

# Oil extraction from fried vegetable snack waste: technical evaluation for second-generation biodiesel production

La Torre Aponte Maria Luz, Msc<sup>1</sup> [ORCID: 0000-0002-5537-3272], Sánchez Aliaga Cesar Victor, Msc<sup>2</sup> [ORCID: 0009-0008-4947-3577] y Silva Paucar Fernando Percy, Msc<sup>3</sup> [ORCID: 0000-0001-9246-6331]  
Universidad Mayor de San Marcos<sup>1</sup> y Universidad Privada del Norte<sup>2,3</sup>, [mlatorreap@unmsm.edu.pe](mailto:mlatorreap@unmsm.edu.pe)<sup>1</sup>,  
[cesar.sancheza@upn.edu.pe](mailto:cesar.sancheza@upn.edu.pe)<sup>2</sup> y [fernando.paucar@upn.pe](mailto:fernando.paucar@upn.pe)<sup>3</sup>

**Abstract:** Sustainable biodiesel production requires raw material sources that do not compete with the food chain. This study evaluated the technical feasibility of recovering sunflower oil from the waste products of fried vegetable snacks (potato, corn, and plantain) for use as an input in biodiesel production. The process was developed in two stages: (i) solid-liquid extraction with 96% ethanol at the laboratory level to determine the lipid content, and (ii) scale-up to pilot scale to evaluate yields and process stability. The results showed oil contents between 18.1% and 23.0% in the laboratory, depending on the type of snack. The pilot scale demonstrated equal or higher yields (up to 30% for potato chips), validating the efficiency of the process at a larger scale. The recovered oil, characterized as frying crude, has characteristics compatible with conventional transesterification routes (alkaline or acid) for biodiesel production. It is estimated that 100 kg of waste can generate approximately 25.5 kg of biodiesel, considering a conversion efficiency of 85%. This work positions the waste from fried snacks as a viable and scalable source of oil for second-generation biodiesel, contributing to the circular economy through the valorization of industrial waste.

**Keywords:** Second-generation biodiesel, oil extraction, fried snacks, pilot scale-up.

# Extracción de aceite a partir de mermas de snacks fritos vegetales: evaluación técnica para la producción de biodiésel de segunda generación

La Torre Aponte Maria Luz, Msc<sup>1</sup> [ORCID: 0000-0002-5537-3272], Sánchez Aliaga Cesar Victor, Msc<sup>2</sup> [ORCID: 0009-0008-4947-3577] y Silva Paucar Fernando Percy, Msc<sup>3</sup> [ORCID: 0000-0001-9246-6331]  
Universidad Mayor de San Marcos<sup>1</sup> y Universidad Privada del Norte<sup>2,3</sup>, mlatorreap@unmsm.edu.pe<sup>1</sup>, cesar.sancheza@upn.edu.pe<sup>2</sup> y fernando.paucar@upn.pe<sup>3</sup>

**Resumen:** La producción sostenible de biodiésel requiere fuentes de materia prima que no compitan con la cadena alimentaria. Este estudio evaluó la viabilidad técnica de recuperar aceite de girasol a partir de mermas de snacks fritos vegetales (papa, maíz y plátano) para su uso como insumo en la producción de biodiésel. El proceso se desarrolló en dos etapas: (i) extracción sólido-líquido con etanol al 96% a nivel de laboratorio para determinar el contenido lipídico, y (ii) escalamiento a nivel piloto para evaluar rendimientos y estabilidad del proceso. Los resultados mostraron contenidos de aceite entre 18.1% y 23.0% en laboratorio, dependiendo del tipo de snack. El escalamiento piloto demostró rendimientos iguales o superiores (hasta 30% para papa frita), validando la eficiencia del proceso a mayor escala. El aceite recuperado, caracterizado como crudo de fritura, presenta características compatibles con rutas convencionales de transesterificación (alcalina o ácida) para la producción de biodiésel. Se estima que 100 kg de mermas pueden generar aproximadamente 25.5–28 kg de biodiésel, considerando una eficiencia de conversión del 85%. Este trabajo posiciona a las mermas de snacks fritos como una fuente viable y escalable de aceite para biodiésel de segunda generación, contribuyendo a la economía circular mediante la valorización de residuos industriales.

**Palabras clave:** Biodiésel de segunda generación, extracción de aceite, snacks fritos, escalamiento piloto.

## I. INTRODUCCIÓN

La producción de biodiésel ha ganado relevancia global como alternativa renovable a los combustibles fósiles. Sin embargo, su sostenibilidad a largo plazo enfrenta el desafío crítico de la materia prima, donde el uso predominante de aceites vegetales vírgenes genera competencia con el sector alimentario, incrementa costos y limita la escalabilidad [2]. En este contexto, los biocombustibles de segunda generación, derivados de residuos y materiales no alimentarios, emergen como una solución estratégica [1],[3],[4],[11].

La industria de snacks fritos vegetales es un sector en crecimiento que genera volúmenes significativos de mermas (productos no conformes, fragmentos o sobrantes de proceso). Estas mermas, aunque no son aptas para comercialización, conservan una fracción considerable del aceite de fritura utilizado, principalmente aceite de girasol. Este residuo representa una fuente lipídica subvalorada cuyo potencial para la producción de biodiésel no ha sido ampliamente documentado.

La literatura actual presenta una brecha importante: mientras que abundan investigaciones sobre aceites de fritura usados (UCO) líquidos [5], existe un vacío en el aprovechamiento de mermas sólidas y en la validación técnica de su procesamiento a escala piloto. La mayoría de los estudios se limitan a caracterizaciones físico-químicas en laboratorio, omitiendo los retos de extracción y transesterificación integrados en una cadena de valor industrial [8].

