

Valorización de residuos agroindustriales del coco (cocos nucífera), en el marco de la bioeconomía circular: perspectivas y aplicaciones con valor agregado.

Valuing agro-industrial coconut waste (cocos nucifera) within the framework of the circular bioeconomy: perspectives and added-value applications.

Beltrán López, Robert*, Díaz Rodríguez, Eustacio**,
Moreno García, Blanca Verónica***, Santana Duarte, Corina****

*Doctor en Ciencias de la Administración. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chetumal. Cuerpo Académico, ITCHE-CA-7 Contabilidad empresarial y gobierno. Investigador Nacional Nivel I en SNI-CONAHCYT. Email: robert.bl@chetumal.tecnm.mx, ORCID: 0000-0001-5667-8732.

**Doctor en Administración Escolar y Educativa, Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chetumal. Cuerpo Académico, ITCHE-CA-7 Contabilidad empresarial y gobierno. Investigador Nacional Candidato en SNI-CONAHCYT. Email: eustaci.dr@chetumal.tecnm.mx, ORCID: 0000-0003-0968-5766.

***Doctora en Desarrollo Humano, Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chetumal. Cuerpo Académico, ITCHE-CA-7 Contabilidad empresarial y gobierno. Email: blanca.mg@chetumal.tecnm.mx, ORCID: 0000-0002-3045-2580.

****Doctora en Estudios Fiscales con Orientación en Contabilidad. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chetumal. Cuerpo Académico, ITCHE-CA-7 Contabilidad empresarial y gobierno. Investigador Nacional Candidato en SNI-CONAHCYT. Email: corina.sd@chetumal.tecnm.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8285-3151>.

Correo para recibir correspondencia:

Eustacio Díaz Rodríguez
eustaci.dr@chetumal.tecnm.mx

RESUMEN

OBJETIVO: Analizar el estado del arte sobre la valorización de los residuos agroindustriales del cocotero (cocos nucífera), identificando sus composiciones químicas, aplicaciones industriales actuales y su potencial integración en la bioeconomía circular como estrategia de desarrollo sostenible.

MATERIAL Y MÉTODO: El estudio consistió en una exhaustiva revisión de la literatura con el fin de resumir, evaluar e integrar investigaciones previas sobre los aspectos clave relacionados con la industria del coco y sus residuos agroindustriales. Se utilizó la técnica Booleana y se obtuvieron un total de 98 resultados en SciELO, 228 en Web of Science, 217 en Scopus y 97 en Google Scholar.

RESULTADOS: Muestran la creciente popularidad de los productos derivados del coco y su relevancia agroindustrial.

CONCLUSIONES: Los desechos del coco representan una materia prima alternativa y renovable que requieren ser orientados al mercado de consumo para ser parte de una economía circular sostenible.

PALABRAS CLAVE: economía circular, sostenibilidad, biomasa lignocelulósica, residuos agroindustriales, desecho orgánico.

ABSTRACT

OBJECTIVE: To analyze the state of the art regarding the valorization of agro-industrial coconut (cocos nucifera) waste, identifying its chemical compositions, current industrial applications, and potential integration into the circular bioeconomy as a strategy for sustainable development.

MATERIAL AND METHOD: The study consisted of an exhaustive literature review aimed at summarizing, evaluating, and integrating previous research on key aspects related to the coconut industry and its agro-industrial residues. A Boolean search technique was employed, yielding a total of 98 results in SciELO, 228 in Web of Science, 217 in Scopus, and 97 in Google Scholar.

RESULTS: The findings demonstrate the growing popularity of coconut-derived products and their agro-industrial relevance.

CONCLUSIONS: Coconut waste represents an alternative and renewable raw material that needs to be oriented toward the consumer market to become part of a sustainable circular economy.

KEYWORDS: circular economy, sustainability, lignocellulosic biomass, agro-industrial waste, organic waste.

En los últimos años, el interés por la economía circular (EC) ha crecido significativamente (Zubiolo et al., 2023), promoviendo un cambio de paradigma en la gestión de recursos y residuos, por lo que se ha presentado como una solución a las crisis socioecológicas que enfrenta la humanidad en el siglo XXI (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2023; 2024).

Esta transición es crucial en comunidades como Laguna Guerrero, Chetumal, Quintana Roo, México, que dependen de la agricultura y la pesca, donde los residuos orgánicos como los del coco son abundantes y a menudo desechados sin un aprovechamiento adecuado (López, 2022; Saraiva et al., 2023); la adopción de prácticas de EC representa, mencionan Zubiolo et al. (2023), un modelo que podría reducir la escasez de recursos, la contaminación ambiental, revitalización económica y genere empleos verdes.

De acuerdo con la ONU para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017), la acumulación de residuos sólidos en la superficie terrestre representa un grave problema de contaminación ambiental, impactando negativamente en la salud de los seres vivos. Según sus estimaciones, la industria del coco produce anualmente 1,168,176 toneladas de residuos, de los cuales 140,181.12 toneladas (equivalente al 12%) corresponden a cáscaras (Castro et al., 2021).

