

Diseño de un proceso circular para la extracción y secado de polifenoles en polvo a partir de cascarilla de cacao para uso en la industria cosmética

Samantha Isabel Valladares Ladino¹, Germán Layedra¹, Mateo Valencia¹, Micaela Jaramillo¹, Vicente Obando¹, José Álvarez-Barreto^{1*}

¹ Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador.

* Autor de correspondencia/Corresponding Author e-mail: jalvarezb@usfq.edu.ec

Design of a circular and sustainable process for the extraction and drying of powdered polyphenols from cocoa bean husks for use in the cosmetics industry

Resumen

La cascarilla de los granos de cacao es un residuo agroindustrial abundante que suele descartarse a pesar de su contenido valioso de compuestos bioactivos. El objetivo de este estudio fue diseñar y evaluar, a nivel conceptual, un proceso para la obtención de polifenoles en polvo a partir de cascarilla de cacao, orientado a su aplicación en la industria cosmética. Este trabajo se desarrolló bajo un enfoque ingenieril, basado en información bibliográfica, para la obtención de polifenoles mediante extracción y secado. El estudio contempló el diseño integrado de las etapas de acondicionamiento de la biomasa, extracción sólido-líquido y secado, y se centró en identificar condiciones operativas a partir de datos reportados en la literatura que permitan la recuperación de los polifenoles. Los resultados corresponden a la evaluación conceptual del proceso propuesto, los cuales indican que el esquema diseñado permitiría obtener un polvo rico en compuestos polifenólicos, con propiedades funcionales adecuadas para su integración en productos cosméticos. A través de este estudio, se demostró la factibilidad técnica del proceso, y que este es potencialmente viable económicamente. La propuesta demuestra, desde una perspectiva de diseño de procesos con un enfoque circular, que es posible transformar un residuo agroindustrial de relevancia en Ecuador en un ingrediente de alto valor agregado, alineado con las necesidades de la industria cosmética.

Palabras clave: compuestos polifenólicos, cascarilla de cacao, diseño de procesos, industria cosmética, extracción, residuo agroindustrial.

Abstract

Cocoa bean husks are an abundant agro-industrial waste product that is often discarded, despite their valuable content of bioactive compounds. The objective of this study was to design and conceptually evaluate a process for obtaining polyphenol powder from cocoa husks, geared towards its application in the cosmetics industry. This work was developed using an engineering approach, based on bibliographic information, for obtaining polyphenols through extraction and drying. The study considered the integrated design of the biomass conditioning, solid-liquid extraction, and drying stages, focusing on identifying operating conditions based on data reported in the literature that would allow



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastian Ponce

Recibido /
Received:
04/01/2026

Aceptado /
Accepted:
24/2/2026

Publicado en línea /
Published online:
22/05/2026



for the recovery of polyphenols. The results correspond to the conceptual evaluation of the proposed process, which indicate that the designed scheme would yield a powder rich in polyphenolic compounds, with functional properties suitable for integration into cosmetic products. This study demonstrated the technical feasibility of the process and its potential economic viability. This proposal demonstrates, from a circular process design perspective, that it is possible to transform a significant agro-industrial waste product in Ecuador into a high-value-added ingredient, aligned with the needs of the cosmetics industry.

Keywords: agro-industrial waste, cocoa husk, cosmetics industry, extraction, polyphenolic compounds, process design

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el aprovechamiento integral de los subproductos agrícolas ha cobrado una importancia estratégica para avanzar hacia modelos de producción más sostenibles [1]. Dentro de este enfoque, la cadena del cacao (*Theobroma cacao* L.) se ha convertido en un campo especialmente relevante debido al volumen significativo de residuos que genera y al valor químico y funcional de muchos de sus componentes [1]. Tradicionalmente, materiales como la cáscara, la mazorca y la pulpa fueron considerados desechos sin mayor utilidad. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que estos subproductos pueden transformarse en fuentes valiosas de compuestos bioactivos, ingredientes funcionales y materias primas para diversas industrias [2]. En países productores como Ecuador, esta visión ha empezado a integrarse en iniciativas industriales y académicas que buscan diversificar la oferta de productos derivados del cacao y fortalecer la sostenibilidad de la cadena productiva [1].

Entre estos subproductos, la cascarilla de los granos de cacao ha llamado la atención por su alto contenido de polifenoles, flavonoides y metilxantinas, sustancias reconocidas por su capacidad antioxidante y por sus aplicaciones en sectores como el alimentario, farmacéutico y cosmético [2]. No obstante, pese a su potencial químico, la realidad ecuatoriana revela una brecha significativa entre el conocimiento disponible y su aprovechamiento real [1]. La cascarilla representa entre el 12 % y el 20 % del peso del grano seco, pero la mayor parte se desecha sin un proceso de revalorización debido a la falta de infraestructura tecnológica, modelos de negocio y articulación entre productores e industria final [2].

Desde una perspectiva ambiental, el manejo inadecuado de la cascarilla genera impactos ambientales que suelen pasar desapercibidos [3]. La acumulación de residuos orgánicos a cielo abierto produce emisiones asociadas a su descomposición, contribuye al deterioro de la calidad del suelo y afecta ecosistemas sensibles donde se desarrollan actividades cacaoteras [3]. Desde el punto de vista fitosanitario, estos residuos pueden actuar como reservorios de hongos y vectores que incrementan la vulnerabilidad de las plantaciones [2].

A su vez, la industria cosmética ecuatoriana mantiene una fuerte dependencia de la importación de antioxidantes, extractos vegetales y principios activos especializados [4]. Sin embargo, estudios locales han demostrado que la cascarilla del cacao ecuatoriano



incluyendo variedades como CCN-51 y Nacional podrían emplearse como antioxidantes naturales en formulaciones cosméticas, reduciendo costos, acortando cadenas logísticas y fortaleciendo la autonomía tecnológica del país [4].

La literatura científica internacional respalda el uso de la cascarilla de cacao como fuente de compuestos fenólicos con aplicaciones cosméticas. Investigaciones desarrolladas en los últimos años confirman que la cascarilla posee concentraciones apreciables de flavan-3-oles y procianidinas, moléculas con alta capacidad antioxidante, comparables incluso a las presentes en otras fuentes vegetales ya utilizadas por la industria [5]. Asimismo, la extracción hidroalcohólica se ha consolidado como un método eficiente y seguro para recuperar compuestos fenólicos debido a su adecuada polaridad, accesibilidad industrial y compatibilidad con aplicaciones cosméticas y farmacéuticas [5]. Posteriormente, técnicas como la encapsulación con maltodextrina y el secado por liofilización permiten preservar la bioactividad de los polifenoles, aumentar su estabilidad frente a la luz, el oxígeno y la temperatura, y obtener un ingrediente en polvo de fácil incorporación en formulaciones comerciales [6, 7].