Para entender la viabilidad de transformar estos residuos sólidos en energía, es fundamental precisar la naturaleza del producto final. Diversas investigaciones definen al biodiésel como un combustible ecológico compuesto por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, obtenido mediante procesos químicos como la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales [11]. Este tipo de biocombustible no presenta toxicidad, es biodegradable y genera menor cantidad de azufre e hidrocarburos, lo que permite su empleo en motores diésel con pocas alteraciones [4],[7]. Su composición incluye una combinación de ésteres monoalquílicos y cadenas largas de ácidos grasos procedentes de diversas fuentes de aceites y grasas, que se logran principalmente a través de un proceso de transesterificación utilizando un alcohol de bajo peso molecular y un catalizador [9]. Los aceites vegetales aptos para el consumo, como los de soya, girasol y palma, constituyen la principal materia prima en la elaboración de biodiésel. No obstante, el elevado precio de estos aceites, que representa aproximadamente el 70% del costo total en la producción de biodiésel, además de la competencia con la producción de alimentos y la erosión del suelo causada por cultivos a gran escala, son desventajas para la fabricación y venta de biodiésel [10],[11],[12],[13].

En la elaboración de biodiésel a partir de aceite de oliva virgen extra, es crucial señalar que ciertos compuestos generados durante el proceso de cocción no son reactivos, ya que poseen una polaridad más alta (polímeros, dímeros) en comparación con los triglicéridos. Esto provoca que el porcentaje de FAME (éster metílico de ácidos grasos) al finalizar la reacción sea reducido. Además, los compuestos polares presentes en el biodiésel perjudican la eficiencia de los motores, lo que puede ocasionar problemas relacionados con la inyección y la combustión del combustible [11],[12],[13],[14],[15].

La transesterificación para producir biodiésel a nivel industrial generalmente se realiza mediante catálisis homogénea usando una base fuerte como catalizador. Este procedimiento ofrece ventajas como un tiempo de reacción más corto, mayor conversión y una cantidad relativamente reducida de catalizador, en comparación con otros métodos de catálisis. Sin embargo, esta catálisis básica homogénea se ve influenciada por la presencia de ácidos grasos libres y agua, lo que provoca la creación de jabón y, por ende, merma el rendimiento de la reacción. En contraste, las reacciones que son catalizadas por ácidos no se ven afectadas por los ácidos grasos libres, pero son sensibles a la presencia de agua, lo que hace que sus reacciones ocurran más lentamente y requieran temperaturas más elevadas [10],[11],[13],[15].

Otro enfoque de catálisis utiliza catalizadores heterogéneos, que pueden ser ácidos, básicos, enzimáticos y, más recientemente, líquidos iónicos. Los catalizadores heterogéneos ácidos y básicos resultan beneficiados por su bajo costo, reciclabilidad y su capacidad para llevar a cabo esterificación y transesterificación simultáneamente. No obstante, la catálisis heterogénea presenta desventajas debido a la baja concentración de sitios activos y problemas de difusión, lo que disminuye las velocidades de reacción. Las reacciones apoyadas por enzimas pueden facilitar tanto la esterificación de ácidos grasos libres como la transesterificación de triacilglicerol a la vez. Sin embargo, a pesar de que la separación de productos del catalizador es sencilla, el alto costo y la inactivación de las enzimas siguen siendo desafíos importantes. Los líquidos iónicos son considerados como una nueva clase de catalizadores, ya que pueden participar en la esterificación y transesterificación de los aceites y se separan fácilmente. Aunque tienen buena actividad catalítica, las condiciones necesarias para estas reacciones son consideradas peligrosas debido a las elevadas temperaturas y presiones requeridas [14],[15].

En estudios evalúa la viabilidad técnica y experimental de extraer aceite de mermas sólidas de snacks fritos vegetales para su uso en biodiésel de segunda generación, determinando que estos residuos contienen entre 25% y 30% de aceite aprovechable. El análisis técnico determinó que, debido a la elevada acidez del aceite recuperado, no es posible realizar una transesterificación básica directa. Por ello, el método requiere un pretratamiento de esterificación ácida para reducir los ácidos grasos libres, seguido de una transesterificación básica para la obtención final del biodiésel [1],[5],[10],[14],[15].

Y en otro estudio detalla que la producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado (UCO) es una alternativa sostenible [10], rentable y respetuosa con el medio ambiente, que reduce la dependencia de combustibles fósiles, disminuye gases de efecto invernadero (hasta un 41% menos) y evita la contaminación hídrica, sin competir con recursos alimentarios [4],[11],[15],[16].

El uso de UCO es una estrategia de economía circular altamente eficiente, convirtiendo un residuo problemático en energía renovable. El proceso de producción de la transesterificación es el método más común y efectivo. Cuando el UCO tiene alto contenido de ácidos grasos libres (AGL), se requiere una etapa previa de esterilización. Donde se reporta rendimientos superiores al 95% ajustando parámetros como la relación metanol-aceite, la temperatura (aprox. 60°C) y el uso de catalizadores [6],[8],[14].

Este artículo tiene como objetivo: (i) cuantificar el contenido de aceite residual en mermas industriales de snacks de papa, maíz y plátano mediante extracción con etanol a nivel de laboratorio; (ii) evaluar la eficiencia y estabilidad del proceso de extracción mediante escalamiento a nivel piloto; y (iii) analizar la viabilidad técnica de integrar este aceite recuperado en una cadena de producción de biodiésel, discutiendo su idoneidad como materia prima alternativa.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Materias Primas

Se utilizaron mermas industriales de snacks fritos, proporcionadas por una empresa del sector alimentario peruano, correspondientes a tres categorías principales:

1. Papa frita (variedad Lisa)
2. Maíz frito (tipo Gigante)
3. Plátano frito (cortes Bold y Thin)

Las muestras presentaron baja humedad (<5% peso base seca) y alto contenido de aceite residual visible. Previo a la extracción, las mermas fueron trituradas mecánicamente y homogeneizadas para obtener una distribución uniforme del tamaño de partícula (2–5 mm), optimizando así la transferencia de masa durante la extracción.

