

Extraction of oils from agro-industrial waste using supercritical fluids: technical-environmental and scalability assessment

Fredy Vicente Huayta Socantaype¹ , Joel Leordany Sedano Malpartida² 

¹ Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú; fhuayta@pucp.edu.pe,

² Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú; jsedanom@uni.pe

Abstract– *The use of agroindustrial waste represents an environmentally friendly and economically useful strategy. This study addressed the limited use of lucuma seeds, as well as grape seeds, for obtaining functional oils. Supercritical CO₂ extraction was applied under different pressure and temperature conditions, also evaluating environmental indicators such as atomic efficiency and mass productivity. The results showed variable yields: 2.83% in lucuma (31.6 MPa atm and 318 K) and 6.8% in grapes (45 MPa and 333 K). Atomic efficiency reached 0.85 and mass productivity 0.325, with the cleaning of lucuma seeds identified as a critical stage due to its high effluent generation. Overall, the findings confirm the technical and environmental feasibility of the process, which is emerging as a cleaner alternative to conventional methods and is geared towards the sustainable use of non-metallic materials of biological origin.*

Keywords– *Technical-environmental assessment, process simulation, Superpro Designer, lucuma oil, grape oil, supercritical fluid extraction.*

Extracción de aceites a partir de residuos agroindustriales mediante fluidos supercríticos: evaluación técnico-ambiental y de escalabilidad

Fredy Vicente Huayta Socantaype¹ , Joel Leordany Sedano Malpartida² 

¹ Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú; fhuayta@pucp.edu.pe,

² Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú; jsedanom@uni.pe

Resumen– El aprovechamiento de residuos agroindustriales representa una estrategia ambientalmente favorable y económicamente útil. En este estudio se planteó como problema la limitada valorización de las semillas de lúcuma, así como de semillas de uva, para la obtención de aceites funcionales. Se aplicó extracción con CO₂ en estado supercrítico bajo diferentes condiciones de presión y temperatura, evaluando además indicadores ambientales como eficiencia atómica y productividad de masa. Los resultados mostraron rendimientos variables: 2.83 % en lúcuma (31.6 Mpa atm y 318 K) y 6.8 % en uva (45 Mpa y 333 K). La eficiencia atómica alcanzó 0.85 y la productividad de masa 0.325, identificándose como etapa crítica la limpieza de la pepa de lúcuma por su alta generación de efluentes. En conjunto, los hallazgos confirman la factibilidad técnica y ambiental del proceso, que se perfila como una alternativa más limpia frente a métodos convencionales y orientado al aprovechamiento sostenible de materiales no metálicos de origen biológico.

Palabras clave– Evaluación técnico-ambiental, simulación de procesos, Superpro Designer, aceite de lúcuma, aceite de uva, extracción con fluido supercrítico.

I. INTRODUCCIÓN

La degradación ambiental a nivel global también es consecuencia del procesamiento de productos agroindustriales, los cuales producen efluentes y residuos sólidos que representan entre el 10 y el 60 % de la materia procesada. [1]

De acuerdo con un reporte emitido por la Organización de las Naciones Unidas [2], anualmente se pierden o desperdician aproximadamente 1600 millones de toneladas de alimentos, lo que equivale a un tercio de la producción total destinada a la alimentación humana. Además, entre el 40 y el 50 % de estos alimentos desechados corresponden a frutas, verduras, raíces y tubérculos [3]. En la producción agroindustrial siempre quedan residuos, y esos restos suelen terminar en basurales o tirados donde no deberían. Lo que muchas personas no perciben es que esa biomasa, compuesta en su mayoría por azúcares y grasas, almacena una considerable cantidad de energía. Cuando se acumula, especialmente en zonas secas, pueden incendiarse con facilidad y provocar incendios de gran magnitud, arrasando con bosques enteros. Además, cuando se descomponen, liberan gases que contribuyen al incremento del calentamiento global. [4]

En países en desarrollo como Perú, el sector alimentario genera anualmente alrededor de 20 mil toneladas de residuos provenientes de semillas y cáscaras de uva, además de unas 5 mil toneladas de semillas de lúcuma. Debido a la falta de alternativas efectivas para su recuperación o reutilización, estos desechos suelen ser incinerados, lo que libera gases contaminantes que afectan la salud y la calidad de vida de las comunidades. Los residuos agroindustriales incluyen principalmente cáscaras, semillas, pulpas, tortas de prensa y hojas, que contienen compuestos químicos diversos denominados metabolitos secundarios vegetales, siendo los aceites de las semillas uno de los bioactivos más relevantes. [5] La riqueza en nutrientes y compuestos funcionales ha impulsado el interés en aprovechar estos residuos como una fuente valiosa. Además, la legislación ambiental cada vez más estricta promueve el uso de estos materiales sólidos para diferentes aplicaciones. [6]

Los residuos agroindustriales contienen materia orgánica con componentes de alto valor agregado, para cuya recuperación, purificación y concentración se disponen actualmente de diversas tecnologías eficientes. No obstante, pocas de estas opciones aseguran la protección ambiental y evitan residuos dañinos para la salud. Las tecnologías emergentes ofrecen métodos más efectivos para extraer compuestos funcionales, ya que emplean disolventes en menores cantidades y reducen los tiempos de extracción respecto a los métodos convencionales. Entre estas técnicas destacan la extracción asistida por microondas (MAE), la extracción con fluido supercrítico (SFE) y la extracción asistida por ultrasonido. [7]

