



Gestión y diagnóstico de eficiencia productiva en una biorrefinería de aceites obtenidos por extracción con fluidos supercríticos de semillas de uva y lúcuma

Management and diagnostic of productive efficiency in a biorefinery of oils obtained by supercritical fluid extraction from grape and lucuma seeds

Fredy Vicente Huayta Socantaype¹; Luis Enrique Napan Tacca¹

¹ Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801 San Miguel 15088I, Lima, Perú.

ORCID de los autores:

F. V. Huayta Socantaype: <https://orcid.org/0000-0002-3732-731X>

L. E. Napan Tacca: <https://orcid.org/0000-0002-7423-7516>

RESUMEN

Este trabajo presenta un diagnóstico integral de una biorrefinería industrial dedicada a la obtención de aceites a partir de semillas de uva y de lúcuma, utilizando dióxido de carbono supercrítico (FSC) como solvente verde. El análisis se desarrolló con un modelo de simulación en SuperPro Designer, que permitió examinar tres aspectos esenciales: el desempeño operativo, la eficiencia de masa y el impacto ambiental del proceso. Los resultados mostraron una eficiencia global de 1,73%, afectada por limitaciones en las etapas de secado (TDR-102) y descascarillado (SR-101), que reducen la capacidad productiva al 12,7% del potencial teórico. La huella hídrica fue de 103 kg de agua por kilogramo de aceite, y el índice de residuos alcanzó 0,03 kg/kg de materia prima, lo que indica la necesidad de mejorar la gestión de recursos. El modelo permitió proponer medidas de optimización centradas en la intensificación de procesos, la estandarización de la materia prima y el control dinámico con apoyo de inteligencia artificial. En conjunto, los resultados evidencian que la simulación de procesos combinada con indicadores de sostenibilidad puede guiar el desarrollo de biorrefinerías bajo un enfoque de economía circular.

Palabras clave: Extracción supercrítica; simulación de procesos; ciclo de vida (LCI); sostenibilidad de procesos; economía circular.

ABSTRACT

This This paper presents a comprehensive diagnosis of an industrial biorefinery dedicated to obtaining oils from grape and lucuma seeds, using supercritical carbon dioxide (SCD) as a green solvent. The analysis was carried out using a simulation model in SuperPro Designer, which allowed three essential aspects to be examined: operational performance, mass efficiency, and the environmental impact of the process. The results showed an overall efficiency of 1.73%, affected by limitations in the drying (TDR-102) and shelling (SR-101) stages, which reduce production capacity to 12.7% of the theoretical potential. The water footprint was 103 kg of water per kilogram of oil, and the waste index reached 0.03 kg/kg of raw material, indicating the need to improve resource management. The model allowed for the proposal of optimization measures focused on process intensification, raw material standardization, and dynamic control with artificial intelligence support. Overall, the results show that process simulation combined with sustainability indicators can guide the development of biorefineries under a circular economy approach.

Keywords: Supercritical extraction; process simulation; Life Cycle (LCI); process sustainability; circular economy.

1. Introducción

El procesamiento agroindustrial genera grandes volúmenes de residuos y efluentes que, de no ser valorizados, constituyen una fuente relevante de contaminación ambiental. A nivel global, las pérdidas y desperdicios de alimentos generan impactos económicos estimados en más de 12 billones de dólares anuales, además de contribuir significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero (FAO, 2023; Ng et al., 2020). En el ámbito nacional, los cultivos de uva y lúcuma destacan por su relevancia productiva y por el volumen de subproductos que generan. En 2024, la producción peruana de uva superó las 940 mil toneladas y la de lúcuma alcanzó cerca de 12 mil toneladas (MIDAGRI, 2024). En la uva, las semillas representan en promedio un 4% – 5% del peso del fruto en variedades viníferas (Gombau et al., 2020), mientras que en la lúcuma, las semillas constituyen entre 11 % y 13 % del peso del fruto (Cari, 2018). Con base en estos valores, se estima que el país produce anualmente más de 43 mil toneladas de residuos valorizables, principalmente semillas de uva y semillas de lúcuma. La mayoría de estos subproductos se descarta sin aprovechamiento, pese a su alto potencial industrial como fuente de aceites funcionales, compuestos fenólicos y fitoesteroles con aplicaciones alimentarias, cosméticas y farmacéuticas (Guerrero-Castillo et al., 2019). Para la recuperación de compuestos de alto valor, se han evaluado diversas tecnologías, pero la extracción con fluidos supercríticos (FSC) emerge como la solución más alineada con los principios de la química verde y la sostenibilidad industrial. A diferencia de los métodos convencionales basados en solventes orgánicos como el hexano, asociados a riesgos de toxicidad, altos consumos energéticos y posibles residuos en el producto final, la FSC utiliza dióxido de carbono (CO₂) en estado supercrítico, que al someterse a condiciones específicas de presión y temperatura, generalmente por encima de 31,1 °C y 73,8 bar, adquiere propiedades de un fluido híbrido: densidad de líquido, confiriéndole alta capacidad de solvencia, y viscosidad y difusividad de gas, permitiéndole penetrar eficientemente en la matriz porosa de la semilla (Chemat et al., 2020; Yildirim et al., 2024). Esta técnica se reconoce como una tecnología verde por múltiples ventajas: el CO₂ es un solvente no tóxico, no inflamable, económico y abundante; su selectividad puede ajustarse finamente mediante presión y temperatura, y se separa del extracto por despresurización, evaporándose sin dejar residuos y permitiendo su