### B. Extracción a Nivel de Laboratorio

La determinación cuantitativa del contenido de aceite se realizó mediante extracción sólido-líquido utilizando etanol al 96% (Merck, grado analítico) como solvente. Se empleó una relación masa de muestra/volumen de solvente de 1:10 (p/v). La extracción se llevó a cabo a  $70 \pm 2$  °C durante 120 minutos en un equipo Soxhlet. Tras la extracción, el solvente se evaporó a 80 °C en un rotavapor (Büchi R-100). El aceite recuperado se pesó y el rendimiento se calculó según la ecuación (1):

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left( \frac{m_{\text{aceite}}}{m_{\text{muestra seca}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Cada experimento se realizó por triplicado, reportándose el valor promedio y la desviación estándar.

### C. Extracción a Nivel Piloto

El proceso se escaló utilizando un extractor piloto tipo Soxhlet de lotes (diseño propio, capacidad 20 L), construido en acero inoxidable 304 y equipado con control de temperatura. Se

mantuvieron los parámetros operativos fundamentales del proceso de laboratorio (temperatura, tiempo, solvente, relación p/v). El sistema piloto operó en seis extracciones experimentales independientes para cada tipo de muestra, evaluando la reproducibilidad del proceso.



Fig. 1 Sistema piloto de extracción tipo soxhlet.

Se observa en la figura 1 el sistema piloto de extracción tipo Soxhlet, el solvente se adiciona en la parte C, la cual contiene resistencias para su adecuado calentamiento; mientras que la muestra de las mermas fragmentadas es colocada en B. El condensador A que se ubica en la parte superior, enfriando por agua, convierte el vapor del solvente en líquido, el cual gotea sobre la muestra. El aceite recuperado se separó por decantación y evaporación del solvente en un evaporado (Fig. 2) siendo este parte de equipo piloto.

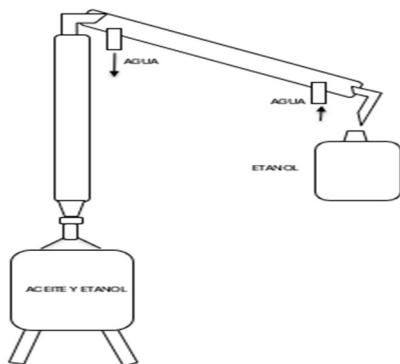


Fig. 2 Sistema piloto de evaporación.

#### D. Análisis de idoneidad para Biodiesel

El aceite recuperado se caracterizó mediante determinación de ácidos grasos libres (AGL) mediante titulación potenciométrica según norma AOCS Cd 3d-63. Este parámetro es crítico para definir la ruta de conversión a biodiésel [7].

Esta norma utiliza la titulación potenciométrica para medir la concentración de Ácidos Grasos Libres (AGL). El método: Se disuelve la muestra en un solvente adecuado y se titula con una base (generalmente hidróxido de potasio, KOH).

Donde la ventaja al ser potenciométrica (usando un electrodo para medir el cambio de pH), es mucho más precisa que la titulación visual con indicadores de color, especialmente en aceites recuperados que suelen ser oscuros o estar quemados, donde el cambio de color de la fenolftaleína sería imposible de ver.

#### E. Metodología de obtener el Biodiesel

##### E.1.- Extracción de aceite tipo Soxhlet. -

Esta técnica permite una extracción exhaustiva y continua utilizando un solvente orgánico que recircula a través de la muestra. Se coloca la muestra molida dentro de un cartucho o una envoltura de celulosa porosa, el cual se introduce en la cámara de extracción del equipo Soxhlet. En el matraz inferior se añade un solvente afín a las grasas, comúnmente n-hexano.

##### E.2.- Ciclo de extracción. -

El disolvente se eleva a su punto de ebullición y sus vapores suben por el tubo lateral hacia el condensador. Al enfriarse, el disolvente gotea sobre la muestra en el cartucho, disolviendo el aceite. Posteriormente, el líquido alcanza el sifón, el cual se vacía automáticamente hacia el matraz, arrastrando el aceite extraído. Este procedimiento se repite durante varias horas hasta que el disolvente en la cámara se vuelve transparente, lo que señala que la extracción ha sido completa. Se emplea un rotavapor para eliminar el disolvente y recuperar el aceite puro en el matraz.

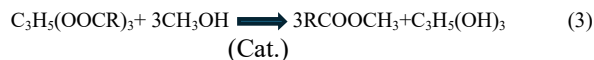
##### E.3.- Producción de Biodiésel (Transesterificación)

Una vez que se ha recuperado el aceite vegetal, se lleva a cabo un proceso químico que transforma los triglicéridos en ésteres metílicos, también conocido como biodiésel. Se combina un tipo de alcohol, comúnmente metanol, con un agente catalizador básico, que puede ser hidróxido de sodio o de potasio, y luego se deja reposar la mezcla obtenida para realizar la decantación, lo que permite separar las dos capas: el biodiésel que queda en la parte superior y la glicerina que se sitúa en la inferior. Posteriormente, el biodiésel se lava con agua destilada para eliminar cualquier resto de alcohol y catalizador, y después se seca mediante un calentamiento suave para eliminar las pequeñas cantidades de humedad. El resultado es un biocombustible de segunda generación que utiliza un desecho industrial, específicamente las mermas de snacks, y cumple con normativas técnicas, como la EN 14214.