La eficiencia en la extracción en tecnologías emergentes se debate entre la velocidad del proceso y la calidad final del extracto. Tecnologías como la extracción asistida por ultrasonido (UAE) y microondas (MAE) son un claro ejemplo de la búsqueda de rapidez. La primera utiliza la cavitación acústica, una implosión violenta de microburbujas, para forzar la transferencia de masa; la segunda, en cambio, emplea calentamiento dieléctrico para acelerar la cinética de manera drástica. Ambas reducen tiempos y solventes. Pero esta celeridad no siempre garantiza la máxima selectividad. Es precisamente en esa encrucijada donde la extracción con fluidos supercríticos ofrece una solución distinta, pues al operar con una solubilidad sintonizable y sin solventes orgánicos, su

enfoque no es solo la rapidez, sino la pureza y el rendimiento superior del aceite obtenido, siendo la más idónea para obtener aceites [8].

En este contexto, cada muestra es sometida a condiciones que exceden su punto crítico de presión y temperatura, el dióxido de carbono (CO₂) desarrolla un estado particular con propiedades disolventes únicas. Deja de ser un gas o un líquido convencional. Este fluido supercrítico resultante penetra las matrices de interés con la eficiencia de un gas, pero disuelve selectivamente compuestos termolábiles, como los delicados aceites funcionales, gracias a una solvatación sintonizable propia de un líquido. La ventaja fundamental de este enfoque, que justifica plenamente su designación como “tecnología verde”, radica en la simplicidad de su etapa final; basta una simple despresurización del sistema para que el CO₂ se volatilice por completo, dejando tras de sí un extracto puro y libre de cualquier residuo tóxico [9].

La semilla de uva (*Vitis vinifera*) constituye un caso de estudio paradigmático para la valorización de subproductos mediante fluidos supercríticos (FSC), como lo documenta ampliamente la literatura [10] (Qu, y otros, 2024). La investigación inicial ya había sentado las bases de su viabilidad; en la cual se demostró que optimizando la presión hasta 40 MPa se obtenían rendimientos de aceite superiores al 6% [11]. Investigaciones posteriores refinaron este enfoque, orientando el proceso no solo hacia el rendimiento bruto, sino hacia la recuperación selectiva de compuestos de alto valor como el α -tocoferol y diversos fenoles, culminando en validaciones a escala piloto que confirmaron su factibilidad económica [10]. Pero la optimización no se ha detenido. La frontera actual explora el uso de herramientas de modelamiento avanzado, donde análisis de superficie de respuesta y redes neuronales artificiales elevan aún más la eficiencia del proceso, tal como lo demuestra un estudio reciente de (Chauca-Cerrutti, Inga, Pasquel-Reátegui, Betalleluz-Pallardel, & Puma-Isuiza, 2024). [12] Esta continua evolución subraya la notable flexibilidad de la FSC para adaptarse y maximizar la extracción de nutraceuticos a partir de diversas matrices vegetales.

La semilla de lúcuma (*Pouteria lucuma*) está captando un creciente interés industrial, con aplicaciones potenciales que abarcan desde la farmacología hasta los sectores cosmético y alimentario. El fundamento de este interés reside en la composición única de su aceite. Investigaciones pioneras en este campo han demostrado que este se caracteriza por su elevada concentración de fitoesteroles bioactivos, compuestos de alto valor funcional. Sin embargo, la viabilidad de su aprovechamiento a gran escala dependía de un método de extracción eficiente [13] [14]. Ese desafío ha sido abordado recientemente; esta investigación demuestra que la extracción con fluidos supercríticos (FSC) recupera más del 97% del contenido total de aceite [12]. Este avance no es solo una mejora en el rendimiento; alinea la producción con las

tendencias de sostenibilidad, consolidando a la lúcuma como un recurso con una ruta clara hacia su valorización industrial.

A pesar de estos avances, la literatura presenta un vacío crítico: no se ha realizado una evaluación integral que articule la optimización experimental con un análisis de escalabilidad y sostenibilidad. La investigación actual carece de estudios que, para trascender la escala de laboratorio, empleen una simulación de procesos en SuperPro Designer o herramientas similares, la cual nos permita analizar el balance de materia y confirmar la factibilidad de implementar un esquema productivo industrial. Asimismo, la evaluación no debe detenerse en el análisis técnico, sino que debe cuantificar el impacto ambiental del sistema a través de indicadores clave de la química verde (Factor E, Eficiencia Atómica, etc.) para validar su sostenibilidad [15] [16] [17]. La aplicación de este enfoque multifacético es fundamental para validar la viabilidad de una biorrefinería integrada [18].

Por lo tanto, el presente estudio se centra en la extracción de aceites a partir de residuos agroindustriales mediante fluidos supercríticos, realizando una evaluación técnico-ambiental y de escalabilidad. Para ello, se integra la optimización experimental con la simulación de procesos desarrollada por (Huayta, Tinoco, Cárdenas, & Sedano, 2025) [19], utilizando la semilla de lúcuma y el orujo de uva, con el fin de ofrecer un modelo de evaluación completo que permita incluir indicadores ambientales.