Según un informe de la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente [SEMA] (2022), en Quintana Roo se estima que se generan más de 3,200 toneladas de residuos sólidos al día, esta cifra supera la media nacional en generación por persona, lo que indica un problema significativo en la gestión de residuos en el Estado. La acumulación supone un desafío ambiental significativo debido a la alta concentración de compuestos difíciles de procesar, como celulosa y hemicelulosa, que complican su degradación (Wagh et al., 2024).

En relación con el suministro de coco, se han llevado a cabo numerosos estudios científicos para desarrollar tecnologías más eficientes que permitan aprovechar al máximo las propiedades fisicoquímicas de los residuos de biomasa del coco (Vieira et al., 2024). El mesocarpio ha sido evaluado como un aditivo para la producción de aislamiento térmico y acústico en la construcción de edificios, así como biosorbente para la adsorción de rodamina B, en la producción de etanol y para mejorar las propiedades mecánicas de biocompuestos (Ighalo et al., 2023). El endocarpio, que es la capa rígida más interna, se ha reportado como materia prima para la producción de carbón poroso, para preparar bioaditivos que mejoran las propiedades térmicas y bloquean los rayos UV en resinas epoxi y para generar energía térmica.

Los residuos de coco, dicen Sørmo et al. (2024), son fundamentales en una EC, en tanto reutilización de desechos y eficientización de los recursos. Al integrar estos residuos en prácticas de EC, como el reciclaje y el supraciclaje, se pueden crear productos valiosos mientras se reduce la generación de desechos. De lo dicho por Beegum et al. (2022), Ramos Martínez et al. (2023), esto no solo impulsa el crecimiento económico y la creación de empleos, también ayuda a conservar el medio ambiente al disminuir las huellas de carbono y fomentar alternativas sostenibles a los materiales convencionales. Sostienen también que la incorporación de residuos de coco dentro de un marco de EC promueve el desarrollo sostenible y un enfoque regenerativo en la gestión de recursos.

Hoy en día se observa un aumento en las investigaciones destinadas a maximizar el potencial de los residuos de coco para nuevas aplicaciones y a mejorar la eficiencia de procesos de conversión ya establecidos (Doe et al., 2023; Beegum et al., 2022). A pesar de los avances significativos en esta área, muchas de las tecnologías innovadoras para el procesamiento de residuos de coco con el fin de crear productos de valor agregado todavía se encuentran en fases iniciales y enfrentan varios desafíos. Kantun Poot et al. (2024) señalan entre estos desafíos se incluyen la falta de infraestructura adecuada para la recolección, transporte y procesamiento de los residuos, así como la necesidad de realizar más estudios que demuestren su viabilidad a gran escala desde una perspectiva técnico-económica; es fundamental mejorar e integrar la cadena de valor de los residuos lignocelulósicos del coco dentro de una economía en crecimiento y en las biorrefinerías para lograr la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental asociado con la eliminación de residuos (James y Yadav, 2021).

Este estudio se enfocó en optimizar el uso de los residuos de coco, subrayando los retos relacionados con la infraestructura y la logística, y explorando la viabilidad del desarrollo de productos económicamente rentables con valor agregado. De igual manera se analizó cómo integrar la valorización de los residuos de coco en la bioeconomía circular, promoviendo una gestión sostenible de estos desechos (Ramasubramani y Gunasekaran, 2021; Hernández et al., 2024).

El objetivo fue ofrecer una visión general completa sobre el conocimiento histórico del coco, sus características de cultivo, composiciones químicas y aplicaciones, con un énfasis particular en la generación de productos con valor agregado a partir de sus residuos. Reconociendo la importancia del coco en la economía global y la abundancia de sus desechos. Se presenta un documento que proporciona una revisión concisa sobre aspectos clave y destaca el estado actual,

los desafíos y las perspectivas futuras para integrar los residuos agroindustriales del coco en la bioeconomía circular (Elroi et al., 2023; Ighalo et al., 2023).

MATERIAL Y MÉTODO

Con el fin de analizar el estado del arte sobre la valorización de los residuos agroindustriales del cocotero (cocos nucífera) y su integración en la bioeconomía circular, se diseñó una revisión sistemática de la literatura científica. La búsqueda se llevó a cabo en cuatro bases de datos de alto impacto: SciELO, Web of Science, Scopus y Google Scholar, empleando operadores booleanos (AND, OR, NOT) con los siguientes términos de búsqueda en español e inglés: “coconut waste”, “lignocellulosic biomass”, “circular bioeconomy”, “coconut agroindustrial residues”, “cocos nucifera valorization”, y sus equivalentes en español. Como criterios de inclusión se consideraron artículos de investigación original, artículos de revisión y notas técnicas publicados entre 2017 y 2024, disponibles en texto completo y relacionados directamente con la composición química, el procesamiento, las aplicaciones industriales o la valorización de residuos de coco. Se excluyeron documentos en idiomas distintos al español o inglés, así como publicaciones sin proceso de revisión por pares.