En este contexto, el presente proyecto se orienta al diseño de un proceso que permita obtener un extracto antioxidante en polvo a partir de la cascarilla de cacao, con características fisicoquímicas adecuadas para su uso en la industria cosmética nacional [8]. Este propósito responde simultáneamente a una necesidad ambiental, económica y tecnológica. Por un lado, contribuye a reducir la acumulación de residuos y a integrar prácticas de economía circular, manteniendo el valor de los materiales en uso por más tiempo y permitiendo que la fracción fibrosa agotada sea reincorporada al suelo como enmienda orgánica [8, 9].

A pesar de la amplia literatura disponible sobre la extracción de compuestos fenólicos a partir de subproductos del cacao, la mayoría de los estudios se centran en la optimización a escala de laboratorio o en aplicaciones alimentarias, con menor atención al diseño integrado de procesos orientados a ingredientes cosméticos y a criterios explícitos de circularidad. En este contexto, el presente trabajo no busca introducir una técnica de extracción novedosa, sino aportar un enfoque de ingeniería de procesos que integra decisiones operativas, tecnológicas y económicas en un esquema coherente y escalable, adaptado al contexto productivo ecuatoriano.

La principal contribución de este estudio radica en el diseño conceptual de un proceso integrado para la obtención de polifenoles en polvo a partir de cascarilla de cacao, que combina extracción hidroalcohólica, clarificación por filtración y microfiltración, concentración a baja temperatura y estabilización mediante encapsulación y liofilización. A diferencia de trabajos previos que evalúan estas operaciones de manera aislada, este diseño analiza su interacción como sistema, considerando la sensibilidad térmica de los compuestos fenólicos y los riesgos operativos asociados a ensuciamiento de membranas [10].

El estudio incorpora criterios de ingeniería circular traducidos en decisiones de diseño, tales como la valorización de la biomasa residual y la selección de materiales encapsulantes biodegradables compatibles con aplicaciones cosméticas. Este enfoque permite vincular principios de economía circular con parámetros operativos concretos, superando un tratamiento únicamente conceptual de la sostenibilidad [9, 10].



El objetivo general del presente trabajo fue diseñar un proceso escalable para la obtención de un extracto antioxidante en polvo a partir de la cascarilla de cacao, considerando su prefactibilidad técnica y económica, con un enfoque de ingeniería circular. El diseño contempla la caracterización de la biomasa, la definición de parámetros de extracción, el desarrollo de formulaciones encapsuladas estables, la aplicación del secado por liofilización y el establecimiento de lineamientos para el aprovechamiento del material residual. A continuación, se presenta el detalle del contexto de diseño que sirvió como base para el estudio.

CONTEXTO DE DISEÑO

Materia prima: cascarilla de los granos de cacao

La cascarilla de cacao, también conocida como cáscara del grano o cocoa bean shell en inglés, constituye el principal subproducto sólido generado durante el tostado y descascarillado de los granos de *Theobroma cacao* L. Representa entre el 10 % y el 17 % del peso del grano seco, lo que la convierte en un residuo abundante dentro de la industria cacaotera, especialmente en países altamente productores como Ecuador [5].

La cascarilla presenta un conjunto de propiedades fisicoquímicas que explican tanto su comportamiento en procesos industriales como su potencial de aprovechamiento como materia prima para la obtención de extractos fenólicos. Diversos estudios reportan que la cascarilla contiene porcentajes importantes de polisacáridos estructurales (celulosa, hemicelulosa y lignina), junto con minerales como potasio, calcio, magnesio y fósforo, lo que le confiere una alta fracción de materia orgánica estructural [5].

Desde el punto de vista físico, la cascarilla de cacao es un material de baja densidad aparente, con estructura laminar y porosa, que se presenta en forma de fragmentos delgados después del proceso de tostado. La cascarilla presenta además una marcada higroscopicidad, lo que puede conducir a riesgo de crecimiento microbiano si no se almacenan en condiciones adecuadas de temperatura y humedad relativa [11].

En cuanto a sus propiedades químicas específicas, la cascarilla de cacao concentra una fracción significativa de compuestos fenólicos, entre los que se incluyen flavan-3-oles como catequina y epicatequina, así como oligómeros de procianidinas, que contribuyen a su alta capacidad antioxidante [5].

Cantidad estimada de cascarilla generada por la industria nacional

El fruto del cacao mazorca pesa alrededor de 400 gramos en promedio. De este peso total, la cáscara o residuo que se descarta al abrirlo representa la mayor parte, aproximadamente entre el 65 % del peso total. Esto significa que, alrededor de 260 gramos corresponden a la cáscara de cacao, mientras que el interior mucilaginoso y las semillas constituyen el resto de la masa. Conociendo esto, se puede calcular que la cascarilla generada por la industria es aproximadamente de 239 200 toneladas [1].



Nivel de industrialización y potencial de generación de residuos

Ecuador, siendo el tercer productor mundial y líder en cacao fino, presenta un nivel de industrialización medio-bajo y heterogéneo. Aproximadamente entre el 85 % y 90 % de su producción se exporta como materia prima o semielaborados (grano seco, licor, pasta o manteca), mientras que solo un 10 % a 15 % se transforma localmente en productos de alto valor agregado como chocolate en tableta. Esta actividad industrial se concentra regionalmente; las provincias costeras como Guayas y Los Ríos, que aglutinan más del 80 % de la producción nacional, albergan la mayor capacidad de procesamiento primario y semindustrial. En contraste, regiones como la Amazonía (Napo, Sucumbíos), productoras de cacao fino y orgánico, mantienen una industrialización baja, centrada en la exportación de grano seco premium [1].

MATERIALES Y MÉTODOS

Base de diseño y alcance

El proceso se desarrolla a nivel de diseño conceptual con proyección a escala piloto-industrial (100 kg/h). El sistema se delimita desde la molienda de la cascarilla hasta el almacenamiento del polvo encapsulado, excluyendo etapas agrícolas y formulación cosmética. Los supuestos adoptados se basan en valores promedio reportados en la literatura como en el trabajo de Azmir et al. [12] para matrices lignocelulósicas similares *Theobroma cacao* y procesos hidroalcohólicos comparables.

Supuestos de diseño

Los parámetros del diseño conceptual del proceso fueron establecidos a partir de supuestos técnicos y operativos definidos con base en valores reportados en la literatura científica para la extracción hidroalcohólica de compuestos fenólicos a partir de matrices lignocelulósicas similares. La selección de estos valores se realizó priorizando condiciones reproducibles. Se adoptaron rangos medios dentro de los intervalos reportados, con el fin de evitar sobreestimaciones y garantizar una base cuantitativa para la evaluación técnica, económica y de circularidad del proceso. El detalle de los parámetros considerados se presenta en la Tabla 1, incluyendo las fuentes de los datos utilizados.

TABLA 1. Supuestos de diseño y parámetros operativos del proceso.