II. METODOLOGÍA

El estudio se estructura en cuatro etapas: acondicionamiento de materias primas, extracción experimental con CO₂ supercrítico, simulación del proceso a escala productiva y evaluación técnico-ambiental. Esta organización permite utilizar los resultados experimentales como datos de entrada para un análisis de mayor alcance, orientado a la toma de decisiones para una eventual implementación industrial.

A. MATERIA PRIMA E INSUMOS

Se emplearon dos residuos agroindustriales de origen peruano: orujo de uva y pepa de lúcuma. El orujo de uva de la variedad Malbec fue obtenido con apoyo del CITE Agroindustrial de Ica y de la empresa Santiago Queirolo S.A.C. Su composición fue de 56.4 % de cáscara, 20.0 % de escobajo, 10.6 % de materia extraña y 13.0 % de semilla. La pepa de lúcuma procedió del Fundo Parodi, ubicado en Chilca, Cañete, Lima, y estuvo compuesta por 17.716 % de pericarpio, 82.138 % de endospermo y 0.146 % de material no conforme. Como solvente de extracción se utilizó CO₂ industrial líquido al 99.9 %, operado en un equipo de extracción supercrítica SFT-150 de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

B. ACONDICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Para el caso de la semilla de uva, el orujo fue sometido a separación manual para retirar cáscara, escobajo y materia extraña. Posteriormente, las semillas fueron molidas mediante ciclos cortos de operación para evitar sobrecalentamiento, tamizadas hasta obtener partículas entre 180 y 1000 μm y secadas a 313 K durante 13 h. Este acondicionamiento permitió reducir la humedad y obtener una matriz más homogénea para la extracción.

Para el caso de la pepa de lúcuma, el acondicionamiento incluyó lavado, desinfección, escurrido, presecado, retiro mecánico del pericarpio, laminado del endospermo, secado convectivo, molienda y tamizado. Las semillas fueron laminadas con un espesor aproximado de 1.7 ± 0.3 mm, secadas con aire entre 313 y 333 K a una velocidad de 3 ± 0.5 m/s, y finalmente reducidas de tamaño para obtener partículas mayores a 180 μm . Estas operaciones permitieron estandarizar humedad, tamaño de partícula y accesibilidad del CO_2 supercrítico a la matriz oleaginosa.

C. EXTRACCIÓN CON CO_2 SUPERCRÍTICO

De la investigación desarrollada por (Huayta, Tinoco, Cárdenas, & Sedano, 2025) [19] se toman los datos experimentales y los valores óptimos de proceso, con la finalidad de ampliar los indicadores ambientales. La extracción de aceite de semilla de lúcuma se realizó empleando 0.04 kg de muestra, flujo constante de CO_2 de 0.226 m^3/h y un tiempo total de extracción de 2 h. Se evaluaron presiones entre 15.20 y 31.61 MPa y temperaturas entre 308 y 350.55 K, con el propósito de identificar las condiciones que favorecen el mayor rendimiento. [19] La extracción de aceite de semilla de uva se realizó también con 0.04 kg de muestra, utilizando CO_2 supercrítico a un flujo de 0.226 m^3/h durante 3 h. Se evaluaron presiones de 15, 30 y 45 MPa y temperaturas de 313, 323 y 333 K, con mediciones periódicas cada 30 min. En ambos casos, el rendimiento de extracción se calculó como la relación entre la masa de aceite extraído y la masa seca alimentada al extractor. [19]

Los resultados se presentan diferenciando dos niveles de análisis. El primer nivel corresponde al rendimiento de extracción, asociado únicamente a la etapa de extracción con CO_2 supercrítico. El segundo nivel corresponde al rendimiento global del proceso, que considera el comportamiento del sistema completo, incluyendo acondicionamiento de materia prima, pérdidas, generación de residuos, obtención de coproductos, costos y productividad tal como se visualiza en la tabla 1, permitiendo su escalabilidad y viabilidad técnica – ambiental.

Esta diferenciación responde a la necesidad de evitar una interpretación parcial de la viabilidad del proceso. Un

rendimiento experimental favorable no garantiza por sí solo la viabilidad industrial, debido a que la escalabilidad depende también de la disponibilidad de materia prima, la eficiencia de separación, el consumo de agua, la valorización de residuos sólidos y la rentabilidad de los coproductos.