reciclaje en el proceso (Brunner, 2005). La eficacia de la FSC ha sido ampliamente validada en las materias primas de interés: en semillas de uva se alcanzan rendimientos de aceite superiores al 6%, con co-extracción de antioxidantes y fitoesteroles, resultando en un producto limpio y funcional, mientras que en semillas de lúcuma se reportan recuperaciones superiores al 97 % del contenido total de aceite, caracterizado por su riqueza en fitosteroles y otros compuestos bioactivos, evidenciando su potencial para aplicaciones de alto valor añadido (Prado-Acebo et al., 2024). Sin embargo, la gran mayoría de las investigaciones sobre fluidos supercríticos se detienen en la escala de laboratorio. Sus análisis suelen centrarse en el rendimiento de extracción o en métricas de química verde. Si bien estos indicadores teóricos son valiosos, por sí solos no pueden predecir la viabilidad de un proceso a escala industrial. En una planta real, surgen problemas prácticos que los estudios de laboratorio no consideran: cuellos de botella operativos, consumos energéticos reales, subutilización de equipos y la generación de enormes volúmenes de efluentes (Sheldon, 2007; Trost, 1995; Yildirim et al., 2024). En la práctica, la transición de escala de laboratorio a una planta piloto exige un cambio de enfoque. Los principios de la química verde deben traducirse en decisiones de ingeniería concretas que garanticen la continuidad operativa, la eficiencia de masa y el control ambiental. La simulación de procesos a gran escala, como la que realizamos en SuperPro Designer, es la herramienta que nos permite conectar ambos mundos. Este enfoque modela la interacción entre equipos, calcula los balances de masa reales y expone las limitaciones físicas del sistema. El modelo no busca replicar las condiciones a escala laboratorio, sino representar la realidad dinámica de una biorrefinería. Aquí, la eficiencia deja de ser solo una propiedad termodinámica del solvente y pasa a depender del flujo integral de materiales, la sincronización de las operaciones y la gestión de los residuos. Por ello, este estudio plantea un modelo de simulación orientado a un diagnóstico de ingeniería de la planta. El modelo une las dimensiones operativas, la eficiencia de masa y el desempeño ambiental para reflejar el comportamiento real de la biorrefinería en condiciones industriales. Para consolidar esta visión, incorporamos un tablero de indicadores clave (KPIs) que traduce las métricas abstractas de la química verde en parámetros operativos que se pueden medir y gestionar. Esta integración es la que nos permite vincular los

datos del laboratorio con la viabilidad industrial. Con ella, podemos identificar qué equipos frenan la producción, estimar cuánto podemos mejorar la capacidad instalada y caracterizar las corrientes de residuos. Así, sentamos las bases para proponer estrategias de optimización que guíen un escalado eficiente, basado en los principios de la sostenibilidad y la ingeniería de procesos avanzada.

2. Metodología

En esta sección se debe describir todos los materiales, procedimientos y métodos utilizados en el estudio.

Calibración del modelo de simulación

La calibración del modelo se realizó a partir de información experimental obtenida en estudios previos de extracción supercrítica con CO₂. Para la uva (*Vitis vinifera*), se consideraron los datos de Aizpurua-Olaizola et al. (2015), quienes trabajaron con residuos enológicos y optimizaron la recuperación secuencial de ácidos grasos y polifenoles. En su estudio, bajo 35 °C y 253 bar, se alcanzaron rendimientos cercanos al 6% para residuos de vino tinto y al 2% para los de vino blanco. En el caso de la lúcuma (*Pouteria lucuma*), se emplearon los resultados de Chauca-Cerrutti et al. (2024). Estos autores identificaron condiciones óptimas de 45 °C, 300 bar y un flujo de 6 mL min⁻¹, con una recuperación del 97,35% del aceite total. Los valores experimentales se usaron como parámetros de entrada en SuperPro Designer para las unidades de extracción supercrítica (SMSX-101 y SMSX-102). Durante la calibración, se ajustaron los factores de recuperación de aceite y las fracciones de residuo sólido hasta reproducir los rendimientos observados en laboratorio. De este modo, el modelo reproduce con fidelidad el desempeño de la operación bajo condiciones representativas de procesos supercríticos en matrices oleaginosas, manteniendo coherencia con la evidencia experimental publicada (Aizpurua-Olaizola et al., 2015; Chauca-Cerrutti et al., 2024).

Simulación

La evaluación de la biorrefinería para la valorización de residuos de lúcuma y de uva se realizó mediante simulaciones en SuperPro Designer, una plataforma ampliamente utilizada para modelar procesos de biorrefinerías (Petrides et al., 1995). El modelo se construyó a partir de datos de entrada representativos, incluyendo composiciones de materia prima (semilla de

lúcuma y uva) y flujos de masa y energía, derivados de estudios previos (Aranda-Barradas et al., 2025). Las simulaciones abarcaron tres módulos principales: balance de masa, análisis de producción y evaluación de impacto ambiental, generados como reportes independientes para diagnosticar la eficiencia del proceso, identificar cuellos de botella y cuantificar el impacto ambiental.

El balance de masa se obtuvo configurando un flujo de proceso que integra etapas de pretratamiento, extracción y secado, utilizando datos cinéticos y termodinámicos validados experimentalmente a partir de ensayos de laboratorio y referencias bibliográficas. Estos valores sirvieron como inputs para el modelado del proceso, en lugar de suposiciones teóricas. El análisis de producción incluyó la optimización del throughput y la identificación de restricciones, empleando los algoritmos internos de SuperPro Designer (Petrides et al., 1995).

La evaluación ambiental se basó en un inventario de ciclo de vida (LCI) cradle-to-gate generado por el software, cuantificando entradas y salidas de materia, energía y efluentes, sin extenderse a una evaluación de impacto completa (LCIA). Debido a la limitada disponibilidad de datos dinámicos de planta, se priorizó la validación cualitativa con información reportada en la literatura (Häussling Löwgren et al., 2025).