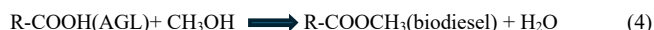
La ecuación general de transesterificación (2), es la representación general de la reacción que ocurre en el soxhlet.

En términos estructurales:



Donde en la ecuación 3 se está representando con R las cadenas de hidrocarburos de los ácidos grasos presentes en los snacks vegetales (como ácido oleico o linoleico).

Considerando la técnica de obtención de segunda generación, a partir de las mermas de snacks suelen contener ácidos grasos libres (AGL) debido a la degradación térmica del freído, es común realizar una esterificación previa si el índice de acidez es alto como se muestra en la ecuación 4, para evitar la formación de jabones:



#### Las limitaciones de este estudio. -

Radican principalmente en la heterogeneidad química de los residuos, ya que el calentamiento repetido genera polímeros y altos niveles de ácidos grasos libres que dificultan la transesterificación y exigen pretratamientos costosos. Técnicamente, el biodiésel resultante suele presentar una estabilidad oxidativa reducida y un ligero incremento en las emisiones de NOx, además de enfrentar desafíos de escalabilidad debido a la compleja logística de recolección y la alta inversión inicial requerida para procesar materia prima degradada.

#### E.4.- Preparación y Reactivos (Norma AOCS Cd 3d-63). -

Antes de la reacción química, debemos saber cuánta "acidez" hay que neutralizar, por ello se aplica la NORMA AOCS Cd 3d-63 que es el método oficial de la American Oil Chemists Society (AOCS) para determinar el **índice de acidez** en grasas y aceite.

- **Reactivos:** Típicamente Hidróxido de Potasio (KOH) o Sodio (NaOH) diluido en alcohol (etanol o isopropanol) como solución titulante.
- **Muestra:** Una cantidad pesada de aceite recuperado disuelta en una mezcla de solventes (generalmente tolueno e isopropanol) para asegurar que los ácidos grasos sean "accesibles" al reactivo.
- **Equipo:** Un potenciómetro (pH-metro) con un electrodo de vidrio combinado.

#### E.5.- Procedimiento de la Titulación Potenciométrica. -

A diferencia de usar un gotero y esperar un cambio de color, aquí seguimos este proceso:

- **Calibración:** Se calibra el electrodo con soluciones buffer estándar.

- **Adición Controlada:** Se añade la solución KOH de mediante una bureta digital en incrementos muy pequeños.
- **Registro de Curva:** El equipo registra el cambio de milivoltios (mV) o pH.
- **Punto de Equivalencia:** El punto final no es un color, sino el punto de inflexión máximo en la curva de titulación (donde el cambio de potencial es más brusco).

#### F. Análisis del Biodiesel obtenido

Cálculos Utilizados. - Para expresar los resultados, se suele utilizar la siguiente fórmula matemática:

$$IA = \left( \frac{V \times N \times 56.1}{m_{\text{muestra}}} \right) \quad (5)$$

Donde V es el volumen KOH gastado, N la normalidad del titulante y m la masa de la muestra.

**Las ventajas.** - De usar Potenciometría en Aceites Recuperados. En aceites de cocina usados o grasas amarillas, la metodología convencional de "cambio de color" falla por lo siguiente:

1. **Opacidad:** El aceite recuperado suele ser muy oscuro; el ojo humano no detecta cuándo el indicador vira a rosa.
2. **Precisión:** Permite calcular la **cantidad exacta de catalizador extra** que se debe añadir para neutralizar la acidez sin pasarse, lo que ahorra costos y evita subproductos no deseados.
3. **Automatización:** Los tituladores automáticos eliminan el error humano, generando una curva de titulación reproducible.

**Las desventajas.** - frente a métodos visuales o rápidos, especialmente en entornos de producción a pequeña escala:

1. **Costo y Complejidad del Equipamiento.** - A diferencia de una titulación manual que solo requiere una bureta y un indicador (como la fenolfaleína), este método necesita un potenciómetro (pH-metro) con electrodos de alta calidad [3],[4],[5].
2. **Mantenimiento del Electrodo.** - Los aceites recuperados son sustancias densas y "sucias".
  - Contaminación: El aceite puede crear una película sobre la membrana de vidrio del electrodo, bloqueando la lectura.

- Limpieza rigurosa: Requiere protocolos de limpieza estrictos con solventes específicos para evitar que el electrodo pierda sensibilidad o se dañe permanentemente.

### 3. Tiempo de Análisis. -

Es un proceso más lento. La necesidad de esperar a que el potencial se establezca tras cada adición de titulante para obtener una curva precisa hace que el análisis sea menos ágil que una prueba rápida de "pasa/no pasa".

### 4. Uso de Reactivos Específicos. -

La norma exige solventes como tolueno e isopropanol. Estos no solo son más costosos, sino que requieren una gestión de residuos químicos más estricta debido a su toxicidad e inflamabilidad, comparado con métodos que usan soluciones acuosas o alcoholes simples.

### 5. Necesidad de Personal Capacitado. -

No cualquier operario puede realizarla. Se requiere formación técnica para:

- Interpretar las curvas de titulación y los puntos de inflexión.
- Realizar la calibración de múltiples puntos del equipo.
- Manipular correctamente los solventes orgánicos bajo normas de seguridad.