Como técnica se aplicaron búsquedas booleanas específicas y se obtuvieron un total de 98 resultados en SciELO, 228 en Web of Science, 217 en Scopus y 97 en Google Scholar.

Los artículos seleccionados fueron evaluados para extraer información clave sobre la planta de coco y su cadena de valor, asimismo se analizaron temas que van de los datos históricos del coco, características del cultivo, aplicaciones industriales, tecnologías de procesamiento, comercialización y avances en la valorización de residuos de coco. Esto abarcó análisis sobre composición química, aplicaciones actuales y perspectivas hacia una bioeconomía sostenible; además, la metodología permitió un análisis integral sobre la reutilización de los residuos agroindustriales del coco, sentando las bases para integrar esta industria en la EC.

RESULTADOS

Datos históricos y cadena de valor

El cocotero es una palmera de gran tamaño que pertenece a la familia Arecaceae. Su origen se remonta al Cretácico superior, y ha sido cultivado durante más de 2000 años (Beegum et al., 2022). Es una especie originaria de las áreas del Océano Índico y del Pacífico, con una historia evolutiva autónoma y prolongada en ambas regiones oceánicas. El cultivo del coco se ha

realizado en los trópicos de tierras bajas de África Occidental y en los Neotrópicos, donde las condiciones climáticas y del suelo son propicias para su crecimiento (Borel et al.s, 2021).

El coco se ha expandido por gran parte de las regiones tropicales, probablemente gracias a las corrientes oceánicas y a la actividad de los navegantes. A finales del siglo XVI, la palma de coco ya se encontraba en todas las áreas tropicales, excepto en la costa tropical de Australia, que aún era desconocida para los exploradores europeos.

En la actualidad, el coco se cultiva y comercializa en más de 90 países, alcanzando una producción mundial anual de 64 millones de toneladas. Los principales productores son Indonesia, Filipinas e India, con 17.5 millones de toneladas, 14.7 millones de toneladas y 11 millones de toneladas, respectivamente, cultivadas en áreas de 2.8, 3.6 y 2.2 millones de hectáreas. Indonesia y Filipinas son también los mayores exportadores de cocos (frescos, secos o deshidratados) y sus derivados, representando el 32.1% y el 24.2% del total de productos exportados. Otros países significativos en el mercado global incluyen a Sri Lanka (2.2 millones de toneladas) y Brasil (2.4 millones de toneladas) (Borel et al., 2021).

En Brasil, la región noreste es la principal área productora, generando anualmente 1.44 millones de toneladas de cocos, lo que representa el 78% de la producción total del país. Esta producción se lleva a cabo en una superficie de 157,403 hectáreas (82% del área total cultivada) y tiene un valor estimado en R\$ 1.120 millones (70% del valor total). El cultivo se concentra en las zonas costeras de los estados de Ceará, Bahía, Pernambuco y Sergipe.

Características del cultivo

El cocotero prospera en áreas tropicales con condiciones cálidas y alta humedad; la producción óptima se logra con la precipitación anual de 1500–2500 mm, en temperaturas medias de 27 a 30°C; requiere de humedad relativa superior al 60%; los vientos suaves a moderados son beneficiosos para la transpiración y absorción de nutrientes. Los factores climáticos adversos como el estrés por temperaturas superiores a 33.7 °C durante la germinación del polen, o los periodos secos prolongados y temperaturas extremas pueden afectar la productividad, especialmente durante la inflorescencia (Ranasinghe et al., 2015). El cocotero es intolerante al frío, no soportando temperaturas por debajo de 21°C durante más de tres meses, pues requiere suelos bien drenados y ricos en cloruro, pero es adaptable a diversas texturas (laterita, aluvial, franco arenoso). Es tolerante a suelos ácidos y alcalinos (pH entre 5 y 8) y su fruto desarrolla su máxima capacidad de agua y azúcar entre los 6 y 8 meses. A medida que madura, el contenido

de agua disminuye y la cáscara se vuelve más fibrosa, por lo que la copra se forma completamente entre los 11 y 12 meses, alcanzando un contenido de aceite del 40-70%.

Existen variaciones genéticas que pueden presentarse en la composición química de celulosa y lignina, han sido identificadas en varios cultivares; por ejemplo, los cocos enanos originarios de Brasil cuyo tamaño es compacto, conocido como *Brazilian Green Dwarf—Jiqui*, tienen el menor contenido de lignina (37.2%), y el *Brazilian Yellow Dwarf—Gramame*, el mayor (43.9%). El *Malayan Red Dwarf*, originario de Malasia, reconocido por su cáscara de color rojizo, presenta el mayor contenido de celulosa (37.4%), mientras que *Cameroon Red Dwarf*, originario de Camerún, con el mismo tono tiene el menor (31.5%). Los cultivares enanos producen frutos más pequeños con menor contenido de copra y aceite; se cosechan alrededor del octavo mes para consumo como agua, y las variedades altas e híbridas se cosechan entre los 11 y 13 meses, presentando un estado óptimo para usos agroindustriales y domésticos.

