas y su aplicación a la tecnología de biocombustibles," 2018.
- [14] G. H. Mejía, J. Moreno, and D. P. Lopez, "Transesterificación de aceite de higuera crudo utilizando catalizadores heterogéneos: estudio preliminar," DYNA, rev. Fac. Minas, Univ. Nac. Colomb., Sede Medellín, vol. 78, no. 169, pp. 176–181, 2011.
- [15] L. F. Pérez Romero, "Evaluación de cuatro temperaturas de prensado en la calidad del aceite virgen de sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.)," 2008.
- [16] C. J. Aranda-Ventura, J. A. Aranda Ventura, J. Aranda-Ventura, J. Villacrés-Vallejo y F. Rios-Isern, "Composición química, características físico-químicas, trazas metálicas y evaluación genotóxica del aceite de *Plukenetia volubilis* L. (sacha inchi)," Integrativa, vol. 4, no. 1, pp. 4–14, 2019. [En línea]. Disponible en: 3] M. C. H. López, J. L. S. Román y J. D. C. V. González, "Estrategias de modelado del lenguaje para mejorar las habilidades de expresión oral," Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional, vol. 9, no. 1, pp. 1235–1253, 2024.
- [17] Í. Rios et al., "Chemical modification of castor oil fatty acids (*Ricinus communis*) for biolubricant applications: An alternative for Brazil's green market," Ind. Crops Prod., vol. 145, 2019.
- [18] J. Franco-Pérez, M. Díaz-Velásquez, F. Lafargue-Pérez y Y. Santos-Mora, "Epoxidación del ácido vegetal de *Jatropha Curcas* L. con ácido peracético," Tecnol. Quím., vol. 38, no. 2, pp. 380–385, 2018.
- [19] S. G. Jiménez, "Obtención y evaluación de epóxidos provenientes de mezclas de aceites de palma y soya para su uso como plastificante en formulaciones de PVC flexible," 2020. [En línea]. Disponible en: 3] M. C. H. López, J. L. S. Román y J. D. C. V. González, "Estrategias de modelado del lenguaje para mejorar las habilidades de expresión oral," Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional, vol. 9, no. 1, pp. 1235–1253, 2024.
- [20] NTP 151.400, "Norma Técnica Peruana para Aceite de Sacha Inchi del género *Plukenetia*," 2009.