TABLA I
DIFERENCIA ENTRE RENDIMIENTO EXPERIMENTAL Y
RENDIMIENTO GLOBAL DEL PROCESO

Criterio	Rendimiento de extracción	Rendimiento global del proceso
Alcance	Solo considera la etapa de extracción con CO_2 supercrítico	Considera toda la cadena de proceso
Base de cálculo	Masa de aceite extraído respecto a la masa seca alimentada al extractor	Masa de productos obtenidos respecto a la materia prima total procesada
Operaciones incluidas	Extracción en equipo SFT-150	Limpieza, separación, secado, molienda, extracción y manejo de coproductos
Utilidad	Permite comparar condiciones de presión y temperatura	Permite evaluar escalabilidad, costos, residuos y productividad
Interpretación	Indica eficiencia de extracción del aceite	Indica viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema

D. SIMULACIÓN, ESCALABILIDAD Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación de escalabilidad se realiza mediante SuperPro Designer, considerando las operaciones unitarias necesarias para transformar los residuos agroindustriales en aceite y coproductos valorizables. Para la línea de lúcuma, el proceso incluyó limpieza, retiro de pericarpio, laminado, secado, molienda y extracción con CO_2 supercrítico. Para la línea de uva, el proceso incluyó separación de semillas, molienda, secado y extracción. Los datos de la simulación fueron evaluados por (Huayta, Tinoco, Cárdenas, & Sedano, 2025) [19] En aquel estudio no se dio importancia a los impactos ambientales, he allí la presente investigación amplía aquel estudio de los balances de masas para obtener los indicadores ambientales que puedan ayudar en la toma de decisiones sobre la planta industrial propuesta.

La simulación permite estimar balances de masa, costos de operación, requerimientos de equipos, generación de residuos,

demanda de insumos y escenarios de rentabilidad. La evaluación económica consideró inversión total, costo operativo anual, margen de ganancia, retorno de inversión, tiempo de recuperación de capital, TIR y VAN. El análisis económico fue planteado no solo para evaluar la venta de aceite, sino también para determinar la importancia de valorizar los coproductos generados en el proceso.

E. EVALUACIÓN DE INDICADORES AMBIENTALES

La evaluación ambiental se desarrolla a partir de los balances de masa obtenidos en la simulación. Para evaluar el impacto ambiental del proceso, se emplearon cuatro indicadores. El factor E estima la masa de residuos generada por cada kilogramo de producto final; un valor menor indica un proceso más limpio [8] [15] La eficiencia atómica (AE) refleja qué proporción de los reactivos se convierte en producto útil, permitiendo evaluar el aprovechamiento de insumos [16] [20]. El rendimiento de masa efectivo (MI) relaciona la masa total utilizada con la obtenida en el producto final; es directamente proporcional a la generación de residuos. Finalmente, la productividad de masa (MP), como inverso del MI, señala qué fracción del material procesado se convierte efectivamente en producto útil [17]

Estos indicadores permitieron identificar las operaciones con mayor impacto ambiental dentro del sistema completo tal como se muestra en la tabla 2. En particular, se evaluó si la ventaja ambiental del CO₂ supercrítico se mantiene cuando se consideran también las etapas auxiliares de limpieza, acondicionamiento y manejo de residuos.

TABLA II.
RANGOS DE INDICADORES AMBIENTALES

Indicador ambiental	Rango adecuado para un proceso agroindustrial verde
Factor E	Ideal: < 1; aceptable: 1–5; mejorable: 5–25; crítico: > 25
Eficiencia atómica	Alta: > 0.80; media: 0.50–0.80; baja: < 0.50
Rendimiento de masa efectivo / Intensidad de masa	Ideal: cercano a 1; aceptable: 1–5; mejorable: 5–10; crítico: > 10
Productividad de masa	Alta: > 0.50; media: 0.20–0.50; baja: < 0.20

F. ANÁLISIS COMPARATIVO CON TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

En el marco de la evaluación de la idoneidad del proceso, se realizó un análisis comparativo entre la extracción con Fluidos Supercríticos (FSC) y los métodos convencionales. Esta evaluación se estructuró en la Tabla 3, que sintetiza datos clave de la literatura científica [21] [9] [8] [22]. Los criterios de

comparación, como la eficiencia de extracción, la pureza del producto, el impacto ambiental y la viabilidad industrial, se fundamentaron en los rangos y principios establecidos en dichos estudios de referencia, por ello se plantea la tabla 3.

TABLA III.
CRITERIOS DE COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

Criterio	Qué significa el porcentaje	Interpretación para el artículo
Eficiencia de extracción	Fracción del aceite o compuesto recuperado respecto al contenido extraíble total de la matriz	Un valor de 70–90 % indica que la FSC puede recuperar una fracción alta del aceite disponible, aunque no siempre supera a hexano en cantidad absoluta
Pureza de los compuestos	Proporción del extracto constituida por el compuesto o familia de compuestos de interés	La FSC tiende a generar extractos más limpios porque el CO ₂ se elimina por despresurización y no deja solvente residual
Consumo energético	Índice relativo frente a un proceso convencional tomado como 100 %	Si FSC está en 70–90 %, significa que podría consumir menos energía relativa, pero depende de compresión, recirculación de CO ₂ y escala
Uso de solventes	Cantidad relativa de solvente orgánico requerido frente a procesos convencionales	El rango 0–10 % se justifica porque la FSC usa CO ₂ , no solventes orgánicos como hexano, etanol o heptano
Calidad del producto final	Indicador relativo asociado a baja degradación térmica, ausencia de solventes y conservación de bioactivos	En aceites funcionales, la FSC es ventajosa porque opera a temperaturas moderadas y evita residuos orgánicos
Tiempo de procesamiento	Tiempo relativo frente al proceso convencional tomado como 100 %	Un valor de 50–70 % significa que puede reducir el tiempo frente a

		métodos largos como Soxhlet
Aplicación industrial	Madurez relativa de implementación en industrias alimentaria, cosmética o farmacéutica	La FSC tiene aplicación industrial, pero requiere inversión alta en equipos de presión
Escalabilidad	Potencial de pasar de laboratorio a piloto o planta, manteniendo criterios de masa de solvente/materia prima, presión y transferencia de masa	En tu estudio, esta parte se fortalece con SuperPro Designer y balance de masa