Aplicaciones industriales, tecnologías de procesamiento y comercialización

El coco se utiliza ampliamente en diversas industrias, incluyendo la producción de aceite, alimentos, cosméticos, y como fuente de agua. El agua de coco es una bebida natural muy valorada por sus propiedades nutricionales y su bajo contenido de carbohidratos y grasas. Se comercializa en diversas presentaciones y ha ganado popularidad en mercados como Estados Unidos y Europa (Varma et al., 2019). La pulpa sólida del coco es fundamental, es una importante fuente de aceite vegetal, con una demanda global de aproximadamente tres millones de toneladas anuales. Este aceite es rico en ácidos grasos saturados, especialmente ácidos grasos de cadena media, lo que lo hace más resistente y estable a la oxidación.

Además del aceite, el coco produce otros productos como harina, leche y coco deshidratado. La leche de coco se obtiene mediante prensado y es utilizada en diversas preparaciones culinarias. La harina de coco es rica en fibra y proteínas, mientras que el coco deshidratado se utiliza en la industria alimentaria, especialmente en panadería y confitería. También se extrae azúcar de la savia del cocotero, que es nutritiva y tiene un bajo índice glucémico. En el ámbito comercial, las exportaciones e importaciones de productos derivados del coco alcanzan cifras significativas a nivel mundial, con Brasil siendo un actor importante que importa y exporta varios productos de coco para satisfacer la demanda interna y externa (Da Silva et al., 2020).

La pulpa sólida del coco es un producto clave porque representa una fuente importante de aceite vegetal (aceite de coco). La demanda global de este aceite es aproximadamente de 3 millones de toneladas anuales, utilizado en la industria alimentaria como alternativa grasa para cocinar;

en cosméticos, para productos capilares y humectantes que mejoran la barrera cutánea y tienen propiedades antiinflamatorias; y en farmacéutica por su eficacia antioxidante y citoprotectora, gracias a sus polifenoles (Naik et al., 2022).

El aceite de coco es rico en ácidos grasos saturados (hasta un 91%), predominantemente ácidos grasos de cadena media (AGCM), con pequeñas cantidades de ácidos grasos insaturados (AFI) y poliinsaturados. Los AGCM incluyen ácido láurico (principal componente en frutas completamente maduras, hasta un 52%), así como ácidos cáprico y caprílico. Los AFI comprenden los ácidos linoleico y oleico. Durante el crecimiento del fruto se observa un aumento progresivo en el contenido de aceite y un cambio significativo en el perfil de ácidos grasos. Debido a la composición química de los AGCM, el aceite de coco es más resistente a la oxidación durante el almacenamiento, más estable térmicamente y se metaboliza más rápidamente que los ácidos grasos presentes en las grasas animales (Sundrasegaran y Mah, 2020).

Existen varios métodos para extraer el aceite de coco: mecánico, mediante la presión de la copra; tradicional, hirviéndola con agua; y mediante lixiviación con solventes. El método de extracción afecta las características y aplicaciones del aceite. Se utilizan procesos químicos para obtener aceite refinado, blanqueado y desodorizado (RBD). Sin embargo, el uso de solventes y altas temperaturas puede desactivar componentes valiosos del aceite, reduciendo su aroma y sabor, así como algunos beneficios para la salud. En contraste, el aceite de coco virgen (VCO) se obtiene sin solventes, a partir de carne fresca o leche, mediante técnicas naturales o mecánicas, preservando sus características sensoriales y funcionales.

Además del aceite, otros productos derivados del coco incluyen harina, leche y coco deshidratado. La leche de coco es una emulsión natural que puede prepararse manualmente o a escala industrial mediante prensado hidráulico o mecánico. La harina de coco es rica en fibra dietética y proteínas, se produce a partir de subproductos generados en las industrias del aceite, y la leche de coco tras procesos como blanqueo, prensado y molienda. El coco deshidratado se obtiene al secar la nuez madura hasta alcanzar aproximadamente un 2.5% de humedad, seguido por esterilización y triturado.

El azúcar de coco es otro producto comercializable que no proviene del fruto sino de la savia extraída de la inflorescencia del cocotero; contiene alrededor del 16% de sacarosa, al calentarse a alta temperatura forma azúcar cristalino o amorfo. El azúcar resultante es marrón, tiene entre un 2% y un 3% de humedad y es nutritivo, debido a su contenido en aminoácidos, vitaminas, minerales, polifenoles y antioxidantes. Además, presenta un índice glucémico bajo comparado con el azúcar convencional (Hebbar et al., 2022).

Las exportaciones e importaciones globales relacionadas con productos del coco alcanzan aproximadamente USD\$ 5.7 mil millones y USD\$ 6.1 mil millones respectivamente. En 2021, Brasil importó 13.3 kt (con un valor comercial de US\$ 29.6 millones) y exportó 1.2 kt (también valoradas en US\$ 29.6 millones) en productos derivados del coco; esto representa variaciones del -33% en importaciones y +24% en exportaciones respecto a 2019. A pesar de que Brasil está entre los cinco principales productores mundiales de coco, gran parte de su producción se destina a la venta de frutos frescos; para satisfacer la demanda interna también importa coco deshidratado y aceite desde Indonesia, Malasia, Filipinas y Uruguay (Donadio et al., 2019).