**6. Sensibilidad a la Temperatura.** -La lectura de milivoltios (mV) es altamente sensible a las variaciones térmicas. Si la temperatura del aceite recuperado no está estrictamente controlada durante la titulación, los resultados pueden variar, afectando el cálculo final del catalizador para la ruta de Transesterificación.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A. Contenido de Aceite a escala de Laboratorio

Los resultados del análisis de extracción a nivel de laboratorio se presentan en la Tabla I. El contenido de aceite residual varió significativamente entre los diferentes tipos de snacks, oscilando entre 18.1% y 23.4% en base seca.

TABLA I  
CONTENIDO DE ACEITE EN MERMAS DE SNACK FRITOS  
(ESCALA LABORATORIO)

| Tipo de Snack   | Rendimiento Promedio (%) | Desviación estándar (±) |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|
| Papa Lisa       | 18.1                     | 1.2                     |
| Maíz Gigante    | 19.6                     | 0.7                     |
| Plátano Thincut | 23.4                     | 0.8                     |
| Plátano Boldcut | 22.3                     | 1.0                     |

El análisis de la composición lipídica en los snacks evaluados revela variaciones significativas influenciadas tanto por la

morfología del producto como por la estabilidad del proceso de fritura. En términos de absorción, el **Plátano Thincut** registró el contenido de aceite más elevado, superando a la **Papa Lisa** por un margen de 5.3 puntos porcentuales. Este comportamiento se atribuye directamente a la geometría del corte: los datos confirman que el corte *Thincut* retiene un 1.1% más de aceite en comparación con el *Boldcut*. Este fenómeno es consistente con la literatura técnica, que establece que una mayor relación de área superficial por unidad de masa incrementa la capacidad de adsorción de lípidos durante la evaporación del agua en la fritura. En cuanto a la precisión del proceso, se identificaron dos extremos críticos. El **Maíz Gigante**, con una desviación estándar de  $\pm 0.7$ , se posiciona como el producto con mayor homogeneidad y estabilidad en laboratorio. Esta baja dispersión sugiere que tanto las propiedades físicas de la materia prima como las variables de operación (tiempo y temperatura) están altamente estandarizadas, lo que facilita su escalabilidad industrial. Por el contrario, la **Papa Lisa** presentó la mayor variabilidad ( $\pm 1.2$ ), lo que indica una falta de uniformidad que podría derivar de heterogeneidad en la materia prima (contenido de almidón o humedad inicial) o de fluctuaciones en el proceso de fritura. Desde la perspectiva de la **economía circular** y el aprovechamiento de subproductos, los resultados tienen implicaciones operativas profundas. Las mermas de plátano, al representar casi un 25% de lípidos en su peso total, constituyen la fracción más crítica para la recuperación de grasas. Sin embargo, este alto contenido graso supone un desafío para la producción de harinas de snack; la elevada carga lipídica acelera los procesos de autooxidación, lo que reduciría la vida útil del producto final por rancidez. En consecuencia, el aprovechamiento de estos descartes requeriría protocolos de almacenamiento y envasado más rigurosos (control de luz y oxígeno) que los necesarios para mermas con menor contenido graso, como la papa.

TABLA II  
La tendencia de retención de aceite en los snacks

| Parámetro          | Tendencia Observada                              | Explicación Técnica                                                                                                                                                |
|--------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Por Tipo de Insumo | Plátano > Maíz > Papa                            | El plátano posee una estructura más porosa tras la pérdida de agua, lo que facilita que el aceite ocupe los espacios intercelulares.                               |
| Por Tipo de Corte  | Delgado ( <i>Thin</i> ) > Grueso ( <i>Bold</i> ) | A menor espesor, mayor es la relación superficie/volumen. Esto aumenta el área de contacto para la adhesión superficial del aceite al finalizar la fritura.        |
| Por Estabilidad    | Maíz es el más estable                           | La baja desviación estándar ( $\pm 0.7$ ) indica que el grano de maíz ofrece una superficie de absorción más uniforme y menos dependiente de variaciones externas. |

Los resultados obtenidos muestran una variabilidad significativa en el contenido de aceite residual de las mermas, fenómeno que puede explicarse a través de la interacción de tres ejes críticos: la matriz estructural del vegetal, el control termodinámico del proceso y la cinética de enfriamiento.

En primer lugar, la **naturaleza de la materia prima** actúa como el factor determinante de la capacidad de retención. La relación directa entre la porosidad resultante de la evaporación del agua y el volumen de aceite absorbido sugiere que vegetales con mayor contenido de humedad inicial generan redes capilares más extensas, facilitando la difusión del lípido hacia el interior del tejido.

En segundo lugar, la eficiencia de la fritura está supeditada a los **parámetros de operación**. Una caída en la temperatura del aceite no solo prolonga el tiempo de inmersión, sino que reduce la presión de vapor interna del snack, debilitando la barrera contra el ingreso de grasa. Asimismo, la geometría del corte incrementa la relación superficie-volumen, exponiendo una mayor área de contacto para la adhesión superficial.

Finalmente, se observa que el mecanismo de postfritura es donde se consolida la carga grasa final. El efecto de succión por vacío durante el enfriamiento moviliza el aceite superficial hacia los poros abiertos; por lo tanto, la eficacia de los sistemas de desengrase o centrifugado es el filtro final que define la calidad de la merma. Desde la perspectiva de la valorización energética, estas fluctuaciones no son menores: impactan directamente en la eficiencia de la extracción del aceite y obligan a ajustes precisos en la relación estequiométrica alcohol-aceite durante la transesterificación para la producción de biodiesel.

B. Evaluación del Escalamiento Piloto

Los resultados del escalamiento a nivel piloto se presentan en la Tabla II y III. En general, el proceso mostró rendimientos consistentes y, en varios casos, ligeramente superiores a los obtenidos en laboratorio, particularmente para las muestras de papa y plátano.