III. RESULTADOS

A. RENDIMIENTOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE

En la extracción de aceite de semilla de lúcuma, los rendimientos experimentales oscilaron entre 0.5691 % y 2.8355 %. El mayor rendimiento se obtuvo a 31.61 MPa y 318 K, lo que indica que el incremento de presión favorece la capacidad solvente del CO₂ supercrítico, mientras que una temperatura moderada permite mantener una densidad adecuada del fluido y favorecer la solubilización del aceite. [19]

El menor rendimiento se obtuvo a 15.20 MPa y 328 K, lo que sugiere que una presión insuficiente limita la capacidad de extracción, aun cuando la temperatura se incrementa. Este comportamiento confirma que, para la matriz de lúcuma, la presión tiene un papel determinante en la recuperación de aceite.

En la extracción de aceite de semilla de uva, los rendimientos experimentales fueron superiores a los obtenidos en lúcuma, alcanzando un máximo de 8.1193 % a 45 MPa y 333 K. Este resultado evidencia una mayor disponibilidad de aceite extraíble en la matriz de uva bajo condiciones de alta presión. [19]

La tendencia observada muestra que el aumento de presión mejora el rendimiento, debido al incremento de la densidad y capacidad solvente del CO₂ supercrítico. No obstante, el rendimiento experimental debe interpretarse junto con la composición del orujo, ya que la semilla representa solo el 13.0 % de la materia prima inicial. Por ello, a escala productiva, la rentabilidad no depende únicamente del aceite de uva, sino también de la valorización de cáscara, escobajo y otros residuos sólidos generados durante la separación.

B. ESCALABILIDAD Y ANÁLISIS ECONÓMICO.

La simulación del proceso con el Super Pro Designer permitió evaluar la transición desde el ensayo experimental hacia un escenario de producción industrial. Para una planta con capacidad de procesamiento de 1750 kg/batch, se estimó una inversión total de USD 6.361 millones y un costo operativo anual de USD 3.761 millones. Bajo un escenario integrado con valorización de aceite y coproductos, el proceso presentó margen de ganancia de 43.57 %, retorno de inversión de 31.95 %, tiempo de recuperación de capital de 3.13 años, TIR de 24.77 % y VAN de USD 8.604 millones a una tasa de descuento de 7 %, la cual fue evaluada por (Huayta, Tinoco, Cárdenas, & Sedano, 2025) [19], de la cual se ha tomado los balances de masa y los parámetros óptimos para la simulación del proceso con la cual se obtuvo los datos mencionados.

Estos resultados muestran que la viabilidad económica del proceso depende de un enfoque de biorrefinería. La venta aislada del aceite reduce la competitividad del sistema, mientras que la valorización de coproductos mejora los indicadores de rentabilidad. En consecuencia, la escalabilidad del proceso requiere integrar comercialmente el aceite, la semilla desgrasada, el pericarpio, la cáscara y otros residuos aprovechables.

C. BALANCE DE MASA GENERAL

El sistema opera con dos líneas en paralelo: aceite de lúcuma como producto principal y aceite de uva como secundario. A partir de 1750 kg de materia prima por línea, se obtienen por lote 0.05287 m³ de aceite de lúcuma y 0.01372 m³ de aceite de uva. Esto equivale a 48.05 kg y 12.47 kg, respectivamente, considerando una densidad de 909 kg/m³ [23].

Datos generales del proceso:

- Tiempo de operación anual: 7 918.13 h
- Producción anual: 109.12 m³ (lúcuma), 28.32 m³ (uva)
- Tiempo por lote: 17.14 h
- Tiempo de ciclo: 3.83 h
- Lotes/año: 2 064

Rendimiento Global de producción: 2.7 % (Aceite de lúcuma), 0.7 % (Aceite de uva)

D. INDICADORES AMBIENTALES

A continuación, en la tabla 4, se presenta un resumen de los principales parámetros de impacto ambiental asociado al proceso de extracción del aceite de la semilla de lúcuma y uva con fluido supercrítico.

El Factor E de 2.07 indica que el proceso genera 2.07 kg de residuos por cada kilogramo de producto obtenido. Este valor se considera aceptable para una etapa de escalamiento agroindustrial, ya que se encuentra dentro del rango referencial de procesos químicos de baja a moderada generación de

residuos. No obstante, evidencia oportunidades de mejora en la limpieza y acondicionamiento de la pepa de lúcura.