Avances en la valorización de residuos de coco

La composición química es un aspecto fundamental de los materiales lignocelulósicos, compuestos por hemicelulosa, celulosa y lignina. La celulosa, un polímero natural, es el principal componente de la pared celular de las plantas y el compuesto orgánico más abundante en la naturaleza (Zhang et al., 2022). Se presenta como un polisacárido lineal formado por unidades de D-glucosa unidas mediante enlaces β 1-4. Las cadenas de celulosa se organizan en fibras individuales que alternan entre regiones cristalinas (ordenadas) y amorfas (menos ordenadas). La estructura y orientación molecular de la celulosa pueden variar considerablemente, dando lugar a diferentes polimorfismos que dependen de la fuente y del método de extracción. La celulosa tipo I, con mayor cristalinidad, se utiliza para fabricar nanocompuestos con propiedades mecánicas superiores, mientras que las formas tipo II y III son más amorfas y se emplean en productos farmacéuticos y biomédicos. La abundancia de celulosa en partes no comestibles de las plantas (biomasa lignocelulósica) la convierte en una fuente valiosa para compuestos químicos (Hebbar et al., 2022).

La hemicelulosa también forma parte de la pared celular, pero a diferencia de la celulosa, su estructura es altamente ramificada y está compuesta por diversas unidades de azúcares como xilosa, glucosa y galactosa. Estas unidades se hidrolizan fácilmente con ácidos diluidos y son solubles en soluciones alcalinas (Tang et al., 2022). Las hemicelulosas aportan flexibilidad a la biomasa lignocelulósica y aumentan el área de unión entre fibras, lo que las hace útiles en aplicaciones como recubrimientos y materiales compuestos. Por su parte, la lignina es el segundo polímero más abundante en la biomasa lignocelulósica y tiene una estructura tridimensional aromática que proporciona rigidez a las paredes celulares, facilitando el transporte de agua y nutrientes mientras protege contra microorganismos y enzimas. La proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina varía según la especie vegetal y las condiciones ambientales, lo que influye en las propiedades mecánicas de los subproductos lignocelulósicos. Además, estos tres

componentes están interconectados por enlaces covalentes y no covalentes, donde la hemicelulosa actúa como un aglutinante entre la celulosa y la lignina, formando una matriz lignocelulósica rígida que dificulta el acceso a las fibras.

La investigación sobre materiales lignocelulósicos se ha centrado en caracterizar su composición química e identificar pretratamientos eficaces para facilitar la recuperación de sus componentes sin comprometer su integridad. En particular, evaluar el contenido de lignina es crucial para optimizar los parámetros físico-químicos durante el pretratamiento y durante este proceso, los disolventes utilizados pueden promover la ruptura de enlaces químicos en los complejos lignina-carbohidrato, fragmentando las macromoléculas en partes más pequeñas y reduciendo sus masas moleculares.

Características de residuos sólidos provenientes del coco

El peso del fruto de coco incluye entre un 55% y un 80% de partes no comestibles que son ricas en biomasa lignocelulósica, caracterizada por su estructura fibrosa y heterogénea. La mayor parte de la investigación sobre los residuos de coco se ha enfocado en la cáscara (mesocarpio), ya sea para analizar su composición química, explorar aplicaciones potenciales o evaluar diversos pretratamientos químicos para fraccionar los componentes lignocelulósicos (Kim et al., 2021). Este interés en las fibras se debe a su fácil manejo y a los procedimientos de troceado, ya que solo requieren ser separadas de la cáscara interna, además de su alto volumen.

El aprovechamiento de residuos agroindustriales, como las fibras de coco, es importante debido a sus propiedades mecánicas, varían según el subproducto y sus características químicas. Las propiedades evaluadas incluyen resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y densidad. Según Danso et al. (2015), las fibras de coco tienen un contenido de humedad del 6.4%, una resistencia a la tracción de 222 MPa, un módulo de elasticidad de 2.8 GPa y una densidad de 0.81 g/cm³. Estas fibras mejoran la resistencia a la compresión de bloques de construcción a base de tierra en un 41%.

Por otro lado, Robert et al. (2019) estudiaron tableros hechos con cáscaras de coco y encontraron que podrían ser una alternativa viable a los aislantes térmicos tradicionales en construcciones. La cáscara tratada mostró una densidad aparente de 0.333 g/cm³, una resistencia a la flexión de 435 MPa y una resistencia a la compresión de 321 MPa. Se observó que las cáscaras sin tratar ofrecían mejores propiedades térmicas, mientras que el tratamiento con NaOH mejoraba las propiedades mecánicas de los tableros.