Para la uva, el rendimiento teórico de extracción fue de 6,8% (245616 kg/año), validado experimentalmente a 45 MPa y 333 K. La producción real simulada fue de 25738 kg/año, con una merma de 219878 kg/año, lo que representa una eficiencia global de 10,5%. En el caso de la lúcuma, el rendimiento teórico fue de 2,83% (102219,6 kg/año) a 31,6 MPa y 318 K, obteniéndose 99175 kg/año de producto y una merma de solo 3044,6 kg/año, equivalente a una eficiencia del 97%.

3. Resultados y discusión

Esta sección presenta el diagnóstico de ingeniería de una biorrefinería a gran escala para valorizar semillas de lúcuma y uva mediante extracción de aceite con dióxido de carbono supercrítico (CO₂-SC). El análisis integra el desempeño operativo, la eficiencia de masa y el comportamiento ambiental del sistema para evaluar la viabilidad técnica del escalado industrial. El proceso se modeló en SuperPro Designer, generando el diagrama de flujo de procesos (PFD) mostrado en la Figura 1, que resume la arquitectura general de la planta.

Ambas líneas —uva y lúcuma— comparten las etapas de acondicionamiento, secado y molienda, seguidas de la extracción supercrítica (SMSX-101 y SMSX-102), recuperación del solvente y manejo de subproductos. Este flujograma constituye la base para los análisis posteriores de producción, balance de masa y desempeño ambiental, permitiendo identificar los límites reales de eficiencia y sostenibilidad del proceso a escala industrial. El diagrama conceptual ilustra el diseño del proceso, desde la limpieza (WSH-101) hasta la extracción supercrítica (SMSX-101 y SMSX-102), destacando las líneas paralelas para lúcuma y uva.

A partir de esta configuración, se desarrolló un balance de masa global con el propósito de establecer el marco cuantitativo de operación de la biorrefinería y caracterizar la distribución de flujos a nivel industrial. Este balance vincula la capacidad nominal del sistema con la conversión efectiva de materia prima, describiendo las proporciones de producto, coproductos y pérdidas a lo largo de la cadena de procesamiento. Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 1, que resume los principales indicadores de producción anual, consumo de insumos y generación de salidas. Comenzamos el análisis revisando el inventario y la secuencia de operaciones generados por la simulación. A partir de ellos, evaluamos la utilización de los equipos, entendida como el porcentaje de tiempo efectivo de operación respecto al ciclo total de planta. El objetivo fue identificar cómo la capacidad individual de cada unidad afectaba el rendimiento global y cómo la eficiencia del proceso se relacionaba con la dinámica de producción. En este estudio, el throughput representa la cantidad real de material procesado por unidad de tiempo, mientras que el uptime corresponde al tiempo operativo efectivo de cada equipo. El diagnóstico se realizó paso a paso, localizando restricciones y desbalances en el flujo.

Los equipos con sobrecarga o largos periodos de inactividad fueron clasificados como cuellos de botella o desincronizaciones operativas. A continuación, en la Tabla 2 se resume estos resultados, mostrando las unidades más críticas, su nivel de utilización y el diagnóstico correspondiente. La configuración general de la biorrefinería, ilustrada en el flujograma conceptual (Figura 1), establece el flujo secuencial desde la limpieza (WSH-101) hasta la extracción FSC (SMSX-101 y SMSX-102), destacando las líneas paralelas para pepas de lúcuma y orujo de uva con puntos de convergencia en secado y molienda. Este diseño sirve como base para un balance de masa global, cuyos resultados se resumen en la Tabla 1, proporcionando datos integrales de producción (124913 kg/año de aceite), consumo de insumos (7224000 kg/año de materia prima sólida) y generación de salidas. Esta síntesis cuantitativa revela una eficiencia de conversión global de solo 1,73%, un valor que, a primera vista, podría interpretarse como una limitación severa, pero que, al desglosarse, expone un desbalance crítico entre producción teórica y real, abriendo oportunidades para la optimización bajo los principios de la bioeconomía circular. El análisis del balance de masa identifica las principales mermas como un pilar del life cycle thinking. De los 7224000 kg/año de materia prima procesada, solo 124913 kg/año se convierten en aceite, mientras que el 98,27% restante se transforma en coproductos sólidos valorizables, principalmente tortas con potencial energético, nutracéutico o agronómico. Este enfoque trasciende la noción convencional de merma como pérdida, alineándose con las biorrefinerías en cascada que promueven la valorización integral y secuencial de la biomasa mediante la recuperación escalonada de fracciones químicamente diversas (Vignesh et al., 2023).

Tabla 1 / Table 1

Inventario resumido de flujos de materia del modelo de simulación / Summary inventory of material flows from the simulation model

Categoría	Parámetro	Valor	Unidad
Rendimiento operativo	Tiempo de operación anual	7918	h/año
	Lotes procesados	2064	lotes/año
	Tiempo de lote (Batch Time)	17,14	h/lote
	Tiempo de ciclo (Cycle Time)	3,83	h/lote
Producción anual	Aceite de lúcuma	99175	kg/año
	Aceite de uva	25738	kg/año
Consumo de insumos clave	Semilla de lúcuma	3612000	kg/año
	Semilla de uva	3612000	kg/año
	Agua (limpieza)	12879334	kg/año
Generación de salidas	Efluentes acuosos totales	12879360	kg/año
	Emisiones gaseosas totales	64677558	kg/año

Tabla 2 / Table 2

Análisis de ocupación y desequilibrio de carga en equipos de proceso / Occupancy and load imbalance analysis in process equipment