TABLA III  
RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN A ESCALA PILOTO

| Muestra de Snack   | Bloque | Porcentaje Aceite (%) | Piloto vs Lab |
|--------------------|--------|-----------------------|---------------|
| Papa Lisa L5       | I      | 27.0                  | -8.9 puntos   |
| Papa Lisa L5       | II     | 30.0                  | -11.9 puntos  |
| Papa Lisa L7       | III    | 27.0                  | -8.9 puntos   |
| Maiz Gigante L1    | II     | 19.0                  | +0.6 puntos   |
| Maiz Gigante L1,L2 | I      | 18.0                  | +1.6 puntos   |
| Plátano Bolcut L6  | III    | 24.0                  | -1.7 puntos   |
| Plátano Bolcut L6  | I      | 22.0                  | +0.3 puntos   |
| Plátano Thincut L6 | II     | 26.0                  | -2.6 puntos   |

El análisis comparativo del rendimiento de extracción de aceite revela discrepancias significativas entre las condiciones controladas de laboratorio y la ejecución en planta piloto. A diferencia de los entornos a pequeña escala, el sistema piloto demuestra una respuesta heterogénea que depende estrechamente de la morfología del insumo y de la eficiencia mecánica de los equipos industriales.

Un hallazgo notable es el comportamiento del Maíz Gigante, el único producto con rendimientos positivos en escala piloto (+0.6 a +1.65 puntos porcentuales). Este incremento sugiere que el sistema piloto supera las limitaciones de transferencia de masa observadas en laboratorio. La morfología del maíz —piezas más grandes y rígidas— parece favorecer la dinámica del fluido en equipos de mayor volumen, permitiendo que el flujo de aire o la fuerza centrífuga actúen con mayor eficacia, evitando que el aceite quede retenido en los intersticios del grano.

Los Puntos Críticos: El Desafío de la Papa Lisa Por el contrario, la Papa Lisa (específicamente los lotes L5 y L7) representa el punto más crítico de la evaluación. La drástica pérdida de eficiencia a nivel piloto, con desviaciones de hasta -11.9 puntos, indica una falla operativa en el sistema de centrifugado o drenado industrial. Al no replicar la eficiencia del laboratorio, el snack retiene hasta un 30% de grasa, lo cual no solo compromete el perfil nutricional del producto final, sino que impacta directamente en los costos operativos debido al elevado desperdicio de aceite.

La comparación entre el Bloque I y el Bloque II para la muestra Papa Lisa L5 (pasando de -8.9 a -11.9) evidencia que el proceso en planta piloto aún carece de la robustez necesaria. Estas inconsistencias sugieren que el sistema es altamente sensible a variables externas, como la carga del equipo o el tiempo de latencia entre la fritura y la fase de extracción.

En cuanto a la **papa y el plátano**, si bien las variaciones favorecen ligeramente a la planta piloto, estos resultados se atribuyen principalmente a la heterogeneidad intrínseca de la materia prima y a las fluctuaciones normales entre lotes de procesamiento, más que a una mejora sistemática en el diseño del proceso.

TABLA IV  
COMPARACIÓN DE RENDIMIENTO ESCALA PILOTO Y LABORATORIO

| Tipo de Snack   | Rendimiento Promedio Laboratorio (%) | Rendimiento Promedio Planta piloto (%) |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| Papa Lisa       | 18.1                                 | 28                                     |
| Maiz Gigante    | 19.6                                 | 18.5                                   |
| Plátano Thincut | 23.4                                 | 26                                     |
| Plátano Bolcut  | 22.3                                 | 23                                     |

Detalle los resultados obtenidos al comparar rendimientos en cada uno de los escenarios planteados:

- **Mayor Variación:** La Papa Lisa muestra la mayor eficiencia en planta piloto, superando por casi 10 puntos su rendimiento de laboratorio.
- **Consistencia:** El Plátano Boldcut es el producto más estable, manteniendo rendimientos casi idénticos en ambas escalas.
- **Pérdida de Eficiencia:** El Maíz Gigante es el único producto que rinde menos al escalar el proceso a la planta piloto.
- **Un dato atípico** es el salto del 18.1% al 28% sugiere que las condiciones en planta piloto favorecieron drásticamente la retención de masa. En el caso del piloto, el control de temperatura del aceite o el tiempo de fritura podría estar permitiendo una menor evaporación de agua o, por el contrario, una mayor absorción de aceite, lo que eleva el peso final del producto.
- Comparando los dos tipos de plátano, el corte más delgado (Thincut) se beneficia más del escalado (+2.6%) que el corte grueso (Boldcut). Los cortes finos tienen una mayor relación de área superficial. Esto indica que la eficiencia de la planta piloto es superior para productos que requieren una transferencia de calor rápida y uniforme.

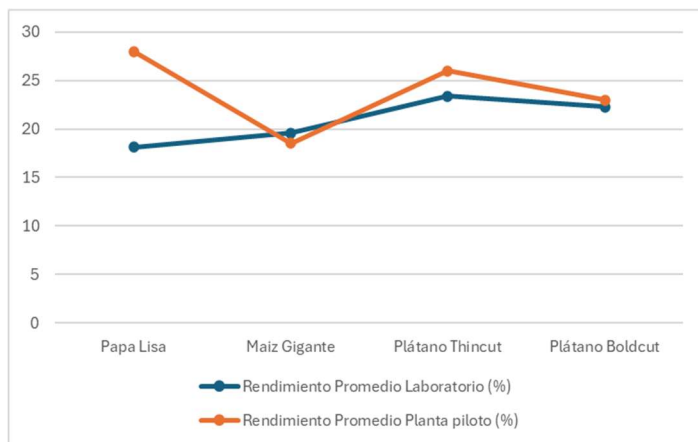


Fig. 1 Comparación del Rendimiento de Extracción escala piloto y laboratorio

La Fig. 1 muestra una comparación gráfica de los rendimientos promedio entre ambas escalas, confirmando en la muestra de papa lisa y plátanos mayor extracción en escala piloto.