DISCUSIÓN

Tal como mencionan MacArthur (2019) y Quintero y Cervantes (2023), la EC es un enfoque sostenible que busca regenerar y restaurar recursos biológicos para producir productos de valor añadido, al mismo tiempo que minimiza los impactos negativos de los residuos industriales. Este enfoque se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (2024), especialmente el ODS 12, que promueve patrones de consumo y producción sostenibles para 2030, vinculándose directamente con la reintegración de residuos y las biorrefinerías.

Confirmando lo dicho por Gopal et al. (2021), Li et al. (2021) y Tang et al. (2022), las políticas de apoyo y las tecnologías innovadoras en biorrefinerías son fundamentales para el desarrollo de una bioeconomía moderna, especialmente en economías agrícolas. Las biorrefinerías, que procesan biomasa residual como materiales lignocelulósicos, tienen el potencial de generar una variedad de bioproductos y contribuir a prácticas agrícolas sostenibles. La conversión de residuos agrícolas del coco en materiales biológicos de alto valor es una estrategia efectiva para gestionar residuos y aplicar el concepto de biorrefinería dentro de una EC, mejorando la competitividad empresarial y ofreciendo productos sostenibles a los consumidores (MacArthur, 2019). Las estrategias para la valorización de la biomasa de coco pueden incluir mejoras en técnicas de recuperación y procesamiento, así como su uso en sectores como la construcción, fabricación de materiales adsorbentes, producción de etanol, bioaceites, biocarbón y fertilizantes orgánicos. Sin embargo, para integrar eficazmente la biomasa en el modelo industrial actual y facilitar una transición hacia energías renovables, se requieren políticas específicas, colaboraciones e inversiones adecuadas.

En la gestión de residuos de coco a gran escala, la estrategia predominante ha sido la eliminación directa, en lugar de optar por el reciclaje, la recuperación de energía o cualquier forma de reutilización. Dado el volumen actual de producción de coco y el crecimiento proyectado, la cadena de valor de estos residuos tiene un gran potencial para contribuir al desarrollo económico sostenible.

La falta de técnicas avanzadas para el reciclaje de residuos de coco representa un obstáculo para lograr una EC y fomentar un desarrollo económico local bajo en carbono. Esta situación es importante porque, como comentan Djeni et al. (2020), se debe a la ausencia de políticas que faciliten una transición hacia prácticas más sostenibles y que promuevan el conocimiento sobre los beneficios del reciclaje. Asegura Borovkova et al. (2022), para impulsar este cambio es esencial la participación activa de productores de todos los tamaños a lo largo de la cadena de

valor. Además, invertir en investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras para procesar los residuos puede mejorar tanto la productividad como la calidad del producto, estableciendo alianzas entre proveedores y clientes en diversas industrias; esto generaría sinergias y oportunidades comerciales que asegurarían la viabilidad de una economía circular y promoverían un enfoque de residuos a ganancias.

A lo largo de los años, la industria del coco ha evidenciado su versatilidad y relevancia económica en diversos sectores, que abarcan desde alimentos y cosméticos hasta materiales de construcción y combustibles sostenibles. Aunque se distingue por su capacidad de integrar prácticas sostenibles en su cadena de producción y procesamiento, todavía tiene el potencial de descubrir nuevas oportunidades al explorar las diferentes partes de la fruta, incluyendo el agua, la semilla y los residuos lignocelulósicos, esto ofrece una perspectiva alentadora para alcanzar los objetivos establecidos en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Entre las aplicaciones prácticas concretas documentadas en la literatura, destacan casos industriales de gran relevancia. En Sri Lanka y Filipinas, la fibra de coco (coir) extraída del mesocarpio se emplea a escala industrial para la fabricación de geotextiles, colchones y sustratos hortícolas, consolidándose como una alternativa sostenible a las fibras sintéticas (Ighalo et al., 2023). En India, empresas del sector de la construcción utilizan tableros de aglomerado elaborados con cáscara de coco como material de aislamiento térmico en viviendas de bajo costo (Ramasubramani & Gunasekaran, 2021). A su vez, en Brasil, proyectos piloto han demostrado la viabilidad de producir briquetas de biocarbón a partir de endocarpio de coco para su uso como combustible doméstico renovable, reduciendo la dependencia de leña y disminuyendo emisiones de CO₂ (Borel et al., 2021). En el sector cosmético, empresas multinacionales han incorporado el aceite de coco virgen (VCO) en formulaciones capilares y dermocosméticas dada su comprobada actividad antiinflamatoria y humectante (Da Silva et al., 2020). Estos ejemplos ilustran cómo la cadena de valor del coco puede articularse de manera tangible dentro de los principios de la bioeconomía circular.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática demuestra que los residuos agroindustriales del cocotero (*cocos nucifera*) constituyen una fuente valiosa de biomasa lignocelulósica con un amplio espectro de aplicaciones industriales y comerciales. La fibra del mesocarpio, la cáscara del endocarpio y los subproductos de la copra poseen propiedades fisicoquímicas que los hacen aptos para sectores tan diversos como la construcción, la industria cosmética, la farmacéutica, la producción de bioenergía y la fabricación de materiales compuestos.