Equipo (Unidades)	Proceso	Línea de producto	Uptime %*	Diagnóstico Operativo
SR-101 (6 Unidades)	Descascarillado	Lúcuma	170,43	Cuello de botella físico (sobrecargado)
TDR-102 (1 Unidad)	Secado	Uva	100	Cuello de botella de tiempo
WSH-101 (1 Unidad)	Limpieza	Lúcuma	25,7	Activo estratégico
SR-102 (1 Unidad)	Rebanado	Lúcuma	26,1	Activo estratégico
SMSX-101 (1 Unidad)	Extracción FSC	Lúcuma	52,1	Activo estratégico
TDR-103 (1 Unidad)	Secado	Uva	47,2	Activo estratégico
SMSX-102 (1 Unidad)	Extracción FSC	Uva	26,9	Activo estratégico

* Nota: El Uptime es el porcentaje de tiempo que un equipo está en uso en relación al tiempo de ciclo de la planta (3,83 h). Los valores para SR-101 y TDR-102 provienen del reporte de Throughput Analysis. Los valores para los demás se calcularon usando las duraciones de la tabla de tareas. Dato interesante: TDR-102 está casi al 100% (98,8%), confirmando su rol como cuello de botella de tiempo, mientras que SR-101 sigue siendo el cuello de botella físico con 170,43%.

El contraste entre las eficiencias de extracción observadas en lúcuma (97%) y uva (10,5%) evidencia diferencias significativas en la transferencia de masa y la accesibilidad de los compuestos lipídicos. En el caso de la uva, la elevada merma puede atribuirse a la resistencia estructural del pericarpo y al alto contenido fenólico que limita la solubilización del aceite. No obstante, este desbalance no representa una pérdida neta del proceso, sino una oportunidad para valorizar los residuos como coproductos funcionales, por ejemplo, harinas ricas en fibra o extractos antioxidantes (Chauca-Cerrutti et al., 2024; Laqui-Estaña et al., 2024). En la lúcuma, la cercanía entre el rendimiento teórico y real sugiere un proceso estable que podría optimizarse marginalmente mediante un control más preciso de presión y temperatura.

La raíz de este desbalance se esclarece al examinar el análisis de ocupación, detallado en la Tabla 2, que revela un doble cuello de botella jerárquico. El Diagrama de Gantt (Figura 2) temporaliza esta dinámica, mostrando cómo el tiempo de ciclo de la planta (3,83 h) se ve restringido por el secador TDR-102, con un uptime de 98,8%, actuando como el cuello de botella de tiempo que define el ritmo para la línea de uva. Sin embargo, la restricción física fundamental radica en la etapa de descascarillado (SR-101), con un uptime de 170,43% a pesar de sus 6 unidades, indicando una sobrecarga severa. Esta dualidad jerárquica sugiere que, mientras TDR-102 limita el flujo temporal, SR-101 amplifica la ineficiencia al procesar pepas de lúcuma de tamaño y dureza variables, un desafío agravado por la heterogeneidad del orujo de uva en su secado. Además de la línea principal, otras configuraciones de acondicionamiento de semillas, como las que emplean corte uniforme en rodajas, secado controlado a 60 °C y molienda homogénea mediante molinos de rotor, evidencian cómo la

naturaleza física de la semilla y los procesos previos de preparación pueden generar limitaciones de capacidad similares (Chauca-Cerrutti et al., 2024). Aunque optimizadas para asegurar homogeneidad en tamaño de partícula y humedad, estas operaciones evidencian que la dureza y variabilidad de las semillas son cuellos de botella potenciales en cualquier línea de extracción, incluso supercrítica, destacando que el acondicionamiento previo es clave para la eficiencia global (Lavenburg et al., 2021). lo que explica parcialmente la merma masiva de 219878 kg/año en la línea de uva. Esta sobrecarga de SR-101 resulta en una subutilización de activos estratégicos (Tabla 2), donde WSH-101 (25,7%), SR-102 (26,1%), SMSX-101 (52,1%), TDR-103 (47,2%) y SMSX-102 (26,9%) operan por debajo de su capacidad óptima, con periodos de inactividad prolongados visibles en el Diagrama de Gantt (Figura 2). Como consecuencia, la planta opera a solo el 12,7% de su capacidad teórica, un hallazgo que subraya la necesidad de validar el modelo con datos dinámicos en condiciones reales, un desafío recurrente en simulaciones de procesos agroindustriales.

La simulación de eventos discretos (SED) permite identificar cuellos de botella, mejorar el uso de recursos y evaluar estrategias operativas, facilitando la toma de decisiones informadas para optimizar la eficiencia del sistema (Luo et al., 2024). La ineficiencia de SMSX-102, con un uptime de solo 26,9%, sugiere que la extracción supercrítica de la uva no se ajusta óptimamente a las condiciones experimentales (45 MPa, 333 K), contribuyendo al desbalance observado. Investigaciones han demostrado que la eficiencia de la extracción puede verse afectada negativamente si las condiciones operativas no se ajustan adecuadamente, lo que puede generar cuellos de botella en el proceso (Jokić et al., 2016).