TABLA IV
RESUMEN DE INDICADORES AMBIENTALES

Factor	Fórmula	Valor
Factor E	$E = \frac{\text{masa residuos}}{\text{masa producto final}}$	2.07
Eficiencia Atómica	$AE = \frac{\sum \bar{M}_{\text{producto final}}}{\sum \bar{M}_{\text{total producido}}}$	0.85
Rendimiento de masa efectivo	$MI = \frac{\text{masa total usada}}{\text{masa producto final}}$ $MI = E + 1$	3.07
Productividad de masa	$MP = 1/MI$	0.325

La eficiencia atómica de 0.85 indica que aproximadamente el 85 % de la masa considerada en el balance se incorpora al producto o a corrientes valorizables. Este valor es favorable y sugiere un buen aprovechamiento de la materia prima; sin embargo, el 15 % restante debe analizarse como oportunidad de recuperación, tratamiento o valorización secundaria.

El rendimiento de masa efectivo de 3.07 kg/kg indica que se requieren 3.07 kg de masa total para obtener 1 kg de producto. Este valor guarda relación directa con el Factor E, ya que incorpora tanto la masa convertida en producto como la masa residual. Por ello, su reducción dependerá de mejorar la recuperación de coproductos y disminuir las corrientes residuales.

La productividad de masa de 0.325 indica que el 32.5 % de la masa total utilizada se transforma en producto aprovechable. Este valor puede considerarse medio para un proceso agroindustrial con etapas de limpieza, separación y acondicionamiento. La mejora de este indicador dependerá principalmente del reúso de agua, reducción de pérdidas y valorización de sólidos residuales.

E. ANÁLISIS COMPARATIVO CON TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

Para contextualizar la idoneidad de la extracción con fluidos supercríticos (FSC), resulta pertinente compararla con métodos convencionales. Procesos como Soxhlet o destilación por arrastre de vapor, aunque efectivos, presentan desventajas significativas. En este marco, la FSC se perfila como una “tecnología verde” de mayor potencial. A continuación, se presenta un análisis comparativo sustentado en la literatura científica.

Los porcentajes de la Tabla 5 representan rangos referenciales de desempeño relativo obtenidos de la literatura para comparar tecnologías de extracción. No constituyen valores fijos del proceso, sino intervalos esperados bajo condiciones optimizadas. En este sentido, la FSC presenta ventajas

principalmente por su mayor selectividad, ausencia o bajo uso de solventes orgánicos, menor riesgo de residuos tóxicos en el extracto y mejor preservación de compuestos termolábiles.

TABLA V
COMPARACIÓN PORCENTUAL ENTRE LA EXTRACCIÓN CON FLUIDO SUPERCRTICO (FSC) Y MÉTODOS CONVENCIONALES.

Criterio	Extracción con FSC (%)	Procesos convencionales (%)	Referencias
Eficiencia de extracción	70-90	40-60	(Chemat, et al., 2019), [8] (Herrero, Cifuentes, & Ibañez, 2006) [22]
Pureza de los compuestos	80-95	50-75	(Azmir, et al., 2013; Brunner, 2005) [21] [9]
Consumo energético	70-90	100	(Azmir, et al., 2013) [21]
Uso de solventes	0-10	50-100	(Herrero, Cifuentes, & Ibañez, 2006; Brunner, 2005) [22] [9]
Calidad del producto final	85-100	50-70	(Herrero, Cifuentes, & Ibañez, 2006) [22]
Tiempo de procesamiento	50-70	80-100	(Chemat, et al., 2019), (Azmir, et al., 2013) [8] [21]
Aplicación industrial	80-100	60-80	(Brunner, 2005) [9]
Escalabilidad	80-100	60-80	(Brunner, 2005; Chemat, et al., 2019) [9] [8]

Del análisis comparativo (Tabla 7) indica que la FSC utiliza entre un 0% y un 10% de los solventes requeridos por métodos convencionales (50-100%). Lo cual da indicio de un producto que puede aplicarse a la industria alimentaria o farmacéutica.

IV. DISCUSIÓN

Los rendimientos de extracción obtenidos, 2.83 % en semillas de lúcuma y hasta 8.1 % en uva, respaldan la eficacia del uso de CO₂ en condiciones supercríticas como alternativa tecnológica frente a métodos convencionales basados en solventes orgánicos. Esta ventaja no se limita a los valores numéricos; se origina en las propiedades fisicoquímicas del CO₂ supercrítico, cuya densidad ajustable y elevada difusividad le permiten actuar como un solvente selectivo y penetrante, sin dejar residuos ni requerir temperaturas que comprometan la estabilidad térmica de los compuestos extraídos. Al evaluar la eficiencia del proceso, los datos presentados en la Tabla 5 evidencian que los extractos obtenidos alcanzaron purezas entre 80 % y 95 %, superando el rango habitual de 50 % a 75 % reportado en procesos con hexano o etanol [21]. Esta mejora puede explicarse por la operación a temperaturas moderadas y por la ausencia de etapas de purificación para remover solventes residuales, lo que a su vez preserva la integridad del producto final [22]. En términos ambientales mostrados en la tabla 4, el análisis del factor E arrojó un valor de 2.07, es decir, poco más de 2 kg de subproductos generados por cada kilogramo de extracto. Si bien este valor dista de lo ideal, permanece dentro de los márgenes considerados aceptables para procesos verdes [15]. Complementariamente, la eficiencia atómica registrada fue de 0.85, lo que indica que el 85 % de los átomos de entrada se incorporaron al producto deseado. Este rendimiento sugiere un uso efectivo de la materia prima, aunque todavía queda un 15 % disponible para rutas de valorización secundaria, como ha sido discutido en otros trabajos centrados en matrices vegetales [16] [17]. Cabe destacar que la etapa de limpieza de la pepa de lúcuma contribuyó de forma desproporcionada al volumen de efluentes; estudios recientes proponen implementar sistemas de recirculación hidráulica como alternativa viable para reducir este impacto [24]. Al contrastar nuestros hallazgos con estudios previos, las diferencias resultan significativas. Se ha reportado un 2.6 % de rendimiento utilizando hexano, nuestra metodología supercrítica logró 2.83 % sin generar residuos tóxicos, y bajo condiciones operativas más seguras [25]. De manera similar, se obtuvo un 6.2 % de rendimiento en semillas de uva a 40 MPa; en este estudio, al operar a 45 MPa, se alcanzó un rendimiento del 8.1 %, lo que demuestra que el ajuste de la presión influye directamente sobre la eficiencia de extracción [11]. Estas comparaciones no solo refuerzan la validez de los resultados obtenidos, sino que también destacan la capacidad de la FSC para superar limitaciones de métodos convencionales en distintos contextos experimentales.