### C. Viabilidad del Aceite para Producción de Biodiésel

El análisis de AGL en el aceite recuperado mostró valores en el rango de 1.5–3.5%, dependiendo del tipo de snack y las condiciones de fritura originales. Esta característica es crucial para determinar la ruta tecnológica adecuada:

- Para lotes con  $AGL < 2\%$ : Es viable la transesterificación alcalina directa usando catalizadores como NaOH o KOH, la

ruta más económica y ampliamente implementada industrialmente [9].

- Para lotes con  $AGL > 2\%$ : Se requiere una etapa previa de esterificación ácida (usando  $H_2SO_4$  o HCl) seguida de transesterificación alcalina, para evitar la saponificación y garantizar altos rendimientos de biodiésel [10].

Considerando un rendimiento promedio de extracción del 25% y una eficiencia de conversión a biodiésel del 85% (valor típico para aceites de fritura [11]), se estima que:

$$100 \text{ kg de mermas} \times 0.25 \times 0.85 \approx 21.25 \text{ kg de biodiésel}$$

Para las muestras de mayor rendimiento (papa, 30%), esta cifra alcanza los 25.5 kg de biodiésel por cada 100 kg de mermas, demostrando el potencial productivo del proceso.

### D. Impacto en Economía Circular

Este proceso transforma un residuo industrial (mermas de snacks) en un recurso energético (aceite para biodiésel), alineándose con los principios de economía circular. La implementación a nivel industrial permitiría a las empresas de snacks:

- Reducir costos de disposición de residuos
- Generar un flujo de ingresos adicional a partir de un subproducto
- Disminuir su huella ambiental mediante la valorización de residuos
- Contribuir a la seguridad energética regional con biocombustibles locales

La implementación de esta tecnología transita de un modelo lineal de gestión de residuos hacia un ecosistema circular de cascada de nutrientes y energía. Al recuperar lípidos de matrices sólidas residuales, se maximiza la eficiencia de los recursos ya extraídos, minimizando la entropía del sistema industrial y garantizando una reducción significativa en la intensidad de carbono del sector transporte.

Lo que es un "gasto de gestión de residuos" para la fábrica de snacks se convierte en una "oportunidad de ingresos o autoabastecimiento" para la planta de biodiesel. Esto crea redes de intercambio local que fortalecen la resiliencia económica regional. Transformando un residuo de bajo valor calórico y difícil disposición en un vector energético denso (biodiesel). Esto reduce la dependencia de materias vírgenes (aceites de primer uso), cumpliendo con el principio de mantener los materiales en uso el mayor tiempo posible

#### IV. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que las mermas de snacks fritos vegetales constituyen una fuente viable y sostenible de aceite para la producción de biodiésel de segunda generación. Los principales hallazgos son:

- 1) Se concluye que el plátano tiene una afinidad significativamente mayor por el aceite en comparación con el maíz y la papa. Con niveles superiores al **22% tabla I**, las mermas de plátano representan la mayor pérdida de insumo (aceite) y, al mismo tiempo, el mayor potencial de recuperación de lípidos si se procesan térmicamente.
- 2) Los resultados del plátano (Thincut 23.4% vs. Boldcut 22.3%) tabla I permiten concluir que el **espesor del corte es un parámetro crítico de control**. A menor espesor, aumenta el área superficial expuesta, lo que incrementa la absorción de aceite por capilaridad durante el enfriamiento del producto.
- 3) El contenido de aceite residual en las mermas oscila entre 18.5% y 28.0%, siendo la papa frita la que presenta el mayor potencial (28%); considerando a escala piloto.
- 4) La Papa Lisa es el insumo más eficiente desde el punto de vista del rendimiento de materia grasa, al retener solo un 18.1%. Esto sugiere que su estructura celular y contenido de almidón permiten una formación de costra más hermética, limitando la penetración del aceite al núcleo del snack.
- 5) Aunque el maíz tiene una retención intermedia (19.6%), su baja desviación estándar ( $\pm 0.7$ ) concluye que es el producto más estable en el proceso de fritura. Esto facilita la estandarización de su calidad nutricional, ya que los valores de grasa varían muy poco entre lotes.
- 6) Se puede concluir que las mermas de plátano son las más vulnerables a la **oxidación lipídica**. Un contenido de aceite cercano al 24% acelera la aparición de olores y sabores rancios, lo que implica que el aprovechamiento de estas mermas debe ser inmediato o bajo condiciones de almacenamiento controladas.
- 7) La estructura física de la materia prima dicta el éxito del proceso piloto. Mientras que el Maíz Gigante se beneficia de su rigidez y tamaño (facilitando el drenaje de aceite), la Papa Lisa sufre un efecto de retención masiva. Esto indica que no se puede utilizar una configuración única de desengrasado para todos los productos; el sistema debe ser paramétrico según la densidad y porosidad del snack [9].
- 8) El incremento del contenido de grasa hasta un 30% en la Papa Lisa no es solo un fallo técnico, sino un riesgo de negocio:
  - a) Perfil Nutricional: El producto podría quedar fuera de los estándares saludables permitidos o requerir sellos de advertencia adicionales.
  - b) Estructura de Costos: El aceite es uno de los insumos más costosos. Una desviación de 11.9 puntos implica un desperdicio financiero significativo que reduce el margen de utilidad por unidad producida.
- 9) La diferencia entre el laboratorio y la planta piloto sugiere que el control de la viscosidad del aceite es deficiente en la escala mayor. En el laboratorio, el enfriamiento es menor; en el piloto, si el aceite se enfría antes de la extracción por demoras en el proceso, su viscosidad aumenta, quedando atrapado en los capilares del producto (especialmente en la papa).
- 10) La variación observada en la Papa Lisa L5 (salto de 8.9 a 11.9 entre bloques) demuestra que el proceso no está bajo control estadístico. El sistema piloto es actualmente sensible a variables, como:
  - El tamaño de la carga de entrada.
  - La manipulación manual o tiempos muertos entre etapas.
  - La temperatura ambiental de la zona de extracción.
- 11) El aceite recuperado es compatible con rutas establecidas de producción de biodiésel (transesterificación alcalina o ácida, según el contenido de AGL), con un potencial de generación estimado de 21–25 kg de biodiésel por cada 100 kg de mermas procesadas.
- 12) La implementación de este proceso representa una oportunidad para la economía circular en la industria alimentaria, transformando un residuo problemático en un recurso energético valioso.
- 13) El sistema piloto no se comporta de manera uniforme. Existe una correlación directa entre la morfología del producto y la eficiencia de extracción.
  - Maíz Gigante: Su estructura rígida y de grandes intersticios facilita la evacuación del aceite, permitiendo que el equipo piloto incluso supere el rendimiento del laboratorio.
  - Papa Lisa: Su estructura celular y porosidad actúan como una esponja. El sistema actual de la planta piloto es incapaz de romper la tensión superficial del aceite atrapado en este tipo de tubérculo.
- 14) La inconsistencia entre el Bloque I y el Bloque II (variación de 3 puntos en un mismo producto) concluye que el proceso no es reproducible. Pequeñas variaciones en la carga del equipo o en los tiempos muertos entre la