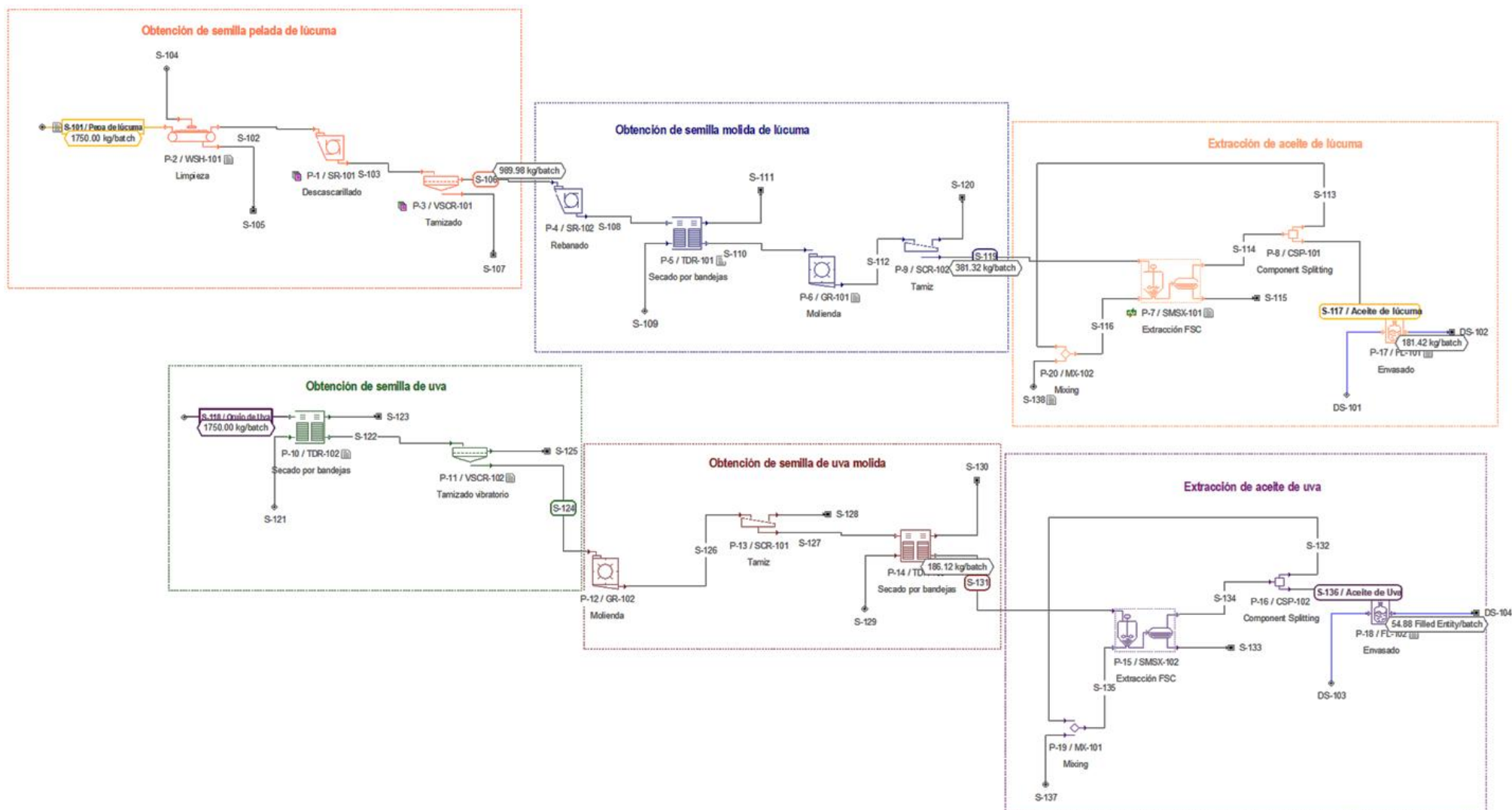


Figura 1. Diagrama de flujo de las líneas de procesamiento de semilla de uva y semillas de lúcuma hasta la obtención de aceite mediante extracción con fluidos supercríticos.

Figure 1. Flow diagram of the grape seed and lucuma seed processing lines up to the obtaining of oil by supercritical fluid extraction.

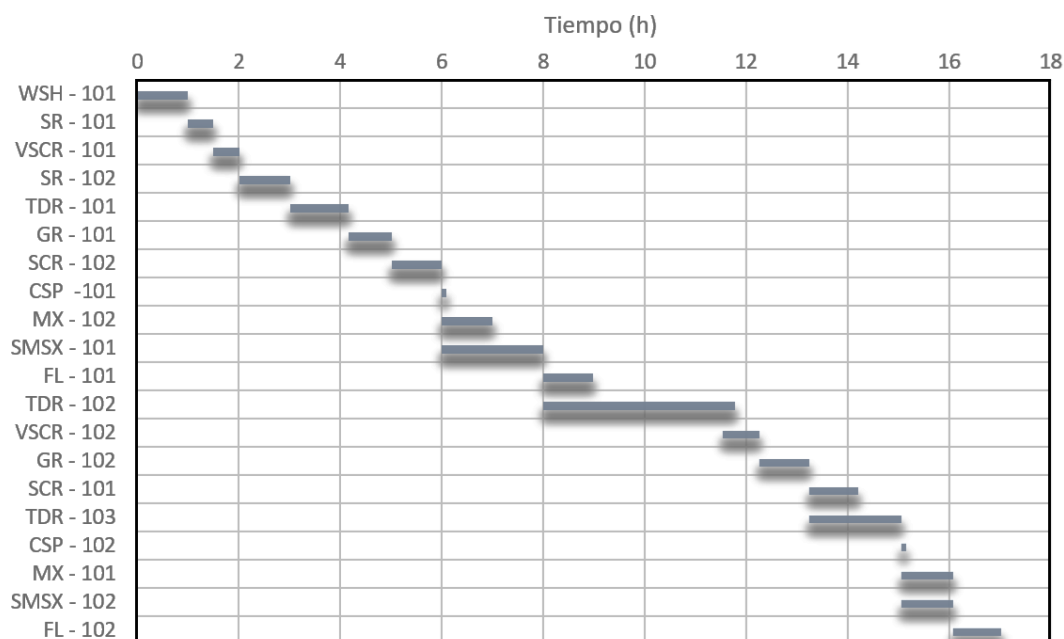


Figura 2. Ocupación y sincronización operativa de equipos en la biorrefinería de extracción supercrítica.

Figure 2. Occupancy and operational synchronization of equipment in the supercritical extraction biorefinery.