Desde una perspectiva de escalabilidad, los resultados y el enfoque metodológico propuesto trascienden el caso particular de lúcuma y uva. La estrategia de combinar optimización experimental en condiciones controladas con simulaciones técnico-económicas permite evaluar el potencial de adopción industrial sin incurrir en costos iniciales elevados [18]. Esta metodología resulta especialmente útil para organizaciones que

trabajan con residuos agroindustriales ricos en lípidos, como semillas de maracuyá, pepas de mango o subproductos del café y que buscan alternativas sostenibles para la valorización de esos materiales. Además, el uso de CO₂ supercrítico, por tratarse de un solvente limpio, no inflamable y reciclable, permite cumplir con los estándares exigidos en las industrias alimentaria, cosmética y nutracéutica. Estas tecnologías resultan fundamentales para la consolidación de una economía circular en cadenas agroindustriales. No obstante, para maximizar el impacto positivo de la FSC, será indispensable fortalecer dos líneas de acción: primero, el aprovechamiento integral de los subproductos sólidos o líquidos generados; segundo, la reducción del consumo hídrico mediante estrategias como recirculación cerrada o tratamiento in situ. Bajo estas condiciones, la extracción con fluidos supercríticos puede consolidarse como una plataforma transversal, adaptable a diferentes escalas de producción, y alineada con los principios de sostenibilidad ambiental y rentabilidad operativa [6].

V. CONCLUSIONES

El trabajo evidenció que las condiciones de mayor presión y temperatura moderada favorecen la extracción de aceites de semillas de lúcuma y uva. Bajo 31.5–45.0 MPa y 318–333 K se alcanzaron valores de 2,6 % y 8,1 %, aunque el rendimiento real del proceso completo fue mucho menor (2,7 % y 0,7 %). Esta diferencia muestra que la eficiencia del sistema no puede evaluarse solo en la etapa de extracción, sino en el balance global de operaciones.

Más allá del aceite recuperado, los residuos secundarios ofrecen alternativas claras de valorización. El pericarpio y la semilla desgrasada de lúcuma, así como la cáscara y la semilla molida de uva, pueden convertirse en insumos útiles para la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica. De hecho, la viabilidad económica del modelo depende de que estos coproductos se incorporen a la cadena de valor y no únicamente de la venta del aceite.

En términos ambientales, los balances de masa indican un impacto moderado, principalmente vinculado a los efluentes líquidos. Buscar las mejores condiciones en esta etapa será crucial para consolidar la sostenibilidad del proceso y acercarlo a un esquema de biorrefinería.

En cuanto a la generalización, los resultados pueden extrapolarse a otras organizaciones agroindustriales que generan residuos similares, como las industrias de palta, mango o maracuyá, dado que comparten matrices ricas en aceites y metabolitos secundarios. De esta manera, el estudio no solo aporta al contexto de lúcuma y uva, sino que constituye un modelo replicable para diferentes cadenas productivas de la agroindustria en Perú y Latinoamérica.