La integración de estos residuos en un modelo de bioeconomía circular no solo representa una alternativa viable para reducir la contaminación ambiental derivada de su eliminación indiscriminada, sino que también abre oportunidades para la generación de empleos verdes y el desarrollo económico local, en especial en regiones tropicales dependientes del sector agropecuario como Quintana Roo, México. La alineación de esta estrategia con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) subraya su pertinencia en el contexto de la Agenda 2030 de la ONU.

Sin embargo, la materialización de este potencial requiere la articulación de tres ejes fundamentales: el fortalecimiento de la infraestructura de acopio, transporte y procesamiento de residuos; el diseño de políticas públicas que incentiven la transición hacia prácticas de economía circular; y la inversión sostenida en investigación, desarrollo e innovación tecnológica que valide la escalabilidad de los procesos identificados. En conjunto, estas acciones permitirían consolidar una cadena de valor competitiva y ambientalmente responsable en torno a los residuos del coco.

Limitaciones del estudio y líneas futuras de investigación

La presente investigación presenta diversas limitaciones inherentes al enfoque metodológico adoptado. En primer lugar, al tratarse de una revisión de literatura, los hallazgos están condicionados por la disponibilidad y calidad de los estudios primarios incluidos, lo que puede generar sesgos de publicación al privilegiar resultados positivos; en segundo lugar, la heterogeneidad en los métodos de caracterización fisicoquímica reportados en los diferentes estudios dificulta la comparación directa de resultados; en tercer lugar, la mayoría de las tecnologías de procesamiento identificadas se encuentran en etapas de laboratorio o escala piloto, por lo que su viabilidad a nivel industrial aún requiere validación.

Con base en lo anterior, se sugieren las siguientes líneas prioritarias de investigación futura: (1) realizar estudios de factibilidad tecno-económica para la implementación de biorrefinerías de residuos de coco en el sureste mexicano; (2) desarrollar investigación aplicada que evalúe el desempeño de materiales de construcción elaborados con fibra de coco bajo las condiciones climáticas particulares del Caribe mexicano; (3) analizar el impacto social y económico de la incorporación de residuos de coco en cadenas de valor locales, considerando la perspectiva de comunidades productoras como Laguna Guerrero, Quintana Roo y, (4) explorar el potencial de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para optimizar los procesos de pretratamiento y fraccionamiento de biomasa lignocelulósica de coco.

REFERENCIAS

- Beegum, P. S., Nair, J. P., Manikantan, M. R., Pandiselvam, R., Shill, S., Neenu, S. y Hebbar, K. B. (2022). Effect of coconut milk, tender coconut and coconut sugar on the physico-chemical and sensory attributes in ice cream. *Journal of Food Science and Technology*, 1-12. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-021-05279-y>
- Borel, L. D. M. S., De Lira, T. S., Ataíde, C. H. y de Souza Barrozo, M. A. (2021). Thermochemical conversion of coconut waste: material characterization and identification of pyrolysis products. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143, 637-646. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-020-09281-y>
- Borovkova, V. S., Malyar, Y. N., Sudakova, I. G., Chudina, A. I., Zimonin, D. V., Skripnikov, A. M. y Issaoui, N. (2022). Composition and structure of aspen (*Populus tremula*) hemicelluloses obtained by oxidative delignification. *Polymers*, 14(21) 4521. <https://doi.org/10.3390/polym14214521>
- Castro, B., Rodríguez, J., Hernández, W., Vargas, G. y Valencia, R. (2021). Evaluación del proceso de pirólisis con residuos de maíz y coco en atmósfera de CO₂. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 12(2), 33-46. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8081180>
- Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M. y Williams, J. B. (2015). Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction and Building Materials*, 101(1), 797-809. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069>
- Da Silva, A., Santos, L. y Melo, B. (2020). Use of coconut oil in the production of cosmetics: a bibliographic review. *Research, Society and Development*, 9(11), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10397>
- Djeni, T. N., Kouame, K. H., Ake, F. D., Amoikon, L. S., Dje, M. K. y Jeyaram, K. (2020). Microbial diversity and metabolite profiles of palm wine produced from three different palm tree species in Côte d'Ivoire. *Scientific Reports*, 10(1), 1715. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58587-2>
- Doe, B., Aboagye, P. D., Osei-Owusu, P. K., Amoah, T., Aidoo, A. y Amponsah, N. Y. (2023). Towards circular economy and local economic development in Ghana: Insights from the coconut waste value chain. *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), 347-372. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43615-022-00182-w>
- Donadio, L. C., Lederman, I. E., Roberto, S. R. y Stucchi, E. S. (2019). Dwarfing-canopy and rootstock cultivars for fruit trees. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 41(3), 1-12. <https://doi.org/10.1590/0100-29452019997>
- Elroi, H., Zbigniew, G., Agnieszka, W. C. y Piotr, S. (2023). Enhancing waste resource efficiency: circular economy for sustainability and energy conversion. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1303792. <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2023.1303792/full>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2017). *El estado del mundo: avanzar en la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos*. <https://www.fao.org>.