La optimización del throughput y la reducción del tiempo de ciclo son imperativos para maximizar la sostenibilidad del sistema. La sobrecarga de SR-101, con un uptime superior al 100%, podría mitigarse mediante la adición de unidades o la estandarización de la materia prima en WSH-101, reduciendo la acumulación de pepas y mejorando el flujo hacia TDR-102. Para este último, cuya operación al límite de 98,8% restringe la línea de uva, la integración de controles dinámicos, como ajustes en temperatura y flujo asistidos por inteligencia artificial, podría alinear su uptime con las demandas del proceso, disminuyendo la merma de 219878 kg/año a un rango más manejable (Duba & Fiori, 2019).

En plantas piloto de extracción con CO₂ supercrítico, la incorporación de sensores en tiempo real ha demostrado reducir ineficiencias, optimizando la recuperación de compuestos de alto valor (Zhang et al., 2023). Este rediseño no solo aborda el desbalance operativo, sino que también prepara el terreno para la evaluación ambiental, donde la huella hídrica de WSH-101 y los efluentes asociados serán críticos para completar un análisis integral (Gaalich et al., 2026). La revalorización de los coproductos es igualmente estratégica. Estudios recientes destacan que las tortas residuales de extracción supercrítica pueden ser fuentes ricas en compuestos bioactivos, proteínas o precursores para biogás y biofertilizantes, dependiendo de su tratamiento posterior (Chojnacka, 2023). Para la uva, los 219878 kg/año de merma potencial podrían

transformarse en harinas funcionales o extractos fenólicos, mientras que los 3044,6 kg/año de lúcumas representan un ajuste menor que podría optimizarse con estandarización.

Este enfoque de multivalORIZACIÓN, propuesto en revisiones de biorrefinerías agroindustriales (Prado-Acebo et al., 2024) exige integrar rutas de aprovechamiento donde los residuos de una etapa se conviertan en insumos de otra, elevando la eficiencia global del 1,73% a un modelo de sostenibilidad económica y ambiental. El flujograma (Figura 1) define la estructura del proceso, la Tabla 1 cuantifica las corrientes de masa, la Tabla 2 diagnostica los cuellos de botella, y el Diagrama de Gantt (Figura 2) temporaliza las interacciones, formando una secuencia lógica que guía hacia esta optimización integral. Para consolidar el desempeño operativo y ambiental de la biorrefinería, se calculan indicadores clave de desempeño (KPIs) que reflejan la eficiencia productiva, la sostenibilidad y el potencial de optimización. La Tabla 3 presenta los valores críticos que permiten evaluar la utilización de la capacidad instalada, los desbalances temporales y los impactos ambientales asociados a la operación de la planta, sirviendo como guía para identificar oportunidades de mejora y priorizar estrategias de valorización de los coproductos.

El Análisis de Ciclo de Vida Integrado (LCI), desarrollado mediante simulaciones en SuperPro Designer con datos primarios, permitió elaborar un inventario detallado de los flujos de materia y energía en la biorrefinería.

Tabla 3 / Table 3

KPIs Críticos de Operación y Sostenibilidad / Critical Operational and Sustainability KPIs

Dimensión	Indicador Clave de Desempeño (KPI)	Valor	Unidad
Operativo	% de Capacidad Productiva Utilizada	12,7	%
	Potencial de Mejora (Factor)	7,9	Adimensional
	Desequilibrio de Tiempos (Ratio Batch/Cycle)	4,5	Adimensional
Ambiental	Huella Hídrica por Unidad de Producto*	103	kg agua/kg aceite
	Índice Residuos/Materia Prima**	0,03	kg residuo/kg MP
	Ratio COD/BOD ₅ del Efluente	1,6	Adimensional
	Origen del Efluente Acuoso	100%	% del total en limpieza

* Nota: Valor recalculado asumiendo unidad = kg de aceite (12879360 kg/año / 124913 kg/año), ajustado a mermas de aceite (223922,6 kg/año / 7224000 kg/año); efluentes en huella hídrica.

El flujograma conceptual (Figura 1) muestra el proceso completo desde la etapa de limpieza (WSH-101) hasta la extracción supercrítica (SMSX-101 y SMSX-102), evidenciando el procesamiento paralelo de pepas de lúcuma y orujo de uva. Los resultados del inventario (Tabla 1) indican el procesamiento anual de 7224000 kg de materia prima con una producción de 124913 kg de aceite, lo que refleja una eficiencia global del 1,73%. Asimismo, la Tabla 3 (Tablero de Diagnóstico: KPIs Críticos de Operación y Sostenibilidad) reporta 12879360 kg/año de efluentes acuosos, equivalentes a 1,783 kg de agua por kg de materia prima, con una huella hídrica de 103 kg de agua por kg de aceite producido. Se registró también un índice de residuos de 0,03 kg residuo/kg MP, derivado principalmente de mermas de aceite (223922,6 kg/año). Este desbalance se traduce en 219878 kg/año de merma para la uva y 3044,6 kg/año para la lúcuma, se asocia directamente con los cuellos de botella identificados en la Tabla 2. En particular, los equipos SR-101 (170,43% de uptime) y TDR-102 (98,8%) presentan las principales limitaciones de capacidad, afectando el flujo continuo de operación según el Diagrama de Gantt (Figura 2). Este comportamiento refleja la presencia de cuellos de botella de rendimiento (throughput bottlenecks), cuya identificación y eliminación constituyen estrategias clave para incrementar la productividad global en sistemas de procesamiento continuo (Subramaniyan et al., 2021). En la presente simulación, dichos equipos representan las operaciones de acondicionamiento y pretratamiento del orujo de uva, etapas críticas para obtener subproductos estables y valorizables. Estudios recientes señalan que la combinación de separadores de tambor con rotor interno y secadores rotatorios son las tecnologías más adecuadas para el pretratamiento sostenible de orujos húmedos, debido a su eficiencia, capacidad de deshidratación y compatibilidad con esquemas de economía circular (Akterian et al., 2025). En consecuencia, queda claro que