Categoría	Parámetro	Valor asumido	Justificación
Materia prima	Capacidad de procesamiento	100 kg/h de cascarilla seca	Escala piloto–industrial típica para subproductos agroindustriales [6].
	Humedad inicial de la cascarilla	8 % p/p	Cascarilla seca almacenada en condiciones controladas [11].
Operación de planta	Días de operación	300 días/año	Valor conservador para plantas continuas con mantenimiento programado [6].
	Horas de operación	16 h/día (4800 h/año)	Diseño industrial moderado para biomasa [6].
Extracción sólido–líquido	Relación sólido–líquido	1:15 (g/mL)	Rango óptimo entre eficiencia y volumen de solvente [12, 6].
	Solvente de extracción	Etanol–agua 70 % v/v	Alta afinidad por polifenoles y compatibilidad cosmética [5].
	Temperatura de extracción	40 °C	Maximiza la recuperación sin degradación térmica [12].
	Tiempo de extracción	2 h	Tiempo típico para matrices lignocelulósicas [12].
	Rendimiento global de extracción	65 %	Valor representativo para cascarilla de cacao [5, 12]
	Concentración de polifenoles en extracto	2,0–3,5 g GAE/L	Rangos reportados para extractos hidroalcohólicos de cascarilla medidos en equivalentes de ácido gálico (GAE) [4, 5]
Filtración	Remoción de sólidos suspendidos	90 %	Protección de membranas posteriores [13].
Microfiltración	Tamaño de poro	0,2 µm	Clarificación de extractos vegetales [13, 14].
	Presión transmembrana	1,0 bar	Condición estándar en MF de extractos [13].
	Temperatura	25 °C	Minimiza la degradación de compuestos fenólicos [14].
	Pérdida de polifenoles	< 5 %	Paso preferencial de solutos de bajo PM [13].
Evaporación	Etanol residual en concentrado	< 5 % v/v	Requisito previo a liofilización [15].
	Recuperación de etanol	85 %	Evaporador al vacío de un efecto [15].
Encapsulación	Material encapsulante	Maltodextrina	Alta compatibilidad y biodegradabilidad [16].
Liofilización	Temperatura de congelación	–35 °C	Formación adecuada de estructura porosa [17].
	Presión secado primario	100 Pa	Condición estándar en <i>freeze-drying</i> [17].
	Temperatura secado secundario	30 °C	Eliminación de agua ligada sin degradación [17].
	Humedad final del polvo	≤ 4% p/p	Estabilidad química y microbiológica [18].

SELECCIÓN DE EQUIPOS

La selección y el dimensionamiento de los equipos se realizaron considerando los requerimientos operativos de cada etapa del proceso descritos en la Tabla 1, así como la preservación de compuestos fenólicos. Los volúmenes de extracción y evaporación se calcularon a partir de la relación sólido-líquido adoptada (1:15 g/mL), incorporando el rendimiento global de extracción y pérdidas estimadas en etapas de clarificación (<5 %). La selección de los equipos se efectuó con base en especificaciones técnicas disponibles en catálogos industriales en línea, priorizando compatibilidad química, control térmico, disponibilidad comercial para escalas piloto y potencial de escalamiento. Los equipos seleccionados permiten garantizar un control adecuado de variables críticas y facilitan la integración operativa del proceso. El detalle de los equipos y su función se presenta en la Tabla 2.

TABLA 2. Equipos seleccionados y función en el proceso.

Equipo	Etapa del proceso	Función principal
Molino de martillos 100 kg/h	Molienda	Reducción de tamaño de la cascarilla seca para aumentar el área de contacto en la extracción [19].
Tamiz vibratorio lineal	Tamizado	Clasificación granulométrica y obtención de una fracción homogénea de partículas [20].
Tanque de mezcla de acero inoxidable 500 L con calefacción	Extracción sólido-líquido	Contacto sólido-líquido bajo agitación y control térmico para la extracción de polifenoles [21].
Filtro prensa de placas y marcos	Filtración	Separación de sólidos agotados y obtención de un extracto clarificado [22].
Unidad de microfiltración MF/UF (acero inoxidable 304/316L)	Microfiltración	Eliminación de partículas finas y coloides para mejorar la estabilidad del extracto [23].
Evaporador al vacío de un solo efecto	Evaporación	Concentración del extracto y reducción del contenido de etanol [19, 20].
Tanque de mezcla de acero inoxidable 500 L	Mezclado	Incorporación homogénea de maltodextrina como agente encapsulante [22].
Liofilizador industrial de vacío	Liofilización	Eliminación de agua por sublimación para obtener polifenoles en polvo estables [21].
Máquina empacadora automática VFFS	Envasado	Dosificación y sellado hermético del producto final [22, 23].
Estanterías industriales y pallets plásticos HDPE	Almacenamiento	Conservación y manejo del producto terminado en condiciones controladas [19, 23].

Criterios de evaluación

Los criterios de evaluación incluyeron el rendimiento de extracción del 65 % y el contenido de humedad final del polvo de ≤ 4 % p/p como indicador de conservación, según la



Tabla 1. También, se incorporaron criterios de circularidad relacionados con la recuperación de etanol y valorización de residuos sólidos. El análisis económico se desarrolló bajo supuestos de operación en estado estático y costos de equipos obtenidos de catálogos industriales. Las fuentes empleadas corresponden a estudios comparables de extracción hidroalcohólica como el estudio de Xiaolin Tang y Michael J. Pikal [17].

RESULTADOS

Diagramación del proceso

La diagramación del proceso permite visualizar de manera integral la secuencia de operaciones unitarias involucradas en el diseño propuesto. Este esquema facilita la comprensión de los flujos de materia, las interconexiones entre etapas y los puntos críticos de operación, constituyendo una herramienta fundamental para el análisis técnico, el diseño preliminar y la evaluación de la viabilidad del proceso. En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo del proceso (PFD), que resume desde el acondicionamiento de la materia prima hasta las etapas finales de envasado y almacenamiento del producto.

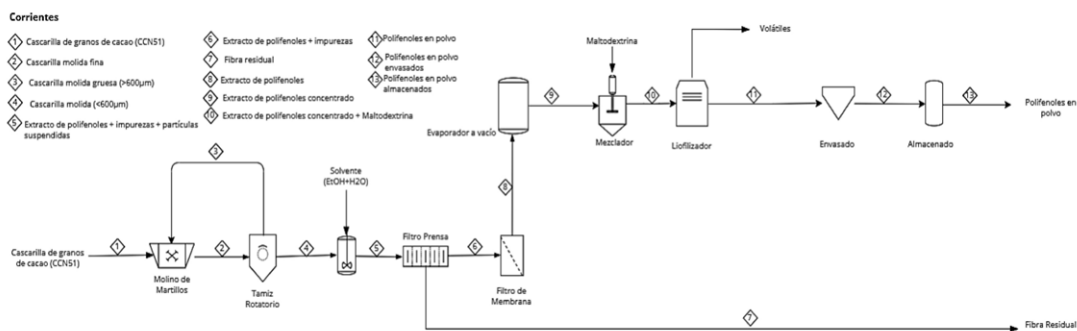


FIGURA 1. Diagrama de flujo del proceso (PFD).