fritura y la extracción están afectando drásticamente el resultado final, lo que impide una estandarización industrial Tabla IV.

- 15) Para fortalecer el alcance del estudio, las investigaciones futuras deberían priorizar la realización de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) integral que cuantifique la reducción real de la huella de carbono, así como el desarrollo de modelos de escalamiento industrial para evaluar la viabilidad económica de la logística de recolección. Asimismo, es fundamental profundizar en técnicas de pretratamiento avanzado para eliminar impurezas específicas de los snacks (como sales y saborizantes) y realizar pruebas de rendimiento mecánico de larga duración en motores reales para determinar el impacto de la degradación térmica del aceite residual en la eficiencia y vida útil del sistema de inyección.

## V. RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la empresa Inkacrops S.A. por proveer las muestras industriales y al Laboratorio de Procesos de la Facultad de Ingeniería Química de la UNMSM por el apoyo técnico. Este trabajo fue realizado en el marco del convenio de investigación UNMSM-Inkacrops S.A.

## REFERENCIAS

- [1] M. K. Lam y K. T. Lee, "Mixed methanol-ethanol technology to produce greener biodiesel from waste cooking oil: A breakthrough for SO<sub>4</sub>-2-/SnO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> catalyst," *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 9, pp. 1639–1645, 2011.
- [2] M. Balat y H. Balat, "Progress in biodiesel processing," *Applied Energy*, vol. 87, no. 6, pp. 1815–1835, 2010.
- [3] S. N. Naik, V. V. Goud, P. K. Rout y A. K. Dalai, "Production of first- and second-generation biofuels: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 578–597, 2010.
- [4] A. K. Agarwal, "Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 33, no. 3, pp. 233–271, 2007.
- [5] M. Canakci, "The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks," *Bioresource Technology*, vol. 98, no. 1, pp. 183–190, 2007.
- [6] E. Alptekin, M. Canakci y H. Sanli, "Evaluation of leather industry wastes as a feedstock for biodiesel production," *Fuel*, vol. 95, pp. 214–220, 2012.
- [7] B. R. Moser, "Biodiesel production, properties, and feedstocks," *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, vol. 45, no. 3, pp. 229–266, 2009.
- [8] A. M. Ziaifar, N. Achir, F. Courtois, I. Trezzani y G. Trystram, "Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process," *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 43, no. 8, pp. 1410–1423, 2008.
- [9] G. Vicente, M. Martínez y J. Aracil, "Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems," *Bioresource Technology*, vol. 92, no. 3, pp. 297–305, 2004.
- [10] Y. Wang, S. Ou, P. Liu, F. Xue y S. Tang, "Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil," *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, vol. 252, no. 1–2, pp. 107–112, 2006.
- [11] F. Ma y M. A. Hanna, "Biodiesel production: a review," *Bioresource Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 1–15, 1999.
- [12] M. Young, *Manual del escritor técnico*, ciudad Mill Valley, CA: editorial University Science, 1989.
- [13] A. Arévalo-Gallegos, J. Santillán-Jiménez, y J. Castells-Soler, "Extracción de aceite a partir de mermas de snacks fritos vegetales: evaluación técnica para la producción de biodiésel de segunda generación," *Ingeniería Industrial*, vol. 41, pp. 11–28, 2021.
- [14] B. Karmakar, G. Halder, y S. Mandal, "Biodiesel production from waste cooking oil: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 101, pp. 1–13, mar. 2019.
- [15] J. M. Fonseca, J. G. Teleken, V. d. C. Almeida, y C. d. Silva, «Biodiesel from waste frying oils: Methods of production and purification», *Energy Convers. Manage.*, vol. 184, pp. 205-218, mar. 2019.
- [16] P. D. Pathak, S. A. Kaur, K. K. Pant, y S. Singh, «Banana Peel Waste: An Emerging Cellulosic Material to Mitigate Environmental Hazards», *ACS Omega*, vol. 7, n.º 51, pp. 47529-47537, dic. 2022.