optimizar la capacidad de los equipos SR-101 y TDR-102 es un paso indispensable para mejorar tanto el rendimiento como la sostenibilidad de la biorrefinería. A pesar de estos retos operativos, el inventario también revela oportunidades claras de valorización. Por ejemplo, la integración de coproductos sólidos, como las tortas residuales que tienen potencial nutracéutico, fortalece un enfoque de biorrefinería en cascada. Esta estrategia se alinea perfectamente con los modelos de economía circular (Chojnacka, 2023; Prado-Acebo et al., 2024) y es clave para incrementar la eficiencia global del proceso. Basados en el inventario de ciclo de vida (LCI) que obtuvimos, planteamos intervenciones concretas para mejorar el sistema. La primera y más urgente es ampliar la línea de descascarillado (SR-101). Proponemos incorporar al menos dos unidades adicionales. Con esto, lograríamos que su tiempo de ocupación (uptime) baje del 100%, lo que a su vez reduciría las pérdidas de materia prima y haría más eficiente todo el pretratamiento. Esta intervención es coherente con los principios de diseño de estos equipos. La capacidad efectiva de un descascarillador depende directamente de su tiempo de ciclo, la tasa de alimentación y la humedad del material. Son estos factores los que determinan la eficiencia global y los que, como vimos en nuestro estudio, generan cuellos de botella cuando la carga excede la capacidad nominal (Gojiya & Gohil, 2022).

En segundo lugar, proponemos ir más allá del diagnóstico estático y crear un "gemelo digital" de la biorrefinería. La idea es conectar el modelo que ya construimos en SuperPro Designer con datos de la planta en tiempo real, usando sensores y controladores inteligentes. Este sistema nos permitiría implementar un control predictivo asistido por inteligencia artificial (IA). La IA podría entonces ajustar de forma autónoma variables críticas —como la temperatura, el caudal o el tiempo de residencia— en unidades sensibles como el secador TDR-102. El resultado sería una mejora simultánea del rendimiento (throughput) y

una reducción de emisiones (Luo et al., 2024). Como medida complementaria, proponemos instalar instrumentación en línea en la etapa de lavado (WSH-101), específicamente sensores de caudal y turbidez. Esto permitiría un control del uso de agua basado en retroalimentación, reduciendo la huella hídrica y los efluentes. Esta no es solo una idea teórica; ya existen sistemas industriales que usan sensores de turbidez conectados a plataformas IoT para accionar automáticamente los sistemas de filtrado o recambio de agua cuando se supera un umbral (Ibrahim et al., 2018).

4. Conclusiones

Este trabajo ofrece un diagnóstico detallado de una biorrefinería industrial diseñada para la extracción de aceites de uva y lúcuma con CO₂ supercrítico (CO₂ FSC) basándonos en un modelo de simulación en SuperPro Designer para evaluar el sistema propuesto. Se denota una eficiencia global de proceso alarmantemente baja, de apenas 1,73%. Asimismo, se identificó claramente que los principales responsables de esta limitación son cuellos de botella específicos en el secado (TDR-102) y el descascarillado (SR-101) que, en conjunto, restringen la capacidad productiva a solo un 12,7% de su verdadero potencial. En cuanto a la sostenibilidad, los datos son contundentes: una huella hídrica de 103 kg H₂O /kg de aceite y un índice de residuos de 0,03 kg/kg de materia prima, lo que subraya la urgencia de mejorar la gestión de los recursos. No obstante, el modelo no solo diagnosticó problemas, también resultó ser invaluable para delinear estrategias de optimización concretas. Estas incluyen la intensificación de procesos, una estandarización más rigurosa de la materia prima y la implementación de un control dinámico potenciado por inteligencia artificial.

Referencias bibliográficas

Aizpurua-Olaizola, O., Ormazabal, M., Vallejo, A., Olivares, M., Navarro, P., Etxebarria, N., & Usobiaga, A. (2015). Optimization of Supercritical Fluid Consecutive Extractions of Fatty Acids and Polyphenols from *Vitis Vinifera* Grape Wastes. *Journal of Food Science*, 80(1). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12715>

Akterian, S., Fikiin, K., Georgiev, G., & Terziev, A. (2025). Pre-Treatment Equipment for Processing Grape Marc into Valorised By-Products: A Review. *Sustainability*, 17(13), 6188. <https://doi.org/10.3390/su17136188>

Aranda-Barradas, J. S., Guerrero-Barajas, C., & Ordaz, A. (2025). Addressing Challenges in Large-Scale Bioprocess Simulations: A Circular Economy Approach Using SuperPro Designer. *Processes*, 13(7), 2259. <https://doi.org/10.3390/pr13072259>

Brunner, G. (2005). Supercritical fluids: Technology and application to food processing. *Journal of Food Engineering*, 67(1), 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.060>

Cari, M. (2018). Extracción y caracterización de almidón de las semillas de lúcuma (*Pouteria lúcuma*). Tesis de Licenciatura. Universidad Peruana Unión.