Molienda

La cascarilla seca se somete a un proceso de molienda con el propósito de reducir su tamaño de partícula. En esta operación, el material de entrada corresponde a cascarilla entera o fragmentada, mientras que el producto final es un polvo fino. El objetivo fundamental es romper la estructura celular del material vegetal para liberar los compuestos fenólicos presentes en la matriz lignocelulósica [19].

La molienda se realiza en molinos de martillos operados a temperatura ambiente y presión atmosférica. Para evitar la degradación térmica de los compuestos fenólicos, se controla que el producto no supere los 40 °C, mitigando el calentamiento por fricción. El tamaño final de partícula se ajusta entre 0,25 y 1 mm [6].

Tamizado

El tamizado recibe como alimentación la harina obtenida en la molienda y la separa en fracciones clasificadas por tamaño. Mediante tamices rotativos, se obtiene una fracción fina adecuada para los procesos de extracción. Esta clasificación garantiza la uniformidad granulométrica [7].

El propósito del tamizado es asegurar homogeneidad en la muestra y evitar obstrucciones o sedimentaciones durante la extracción. Un tamaño de partícula demasiado grande disminuye la superficie de contacto, mientras que partículas excesivamente finas pueden generar pérdidas por arrastre. La operación se efectúa a temperatura ambiente y presión atmosférica, utilizando mallas entre 40 y 100 mesh (número de aberturas por pulgada lineal). En algunos casos, se emplean vibradores mecánicos para incrementar la eficiencia de separación [7].

Extracción sólido-líquido

En esta etapa ingresa la cascarilla molida y tamizada junto con el solvente hidroalcohólico (etanol-agua). El proceso genera un extracto líquido rico en polifenoles y un residuo sólido agotado. La extracción puede realizarse por maceración o mediante agitación continua, ajustando la relación sólido-líquido entre 1:10 y 1:20 (g/mL) [6].

El proceso usualmente opera entre 30 °C y 50 °C, manteniendo agitación constante para favorecer la difusión y evitar sedimentación. El tiempo de extracción oscila entre 1 y 3 horas. Se utiliza etanol al 60-70 %, buscando un balance entre polaridad, seguridad y eficiencia en la recuperación de compuestos fenólicos [6].

Filtración

La filtración separa las fases sólida y líquida para obtener un extracto claro y estable, libre de impurezas que puedan comprometer las etapas posteriores. Esta operación previene el colapso de membranas o el ensuciamiento de equipos de microfiltración y liofilización. Generalmente se aplica filtración al vacío mediante filtros prensa, empleando mallas de 10 a 25 μm . La operación se desarrolla a temperatura ambiente y a presión reducida. La velocidad de filtración está determinada principalmente por la viscosidad del extracto y su contenido de sólidos suspendidos. [13].

Microfiltración

A esta etapa ingresa el extracto hidroalcohólico filtrado, que aún contiene trazas de finos y coloides. Se utiliza un módulo de flujo cruzado con membrana polimérica, obteniendo un permeado transparente que conserva los compuestos fenólicos y un retentado con sólidos suspendidos [13].

El objetivo es reducir la turbidez y la carga coloidal, protegiendo las operaciones posteriores frente al ensuciamiento. Las membranas con poros alrededor de 0,2 μm retienen sólidos y microorganismos, mientras permiten el paso de solutos de bajo peso molecular [14]. La operación se realiza en flujo cruzado, con presiones transmembrana



entre 0,1 y 2 bar y temperaturas cercanas a 25 °C, dependiendo de la membrana y del extracto vegetal [13].

Evaporación

La evaporación al vacío se emplea para reducir el contenido de etanol del extracto hidroalcohólico hasta niveles compatibles con la liofilización, preservando la estabilidad de los compuestos fenólicos. En esta etapa ingresa únicamente el extracto hidroetanólico previamente filtrado y se obtiene como salida un concentrado con bajo contenido de etanol [15].

La operación se realiza en un evaporador al vacío con agitación y condensador para la recuperación del solvente, donde la presión reducida disminuye el punto de ebullición del etanol y permite su eliminación a temperaturas moderadas. Las condiciones de operación suelen incluir temperaturas entre 30 y 40 °C y presiones absolutas de 50 a 200 mbar, finalizando cuando el extracto alcanza un contenido residual de etanol inferior al 5 % v/v [15].

Mezclado

En un tanque agitado de acero inoxidable se mezcla el extracto clarificado con maltodextrina en polvo hasta obtener una solución homogénea empleada como alimentación para la liofilización. Esta práctica corresponde al método base de encapsulación previo al secado por congelación [7].

La operación se realiza a 20-30 °C, a presión atmosférica, utilizando agitadores de flujo axial o turbinas de palas inclinadas. La adición del polvo se hace de forma gradual para evitar la formación de grumos. Una vez alcanzada la concentración objetivo, se verifica la ausencia de aglomerados y la viscosidad requerida para las etapas de congelación y liofilización [19].

Liofilización

La premezcla de extracto y maltodextrina se congela en bandejas y, posteriormente, se somete a condiciones de alto vacío para promover la sublimación del hielo. El vapor generado es capturado en el condensador del equipo. El producto final es un polvo seco y poroso con los polifenoles encapsulados. Este método elimina el agua a baja temperatura, preservando compuestos sensibles al calor y reduciendo reacciones de oxidación u oscurecimiento. La matriz de maltodextrina contribuye a la estabilización del extracto [6]. El proceso comprende una etapa de congelación por debajo de -30 °C, seguida del secado primario bajo vacío y luego un secado secundario donde la temperatura del estante se eleva gradualmente entre 20 y 35 °C [17].

Envasado

El polvo seco encapsulado se dosifica por peso o volumen en frascos rígidos (HDPE/PET) sellados herméticamente para prevenir oxidación [24]. Esta etapa busca conservar la calidad y estabilidad del producto, evitando el deterioro asociado a humedad, luz o exposición al oxígeno [24]. El envasado se realiza en ambiente seco (humedad



relativa < 40 %) y a temperatura ambiente. Para productos de alto valor, las llenadoras gravimétricas ofrecen mayor precisión. Finalmente, se verifica el sellado, el peso neto y el rotulado antes de liberar el lote [13].

Almacenamiento

Los envases terminados se guardan en una bodega limpia, ventilada y protegida de la luz solar directa. El propósito del almacenamiento es preservar la estabilidad fisicoquímica del producto, evitando cambios en humedad, oxidación o degradación de los compuestos fenólicos. La maltodextrina contribuye como agente estabilizante [18]. El almacenamiento se realiza en un lugar fresco y oscuro, con temperatura controlada entre 20 y 25 °C y humedad relativa menor al 40 %, monitoreada mediante termohigrómetros. Los envases se colocan en estantes limpios, aislados del piso y lejos de fuentes de calor o humedad [18].