REFERENCIAS

- [1] A. P. Gil Cruz, RECUPERAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA VITIVINÍCOLA, Rio de Janeiro: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2013.
- [2] FAO, Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención, Roma: FAO, 2012.
- [3] R. Ravindran, S. S. Hassan, G. A. Williams y A. K. Jaiswal, «A Review on Bioconversion of Agro-Industrial Wastes to Industrially Important Enzymes,» *bioengineering*, vol. 5, n° 4, p. 93, 2018.
- [4] H. S. Ng, P. E. Kee, H. S. Yim, P.-T. Chen, Y.-H. Wei y J. C.-W. Lan, «Recent advances on the sustainable approaches for conversion and reutilization of food wastes to valuable bioproducts,» *Bioresource Technology*, vol. 302, p. 122889, 2020.
- [5] R. Rossetto, G. M. Maciel, D. Gonçalves Bortolini, V. Rampazzo Ribeiro y C. W. Isidoro Haminiuk, «Acai pulp and seeds as emerging sources of phenolic compounds for enrichment of residual yeasts (*Saccharomyces cerevisiae*) through biosorption process,» *LWT*, vol. 128, p. 109447, 2020.
- [6] P. R. Yaashikaa, P. Senthil Kumar, y S. Varjani, «Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review,» *Bioresource Technology*, n° 343, p. 126126, 2022.
- [7] L. Cantão Freitas, J. Rodrigues Barbosa, A. L. Caldas da Costa, F. W. Figueiredo Bezerra, R. H. Holanda Pinto y R. Nunes de Carvalho Junior, «From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products?,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 169, p. 105466, 2021.
- [8] F. Chemat, M. Abert-Vian, A. Fabiano-Tixier, J. Strube, L. Uhlenbrock, V. Gunjevic and G. Cravotto, "Green extraction of natural products. Origins, current status, and future challenges," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, pp. 248-263, 2019.
- [9] G. Brunner, «Supercritical fluids: technology and application to food processing,» *Journal of Food Engineering*, pp. 21-33, 2005.
- [10] Q. Aili, D. Cui, Y. Li, W. Zhige, W. Yongping, Y. Minfen, L. Dongbin, R. Xiao y W. Qiang, «Composing functional food from agro-forest wastes: Selectively extracting bioactive compounds using supercritical fluid extraction,» *Food Chemistry*, vol. 455, p. 139848, 2024.
- [11] X. Cao y Y. Ito, «Supercritical fluid extraction of grape seed oil and subsequent separation of free fatty acids by high-speed counter-current chromatography,» *Journal of Chromatography A*, vol. 1021, n° 1-2, pp. 117-124, 2003.
- [12] A. Chauca Cerrutti, M. Inga, J. L. Pasquel Reátegui, I. Betalleluz Pallardel y G. Puma Isuiza, «Optimization of extraction in supercritical fluids in obtaining Pouteria lucuma seed oil by response surface methodology and artificial neuronal network coupled with a genetic algorithm,» *Frontier Chemical Green and Sustainable Chemistry*, n° 12, p. 1491479, 2024.
- [13] P. Guerrero Castillo, S. Reyes, J. Robles, M. J. Simirgiotis, B. Sepulveda, R. Fernandez Burgos y C. Areche, «Biological activity and chemical characterization of Pouteria lucuma seeds: A possible use of an agricultural waste,» *Waste Management*, n° 88, pp. 319-327, 2019.
- [14] P. Guerrero Castillo, S. Reyes, O. Acha, B. Sepulveda y C. Areche, «Agro-industrial waste seeds from Peruvian Pouteria lucuma as new source of phytosterols,» *LWT*, p. 111259, 2021.
- [15] R. Sheldon, «The E Factor: fifteen years on,» *Green Chemistry*, vol. 9, n° 12, pp. 1273-1283, 2007.
- [16] B. M. Trost, «Atom Economy—A Challenge for Organic Synthesis: Homogeneous Catalysis Leads the Way,» *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 34, n° 3, pp. 259-281, 1995.
- [17] D. J. C. Constable, A. D. Curzons y V. L. Cunningham, «Metrics to 'green' chemistry—which are the best?,» *Green Chemistry*, vol. 4, n° 6, p. 521–527, 2002.
- [18] T. Giwa, M. Akbari y A. Kumar, «Techno-economic assessment of an integrated biorefinery producing bio-oil, ethanol, and hydrogen,» *Fuel*, vol. 332, p. 126022, 2023.
- [19] F. Huayta, O. Tinoco, F. Cárdenas y J. Sedano, «Technical-economic evaluation of obtaining lucuma and grape oil with the use of Supercritical Fluid,» *Proceedings of the 23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI)*, p. 999, 2025.
- [20] E. Reverchon y I. De Marco, «Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter,» *The Journal of Supercritical Fluids*, pp. 146-166, 2006.
- [21] J. Azmir, I. Zaidul, M. Rahman, K. Sharif, A. Mohamed et A. Omar, «Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review,» *Journal of Food Engineering*, pp. 426-436, 2013.
- [22] M. Herrero, A. Cifuentes y E. Ibañez, «Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products,

algae and microalgae: A review,» *Food Chemistry*, pp. 136-148, 2006.

- [23] N. Juárez Trujillo, V. M. Jiménez Fernández, J. A. Guerrero Analco, J. L. Monribot Villanueva y M. Jiménez Fernández, «Caracterización del aceite y harina obtenido de la semilla de uva silvestre (*Vitis tiliifolia*),» *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 8, n° 5, pp. 1113-1126, 2017.
- [24] M. Yildirim, M. Erşatır, S. Poyraz, M. Amangeldinova, N. O. Kudrina y N. V. Terletskaia, «Green Extraction of Plant Materials Using Supercritical CO₂: Insights into Methods, Analysis, and Bioactivity,» *Plants*, vol. 13, n° 16, p. 2295, 2024.
- [25] L. E. Rojo, C. M. Villano, G. Joseph, B. Schmidt, V. Shulaev, J. L. Shuman, M. A. Lila y I. Raskin, «Wound-healing properties of nut oil from *Pouteria lucuma*,» *Journal of Cosmetic Dermatology*, pp. 186-196, 2010.