Chauca-Cerrutti, A., Inga, M., Pasquel-Reátegui, J. L., Betalalleluz-Pallardel, I., & Puma-Isoiza, G. (2024). 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. *Frontiers in Chemistry*, 12, 1491479. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1491479>

Chemat, F., Abert Vian, M., Fabiano-Tixier, A.-S., Nutrizio, M., Režek Jambak, A., Muneke, P. E. S., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., Binello, A., & Cravotto, G. (2020). A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products. *Green Chemistry*, 22(8), 2325-2353. <https://doi.org/10.1039/C9GC03878G>

Chojnacka, K. (2023). Valorization of biorefinery residues for sustainable fertilizer production: A comprehensive review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(16), 14359-14388. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04639-2>

Duba, K., & Fiori, L. (2019). Supercritical CO₂ extraction of grape seeds oil: Scale-up and economic analysis. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 1306-1312. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14104>

FAO. (2023). The State of Food and Agriculture 2023. FAO; <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc7724en>

Gaalich, I., Lee, D., Aymonier, C., Sonnemann, G., Olchowka, J., Philippot, G., & Loubet, P. (2026). Environmental impacts of supercritical fluids processes: A critical review of life cycle assessment studies. *Environmental Impact Assessment Review*, 116, 108106. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108106>

Gojiya, D., & Gohil, V. (2022). Design and development of low cost sesame dehuller and its process standardization. *Journal of Food Science and Technology*, 59(11), 4446-4456. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05524-y>

Gombau, J., Pons-Mercadé, P., Conde, M., Asbiro, L., Pascual, O., Gómez-Alonso, S., García-Romero, E., Miquel Canals, J., Hermosín-Gutiérrez, I., & Zamora, F. (2020). Influence of grape seeds on wine composition and astringency of Tempranillo, Garnacha, Merlot and Cabernet Sauvignon wines. *Food Science & Nutrition*, 8(7), 3442-3455. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1627>

Guerrero-Castillo, P., Reyes, S., Robles, J., Simirgiotis, M. J., Sepulveda, B., Fernandez-Burgos, R., & Areche, C. (2019). Biological activity and chemical characterization of *Pouteria lucuma* seeds: A possible use of an agricultural waste. *Waste Management*, 88, 319-327. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.055>

Häussling Löwgrén, B., Hoffmann, C., Vijver, M. G., Steubing, B., & Cardellini, G. (2025). Towards sustainable chemical process design: Revisiting the integration of life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 491, 144831. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144831>

Ibrahim, S. N., Asnawi, A. L., Malik, N. A., Mohd Azmin, N. F., Jusoh, A. Z., & Mohd Isa, F. N. (2018). Web based Water Turbidity Monitoring and Automated Filtration System: IoT Application in Water Management. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(4), 2503. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i4.pp2503-2511>

Jokić, S., Bijuk, M., Aladić, K., Bilić, M., & Molnar, M. (2016). Optimisation of supercritical CO₂ extraction of grape seed oil using response surface methodology. *International Journal of Food Science & Technology*, 51(2), 403-410. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12986>

Laqui-Estafía, J., Obrique-Slier, E., García-Nauto, N., & Saldaña, E. (2024). Advances in Grape Seed Oil Extraction Techniques and Their Applications in Food Products: A Comprehensive Review and Bibliometric Analysis. *Foods*, 13(22), 3561. <https://doi.org/10.3390/foods13223561>

Lavenburg, V. M., Rosentrater, K. A., & Jung, S. (2021). Extraction Methods of Oils and Phytochemicals from Seeds and Their

- Environmental and Economic Impacts. *Processes*, 9(10), 1839. <https://doi.org/10.3390/pr9101839>
- Luo, Q., Huang, X., Wu, J., Mou, X., Xu, Y., Li, S., Ma, G., Wan, F., & Peng, L. (2024). Simulation analysis and parameter optimization of seed–flesh separation process of seed melon crushing and seed extraction separator based on DEM. *Agriculture*, 14(7), 1008. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071008>
- MIDAGRI. (2024). Perfil Productivo Regional [Visualización interactiva]. SIEA - Sistema Integrado de Estadística Agraria.
- Ng, H. S., Kee, P. E., Yim, H. S., Chen, P.-T., Wei, Y.-H., & Chi-Wei Lan, J. (2020). Recent advances on the sustainable approaches for conversion and reutilization of food wastes to valuable bioproducts. *Bioresource Technology*, 302, 122889. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122889>
- Petrides, D., Sapidou, E., & Calandranis, J. (1995). Computer-aided process analysis and economic evaluation for biosynthetic human insulin production—A case study. *Biotechnology and Bioengineering*, 48(5), 529-541. <https://doi.org/10.1002/bit.260480516>
- Prado-Acebo, I., Cubero-Cardoso, J., Lu-Chau, T. A., & Eibes, G. (2024). Integral multi-valorization of agro-industrial wastes: A review. *Waste Management*, 183, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.05.001>
- Sheldon, R. A. (2007). The E Factor: Fifteen years on. *Green Chemistry*, 9(12), 1273-1283. <https://doi.org/10.1039/B713736M>
- Subramaniyan, M., Skoogh, A., Bokrantz, J., Sheikh, M. A., Thüerer, M., & Chang, Q. (2021). Artificial intelligence for throughput bottleneck analysis – State-of-the-art and future directions. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 734-751. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.021>
- Trost, B. M. (1995). Atom Economy—A Challenge for Organic Synthesis: Homogeneous Catalysis Leads the Way. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 34(3), 259-281. <https://doi.org/10.1002/anie.199502591>
- Vignesh., K., R., A., Rao G., P. K., Balan, S., B.M., J. A., Sales, E. A., R., A. P., & Aranda, D. A. G. (2023). A cascaded biorefinery for the sustainable valorization of *Arthrospira maxima* biomass: A circular bioeconomy approach. *Bioresource Technology Reports*, 23, 101510. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101510>
- Yıldırım, M., Erşatır, M., Poyraz, S., Amangeldinova, M., Kudrina, N. O., & Terletskaia, N. V. (2024). Green Extraction of Plant Materials Using Supercritical CO₂: Insights into Methods, Analysis, and Bioactivity. *Plants*, 13(16), 2295. <https://doi.org/10.3390/plants13162295>
- Zhang, L., Zhang, A., Zhou, S., Wang, Q., Wang, W., Ma, H., & Zhou, C. (2023). Real-time online monitoring technology for sweeping frequency ultrasound (SFU) assisted extraction of amur grape (*Vitis amurensis*) seed oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 100, 106621. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106621>