Principios de circularidad aplicados en el proceso

Valorización de biomasa residual como materia prima principal

El proceso se fundamenta en el uso de cascarilla de los granos de cacao como insumo abundante en la cadena agroindustrial. Esta materia prima, que convencionalmente se descarta o se emplea en aplicaciones de bajo valor, constituye una fuente rica en polifenoles. Su aprovechamiento reduce la carga ambiental asociada a la disposición de residuos orgánicos e incorpora el principio de mantener los materiales en los ciclos productivos durante más tiempo [9].

Incorporación de matrices encapsulantes biodegradables

La encapsulación con maltodextrina favorece la integración del producto final en ciclos biológicos. Estos materiales presentan alta biodegradabilidad, lo que evita introducir polímeros sintéticos persistentes en el proceso y contribuye a minimizar impactos ambientales posteriores al uso. Además, la elección de encapsulantes biodegradables contribuye a que los polifenoles obtenidos sean compatibles con aplicaciones en productos de cuidado personal [16].

Valorización de corrientes secundarias

El proceso genera corrientes sólidas que contienen fibra, compuestos aromáticos residuales y estructuras lignocelulósicas útiles para aplicaciones de bajo impacto ambiental. Dentro del modelo circular, estas fracciones pueden ser destinadas a compostaje, producción de biochar o materiales adsorbentes para tratamiento de aguas. Esta valorización evita que los residuos sólidos se acumulen y permite que el proceso contribuya a cadenas de producción secundaria [16].

Minimización de sustancias persistentes y peligrosas

El proceso evita el uso de solventes tóxicos y elimina sustancias persistentes como los PFAS. Al priorizar alternativas biodegradables, se reduce la peligrosidad de las corrientes



residuales y se facilita su integración en ciclos cerrados de gestión [25]. Esta decisión refuerza la coherencia del proceso con la tendencia internacional hacia la eliminación progresiva de sustancias bioacumulables, como se presenta en la Tabla 3.

TABLA 3. Comparación entre el modelo tradicional y el modelo circular en la extracción de polifenoles.

criterio	Modelo industrial tradicional	Modelo circular aplicado
Uso de materia prima	La cascarilla suele descartarse o emplearse en usos de bajo valor.	Valorización de cascarilla de cacao como materia prima principal rica en polifenoles.
Gestión de residuos	Generación de residuos orgánicos con destino a disposición final.	Integración de corrientes secundarias en compostaje o materiales adsorbentes.
Materiales auxiliares	Empleo de polímeros sintéticos persistentes.	Uso de maltodextrina biodegradable.
Eficiencia de recursos	Procesos lineales con baja recuperación de materiales.	Maximización del uso de recursos y extensión del ciclo de vida de materiales.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con el proceso

El diseño del proceso se alinea con el ODS 12-*Producción y consumo responsables* al valorizar la cascarilla como materia prima e integrar estrategias de circularidad a nivel industrial, en concordancia con la Agenda 2030 [26]. El uso de maltodextrina biodegradable como agente encapsulante, en concentraciones de 10–20 % p/p, reduce la carga ecológica del producto final y mejora su compatibilidad con aplicaciones cosméticas. Esta valorización disminuye en un 90 % la disposición del residuo y mejora la eficiencia en el uso de recursos [27].

También, contribuye al ODS-13 *Acción por el clima al evitar la disposición* de la cascarilla en vertederos, reduciendo emisiones asociadas a su degradación, estimadas en 0.3–0.5 kg de CO₂ equivalente por kg de residuo [28]. Además, la integración de operaciones a baja temperatura, como la concentración al vacío y la liofilización, permite reducir el consumo energético del proceso frente a alternativas térmicas convencionales [29].

El ODS 9-*Industria innovación e infraestructura* se aborda mediante un proceso integrado y escalable. La selección de tecnologías convencionales con enfoque sostenible facilita su transferencia industrial, fortaleciendo modelos productivos circulares [30].

Análisis económico preliminar

El análisis estático preliminar de rentabilidad basado en costos e ingresos anuales desarrollado en este trabajo se estructuró tomando como referencia la metodología empleada en el estudio de Susanna Forssell et al. [31], la cual fue adaptada a las condiciones específicas del proceso evaluado. A partir de este enfoque, se estimaron la inversión de capital fijo, los costos de producción y los indicadores de rentabilidad, empleando reglas de estimación ampliamente aceptadas en la literatura.



Inversión de capital fijo (Capital de inversión)

La inversión de capital fijo representa el costo total del diseño, construcción e instalación de la planta es de total: \$ 349 993,28 y consta de las siguientes partes:

Costo dentro de los límites de la batería (ISBL)

Este costo incluye los equipos principales y las piezas a granel. Se estima utilizando el *factor de Hand* para cada equipo en las etapas tempranas del diseño.

Costo Total ISBL: \$ 192 304,00

Costo fuera de los límites de la batería (OSBL)

Estos costos se relacionan con la infraestructura y servicios auxiliares, y son relevantes ya que implican un impacto en la comunidad local. Se calcula como una proporción de los costos ISBL. Se utiliza la «regla de oro» (*Rule of thumb*) del 40 % del ISBL para la estimación inicial.

Costo OSBL: \$76 921,60

Costos adicionales de capital

Costos de ingeniería civil: Se estiman en el 15 % de (ISBL + OSBL).

Costo de ingeniería: \$ 40 383,84.

Costos de contingencia o imprevistos: Para cubrir errores en la estimación o fluctuaciones de precios. Se estiman en el 15 % de (ISBL + OSBL).

Costo de imprevistos: \$ 40 383,84.

Capital de trabajo

El capital de trabajo es el dinero adicional necesario para la puesta en marcha hasta que la planta genere ingresos y se recupera al final de la vida útil de la planta. Se recomienda estimarlo a partir de los costos de producción. El valor es de \$ 26 922,56

Costos anuales de producción (CCOP)

El costo en efectivo de producción (CCOP) es la suma de los costos variables (VCOP) y fijos (FCOP).

Costos variables de producción (VCOP)

Estos costos son proporcionales al rendimiento de la producción, donde la materia prima suele ser la mayor contribución como se expresa en la Tabla 4.

TABLA 4. Costos variables de producción.

Ítem Variable	Costo Mensual	Costo Anual
Materia Prima	\$ 12 500,00	\$ 150 000,00
Electricidad (Servicios)	\$ 2 500,00	\$ 30 000,00
Vapor	\$ 0,00	\$ 0,00
Total Anual de VCOP		\$ 180 000,00

Costos fijos de producción (FCOP)

Estos costos son independientes de la producción y pueden ser significativos como se detalla en la Tabla 5.

TABLA 5. Costos fijos de producción.

Ítem fijo	Estimación (Regla general)	Costo anual
Labor de Operación + Supervisión		\$ 57 600,00
Salariales directos	40 % (Labor + Supervisión)	\$ 23 040,00
Mantenimiento	3 % ISBL	\$ 5 769,12
Impuestos y seguros	1 % ISBL	\$ 1 923,04
Alquiler de terreno	1 % (ISBL + OSBL)	\$ 2 692,26
Gastos generales de planta	65 % (Labor + Supervisión + Salariales)	\$ 52 416,00
Total anual de FCOP		\$ 578 388,26

Ingresos y rentabilidad

Los ingresos se obtienen principalmente de la venta de polifenoles en polvo, con un precio de venta de \$ 65/kg.

Ventas anuales (ingresos): \$1 560 000,00

Margen bruto del producto

Es la diferencia entre ingresos y el costo de las materias primas como se expresa en la Ecuación 1.

$$\text{Margen Bruto} = \text{Ventas} - \text{Materia Prima Anual (1)}$$

$$\text{Margen Bruto} = \$ 1 410 000,00$$

Beneficio bruto

Es igual a los Ingresos menos el costo en efectivo de producción (CCOP) como se expresa en la Ecuación 2.



$$\text{Beneficio Bruto} = \text{Ingresos} - (\text{VCOP} + \text{FCOP}) \quad (2)$$

$$\text{Beneficio Bruto} = \$ 1\,358\,527,58$$

Beneficio neto

Es la ganancia bruta menos los impuestos. Este dinero está disponible para la devolución de las inversiones iniciales como se expresa en la Ecuación 3.

$$\text{Beneficio Neto} = \text{Beneficio Bruto} - \text{Impuestos} \quad (3)$$

$$\text{Beneficio Neto} = \$1\,356\,604,54$$

Análisis de sensibilidad

Si bien el análisis económico indica una rentabilidad favorable bajo los supuestos adoptados, es necesario evaluar la robustez de estos resultados frente a variaciones razonables en las variables dominantes. Para ello, se plantea un análisis de sensibilidad conceptual considerando fluctuaciones del $\pm 20\%$ en el rendimiento de extracción, el precio de venta del producto y el costo de la electricidad.

En primer lugar, una variación del 20% en el rendimiento global de extracción tendría un impacto directo y proporcional sobre las ventas anuales, dado que los ingresos dependen principalmente de la cantidad de polifenoles en polvo producidos. Una reducción del rendimiento implicaría una disminución equivalente en las ventas, mientras que los costos fijos permanecerían prácticamente constantes. En este escenario, el margen económico se reduciría de forma significativa, evidenciando que el rendimiento de extracción constituye la variable más sensible del modelo económico.

En segundo lugar, el precio de venta del producto presenta una sensibilidad elevada, coherente con la naturaleza de un ingrediente de alto valor agregado. Una disminución del 20% en el precio de venta afectaría directamente los ingresos anuales y el beneficio neto, pudiendo comprometer la capacidad de recuperación de la inversión, aun cuando el proceso mantenga su desempeño técnico. Sin embargo, este riesgo se atenúa parcialmente al posicionar el producto en el segmento cosmético, donde la diferenciación por calidad, trazabilidad y estabilidad permite sostener precios superiores a los de extractos genéricos.

Finalmente, el costo de la electricidad, asociado principalmente a operaciones intensivas como microfiltración y liofilización, muestra una sensibilidad moderada en relación con el beneficio neto total. Un aumento del 20% en el costo eléctrico incrementaría los costos variables, pero su impacto relativo sobre el beneficio global sería menor en comparación con el efecto del rendimiento o del precio de venta. El análisis por escenarios indica que el principal riesgo económico del proyecto no está asociado a la inversión de capital, sino a la dependencia de variables operativas y de mercado, especialmente el rendimiento real de extracción y la estabilidad del precio de venta. Estos riesgos pueden mitigarse mediante control de proceso, estandarización de la materia prima y validación experimental previa al escalamiento.

DISCUSIÓN

El proceso propuesto para la valorización de cascarilla se alinea con esquemas reportados en la literatura para la recuperación de compuestos fenólicos a partir de subproductos agroindustriales, particularmente aquellos basados en extracción hidroalcohólica seguida de clarificación, concentración y secado del extracto [5, 6, 11]. No obstante, a diferencia de procesos orientados únicamente a maximizar rendimiento, el diseño propuesto prioriza la preservación de la actividad antioxidante y la obtención de un ingrediente estable para aplicaciones cosméticas, lo que introduce decisiones de diseño con implicaciones directas en costo, escalabilidad y control operativo.

En comparación con procesos reportados que emplean secado por aspersión como etapa final dominante [6, 17] la integración de liofilización en este esquema representa un compromiso deliberado entre estabilidad del producto y eficiencia energética. La liofilización ofrece ventajas claras en términos de conservación de compuestos termolábiles y menor degradación oxidativa, pero constituye uno de los principales cuellos de botella de escalamiento debido a su elevado consumo energético, mayor inversión de capital y limitada capacidad productiva. En contraste, el secado por aspersión permite mayores caudales y menores costos unitarios, a costa de una mayor exposición térmica y potencial pérdida de actividad antioxidante. Desde una perspectiva de ingeniería, el proceso propuesto resulta más adecuado para volúmenes moderados y productos de mayor valor agregado, mientras que escenarios de expansión industrial requerirían evaluar configuraciones híbridas o el reemplazo de la liofilización para mejorar la competitividad económica.

La extracción sólido-líquido con etanol-agua en condiciones moderadas es consistente con prácticas ampliamente documentadas para matrices ricas en polifenoles [5, 12]. Sin embargo, la literatura también evidencia que esta etapa es altamente sensible a la variabilidad de la materia prima, especialmente en subproductos como la cascarilla de los granos de cacao, donde el contenido fenólico, la humedad y la granulometría pueden variar significativamente según origen y condiciones de almacenamiento [11]. Este aspecto constituye un cuello de botella operativo relevante, ya que la variabilidad se propaga hacia las etapas posteriores, afectando la concentración del extracto y la estabilidad del polvo final.

La incorporación de microfiltración en flujo cruzado mejora la claridad y estabilidad del extracto, de acuerdo con procesos reportados para extractos vegetales destinados a aplicaciones alimentarias y cosméticas [13, 14]. No obstante, el ensuciamiento de membranas representa un trade-off crítico: si bien esta operación reduce la carga de sólidos en las etapas finales del proceso (sólidos aguas abajo), introduce riesgos de caída de flujo, incremento de tiempos muertos y costos asociados a limpieza y reemplazo. La experiencia industrial muestra que el desempeño real de esta unidad depende menos del tamaño nominal de poro y más de la estrategia de operación, prefiltración y limpieza in situ. Por tanto, la microfiltración emerge como otro punto sensible de escalamiento, donde la robustez del proceso estará condicionada por la mantenibilidad y no únicamente por la selección del equipo.

En la etapa de evaporación al vacío, el objetivo de reducir el contenido de etanol antes de la liofilización es coherente con procesos reportados para extractos fenólicos concentrados



[15]. Sin embargo, existe un compromiso claro entre la eficiencia de recuperación de solvente y el costo del sistema de condensación y control de emisiones. Aunque el diseño contempla la recuperación del etanol como un elemento de circularidad, en la práctica industrial esta circularidad solo se materializa si se alcanzan tasas de recuperación elevadas y reproducibles. De lo contrario, las pérdidas de solvente impactan negativamente tanto el balance económico como el cumplimiento ambiental y de seguridad, convirtiendo esta etapa en un punto crítico para validar la viabilidad real del proceso.

Desde una perspectiva económica, el análisis demuestra viabilidad económica dentro de los supuestos establecidos, con una relación favorable entre inversión y beneficio anual. Sin embargo, al contrastar este resultado con estudios similares de valorización de subproductos vegetales como en el trabajo de Martínez et al. [5] se evidencia que el margen económico está condicionado por el rendimiento global, el consumo energético y la disponibilidad operativa de unidades intensivas como membranas y liofilización. En este sentido, la ausencia de un análisis de sensibilidad limita la capacidad de evaluar riesgo económico y constituye una debilidad del estudio. La incorporación de escenarios simples permitiría identificar con mayor claridad qué variables dominan la rentabilidad y dónde deben concentrarse los esfuerzos de optimización.

Finalmente, la aceptación del ingrediente en aplicaciones cosméticas requiere asegurar inocuidad, trazabilidad y consistencia entre lotes. Una ruta realista para fortalecer la competitividad del producto es la implementación de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) bajo el marco aplicable en Ecuador, considerando que la ARCSA dispone del certificado para laboratorios cosméticos que evalúa infraestructura, higiene, procesos y control de calidad [32]. En términos operativos, esto implica definir especificaciones claras para el extracto intermedio (fracción obtenida en etapa intermedia), producto final, establecer planes de muestreo, validar procedimientos de limpieza y mantener registros por lote que permitan identificar desviaciones y asegurar reproducibilidad. La integración de estos requisitos transforma las limitaciones normativas en un factor de diferenciación, al reducir riesgos sanitarios, facilitar la comercialización formal y aumentar la confianza del mercado en el ingrediente propuesto.

En conjunto, el proceso propuesto es técnicamente coherente y alineado con prácticas reportadas en la literatura, pero su viabilidad industrial depende de cómo se gestionen los compromisos entre estabilidad del producto, costo energético, control de variabilidad y escalabilidad. La identificación explícita de los compromisos técnicos, económicos y operativos, junto con el reconocimiento de los cuellos de botella de escalamiento, fortalece el carácter ingenieril del estudio y posiciona el trabajo como un caso de diseño transferible a esquemas de bioeconomía circular.

CONCLUSIONES

El estudio desarrolló un diseño conceptual para la obtención de polifenoles en polvo a partir de la cascarilla de *Theobroma cacao* mediante extracción hidroalcohólica, clarificación, concentración al vacío, estabilización por encapsulación y liofilización. Los resultados indican que, bajo los supuestos adoptados, el proceso permite alcanzar un rendimiento global de extracción del 65 %, obtener un polvo con humedad final



≤ 4 % y recuperar aproximadamente el 85 % del etanol empleado. La integración de las operaciones unitarias propuestas es técnicamente coherente con la naturaleza lignocelulósica de la materia prima y la sensibilidad térmica de los compuestos fenólicos.

El análisis económico preliminar estima una inversión de capital fijo de \$ 349 993,28 y un beneficio neto anual superior a \$ 1,35 millones, lo que sugiere viabilidad económica a escala piloto bajo las condiciones evaluadas. En conjunto, el diseño propuesto demuestra la factibilidad técnica y económica de valorizar la cascavilla de cacao como fuente de antioxidantes en polvo para aplicaciones cosméticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad San Francisco de Quito (USFQ), a la Maestría en Ingeniería Circular y al Departamento de Ingeniería Química por el apoyo institucional y el acceso a recursos académicos que permitieron el desarrollo de este trabajo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Samantha Valladares: conceptualización, metodología, gestión y organización de la información técnica, redacción y borrador original.

Germán Layedra: metodología, investigación, validación conceptual, redacción, revisión y edición.

Mateo Valencia: investigación, sistematización de información técnica y visualización de resultados.

Micaela Jaramillo: investigación, organización y revisión de información, redacción, revisión y edición.

Vicente Obando: investigación, validación conceptual, apoyo en análisis de resultados.

José Álvarez-Barreto: conceptualización, supervisión, revisión y edición final.

Todos los autores cumplieron con los cuatro criterios de autoría establecidos por el International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE), contribuyeron de manera sustancial al estudio, revisaron críticamente el manuscrito y aprobaron la versión final.

DECLARACIÓN DE TECNOLOGÍAS GENERATIVAS Y ASISTIDAS POR IA EN EL PROCESO DE ESCRITURA

Para este trabajo, los autores utilizaron Gemini (Google) con el propósito de apoyar, en casos específicos, la edición del lenguaje académico y mejorar la claridad, coherencia y estructura del manuscrito, sin intervenir en el desarrollo metodológico, análisis técnico, interpretación de resultados ni conclusiones del estudio.

Posteriormente, los autores revisaron y editaron el contenido según lo consideraron necesario y asumen plenamente la responsabilidad de la versión final y del contenido publicado.



DISPONIBILIDAD DE DATOS

Para este estudio, no se aplica la disponibilidad de datos en repositorios de acceso abierto. Todas las fuentes de información empleadas se encuentran debidamente citadas en la sección de referencias, garantizando la trazabilidad y verificabilidad de la información utilizada.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses en esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Goya, L., Kongor, J. E., & de Pascual-Teresa, S. (2022). From cocoa to chocolate: Effect of processing on flavanols and methylxanthines and their mechanisms of action. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22). <https://doi.org/10.3390/ijms232214365>
- [2] Izurieta-Castelo, M. I., Vizuete-Montero, M. O., Chaglla-Cango, M. T., Zabala-Vizueté, R. F., Zurita-Quishpe, C. Y., & Ochoa-Cordero, J. K. (2025). Optimización del manejo de residuos orgánicos en plantaciones de cacao: Potencial de subproductos en sistemas de economía circular. *Multidisciplinary Latin American Journal*, 3(1), 536–553. <https://doi.org/10.62131/mlaj-v3-n1-026>
- [3] F Yamoah, F. A., Kaba, J. S., Botchie, D., & Amankwah-Amoah, J. (2021). Working towards sustainable innovation for green waste benefits: The role of awareness of consequences in the adoption of shaded cocoa agroforestry in Ghana. *Sustainability*, 13(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su13031453>
- [4] Loor Intriago, M. L. (2020). *Contenido de vitamina C, polifenoles y flavonoides totales en cascarilla de dos variedades de cacao (Theobroma cacao L.): Nacional y CCN-51* [Tesis de grado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/5935>
- [5] Martínez, R., Torres, P., Meneses, M. A., Figueroa, J. G., Pérez-Álvarez, J. A., & Viuda-Martos, M. (2012). Chemical, technological and in vitro antioxidant properties of cocoa (Theobroma cacao L.) co-products. *Food Research International*, 49(1), 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.08.005>
- [6] Ballesteros, L. F., Ramirez, M. J., Orrego, C. E., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2017). Encapsulation of antioxidant phenolic compounds extracted from spent coffee grounds by freeze-drying and spray-drying using different coating materials. *Food Chemistry*, 237, 623–631. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.142>
- [7] Pashazadeh, H., Zannou, O., Ghellam, M., Koca, I., Galanakis, C. M., & Aldawoud, T. M. S. (2021). Optimization and encapsulation of phenolic compounds extracted from maize waste by freeze-drying, spray-drying, and microwave-drying using maltodextrin. *Foods*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/foods10061396>
- [8] RETEMA. (14 de octubre de 2024). *Cascarilla de cacao, de residuo de la industria chocolatera a materia prima para la obtención de bioplásticos*. RETEMA. <https://www.retema.es/actualidad/cascarilla-de-cacao-de-residuo-de-la-industria-chocolatera-materia-prima-para-la>
- [9] Caicedo-Vargas, C., Pérez-Neira, D., Abad-González, J., & Gallar, D. (2022). Assessment of the environmental impact and economic performance of cacao agroforestry systems in the Ecuadorian Amazon region: An LCA approach. *Science of The Total Environment*, 849. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157795>
- [10] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- [11] Rojo-Poveda, O., Barbosa-Pereira, L., Zeppa, G., & Stévigny, C. (2020). Cocoa bean shell—A by-product with nutritional properties and biofunctional potential. *Nutrients*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/nu12041123>
- [12] Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M. H. A., Ghafoor, K., Norulaini, N. A. N., & Omar, A. K. M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>
- [13] Khan, F., Rehman, W. U., Younus, M., Muhammad, A., Ali, W., & Swati, I. K. (2016). Optimal clarification of apple juice using crossflow microfiltration without enzymatic pre-treatment under different operation modes. *NUST Journal of Engineering Sciences*, 9(1), 18–22. <https://journals.nust.edu.pk/index.php/njes/article/view/178>
- [14] Reig, M., Vecino, X., & Cortina, J. L. (2021). Use of membrane technologies in dairy industry: An overview. *Foods*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/foods10112768>
- [15] Arboleda Mejía, J. A., Ricci, A., Figueiredo, A. S., Versari, A., Cassano, A., de Pinho, M. N., & Parpinello, G. P. (2022). Membrane-based operations for the fractionation of polyphenols and polysaccharides from winery sludges. *Food and Bioprocess Technology*, 15(4). <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02795-3>
- [16] Wang, Z., Zhou, D., Liu, D., & Zhu, B. (2023). Food-grade encapsulated polyphenols: Recent advances as novel additives in foodstuffs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(33). <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2094338>



- [17] Tang, X., & Pikal, M. J. (2004). Design of freeze-drying processes for pharmaceuticals: Practical advice. *Pharmaceutical Research*, 21(2). <https://doi.org/10.1023/B:PHAM.0000016234.73023.75>
- [18] Ruiz-Méndez, M. V., Márquez-Ruiz, G., Holgado, F., & Velasco, J. (2021). Stability of bioactive compounds in olive-pomace oil at frying temperature and incorporation into fried foods. *Foods*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/foods10122906>
- [19] Pérez-Almada, D., Galán-Martín, Á., Contreras, M. M., & Castro, E. (2023). Integrated techno-economic and environmental assessment of biorefineries: Review and future research directions. *Sustainable Energy & Fuels*, 7(17). <https://doi.org/10.1039/d3se00405h>
- [20] Elwakeel, K. Z., Elgarahy, A. M., Alghamdi, H. M., & El-Qelish, M. (2025). A review on techno-economic analysis of lignocellulosic biorefinery producing biofuels and high-value products. *Results in Chemistry*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102052>
- [21] Agrawal, R., Verma, A., Singhania, R. R., Varjani, S., Dong, C. D., & Patel, A. K. (2023). A comprehensive review on techno-economic analysis of biomass valorization and conversional technologies of lignocellulosic residues. *Industrial Crops and Products*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116822>
- [22] Xu, Y., Cruz Rios, D., Wang, S., Ham, C., Choi, J.-H., Kim, H., & Park, S. (2024). Process design and techno-economic analysis for the lignin oil solvent recovery and purification process. *Journal of Cleaner Production*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139999>
- [23] Best, I., Olivera-Montenegro, L., Cartagena-Gonzales, Z., Arana-Copa, O., & Zabot, G. (2021). Techno-economic evaluation of the production of oil and phenolic-rich extracts from *Mauritia flexuosa* L.f. using sequential supercritical and conventional solvent extraction. *Biology and Life Sciences Forum*, 6(1), 120. <https://doi.org/10.3390/foods2021-10988>
- [24] Versino, F., Ortega, F., Monroy, Y., Rivero, S., López, O. V., & García, M. A. (2023). Sustainable and bio-based food packaging: A review on past and current design innovations. *Foods*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/foods12051057>
- [25] Wu, M., Jurtz, N., Hohl, L., & Kraume, M. (2024). Multi-impeller mixing performance prediction in stirred tanks using mean age theory approach. *AIChE Journal*, 70(1), e18247. <https://doi.org/10.1002/aic.18247>
- [26] United Nations. (2011). *Millennium development goals report*. <https://doi.org/10.18356/c495b58e-en>
- [27] Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
- [28] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- [29] Pardo, G., & Zuffa, J. (2012). Life cycle assessment of food-preservation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 28, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.016>
- [30] Belluati, M., Tabasso, S., Calcio Gaudino, E., Cravotto, G., & Manzoli, M. (2024). Biomass-derived carbon-based catalysts for lignocellulosic biomass and waste valorisation: A circular approach. *Green Chemistry*, 26(15), 8642–8668. <https://doi.org/10.1039/d4gc00606b>
- [31] Forssell, S., Pääkkönen, T., Tirronen, E., Kontturi, E., & Oinas, P. (2025). Techno-economic and life cycle assessment of carboxylated cellulose nanocrystals production on industrial scale. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 14(1), 47–56. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c02062>
- [32] Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria (ARCSA). (s. f.). *Atención al usuario*. <https://www.controlsanitario.gob.ec/contacto/>