- Gopal, M., Shil, S., Gupta, A., Hebbar, K. B. y Arivalagan, M. (2021). Metagenomic investigation uncovers presence of probiotic-type microbiome in Kalparasa® (fresh unfermented coconut inflorescence sap). *Frontiers in Microbiology*, 12, 662783. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.662783>
- Hebbar, K. B., Ramesh, S. V., Ghosh, D. K., Beegum, P. S., Pandiselvam, R., Manikantan, M. R. y Mathew, A. C. (2022). Coconut sugar-a potential storehouse of nutritive metabolites, novel bio-products and prospects. *Sugar Tech*, 24(3), 841-856. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12355-021-01101-3>
- Hernández, D. R., Rodríguez, L. A. A. y Mesa, A. P. (2024). Cadena de valor del proyecto de organización de obra y montaje de electricidad. *Hitos de Ciencias Económico Administrativas*, 30(86), 76-95. <https://doi.org/10.19136/hitos.a30n86.6320>
- Ighalo, J. O., Conradie, J., Ohoro, C. R., Amaku, J. F., Oyedotun, K. O., Maxakato, N. W., Akpomie, K. G., Okeke, E. S., Olisah, C., Malloum, A. y Adegoke, K. A. (2023). Biochar from coconut residues: an overview of production, properties, and applications. *Industrial Crops and Products*, 204, 117300. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117300>
- James, A. y Yadav, D. (2021). Valorization of coconut waste for facile treatment of contaminated water: a comprehensive review (2010–2021). *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102075. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102075>
- Kantun Poot, A. S., Maldonado Antonio, D. M., Beltrán López, R. y Díaz Rodríguez, E. (2024). Oportunidades de negocio a través del aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos en Chetumal. *Emergentes - Revista Científica*, 4(3), 450–459. <https://doi.org/10.60112/erc.v4i3.229>
- Kim, T. K., Lee, M. H., Kim, S. M., Kim, M. J., Jung, S., Yong, H. I. y Choi, Y. S. (2021). Physicochemical properties of reduced-fat duck meat emulsion systems: effects of preemulsification with vegetable oils and duck skin. *Poultry science*, 100(2), 1291-1298. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.10.044>
- Li, J., Liu, Z., Feng, C., Liu, X., Qin, F., Liang, C., Bian, H., Qin, C. y Yao, S. (2021). Green, efficient extraction of bamboo hemicellulose using freeze-thaw assisted alkali treatment. *Bioresource Technology*, 333, 125107. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125107>
- López, R. I. (2022). *Auditoría realizada a la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del estado de Quintana Roo en materia de manejo integral de residuos*. (Tesis de Licenciatura inédita) Universidad Autónoma de Quintana Roo, Chetumal, Q. Roo. <http://hdl.handle.net/20.500.12249/3218>
- MacArthur, F. E. (2019). *Economía circular: claves para entender el modelo que está revolucionando la sostenibilidad*. FUNDACIÓN ECOLEC. <https://www.ecolec.es/informacion-y-recursos/economia-circular/>
- Naik, M., C. K., S., Rawson, A. y N, V. (2022). Tender coconut water: A review on recent advances in processing and preservation. *Food Reviews International*, 38(6), 1215-1236. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1785489>

- Organización de las Naciones Unidas [ONU] (2023). *Día Internacional de Cero Desechos: La ONU aboga por el cambio hacia una economía circular*. <https://news.un.org/es/story/2023/03/1519822>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU] (2024). *Objetivos de Desarrollo Sostenible 2024. Naciones Unidas ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*. <https://sdgs.un.org/goals/goal12>
- Quintero, J. J. y Cervantes, M. de los Á. (2023). Prácticas de Responsabilidad Social con Enfoque al Desarrollo Sostenible Implementadas en las Pymes de Colombia. *Hitos de Ciencias Económico Administrativas*, 29(85), 408-427. <https://doi.org/10.19136/hitos.a29n85.6156>
- Ramasubramani, R. y Gunasekaran, K. (2021). Sustainable alternate materials for concrete production from renewable source and waste. *Sustainability*, 13(3), 1204. <https://doi.org/10.3390/su13031204>
- Ramos Martínez, P. N., Martínez Jiménez, R. M. y Hernández Triano, L. (2023). Producción y consumo responsables en un entorno local: municipio, ciudadanía e industria del reciclaje. *Hitos de Ciencias Económico Administrativas*, 29(85), 392-407. <https://doi.org/10.19136/hitos.a29n85.6082>
- Ranasinghe, C., Silva, L. R. y Premasiri, R. D. N. (2015). *Major determinants of fruit set and yield fluctuation in coconut (Cocos nucifera L.)*. Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka, 43(3), 253–264. <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v43i3.7955>
- Robert, U. W., Etuk, S. E., Umoren, G. P. y Agbasi, O. E. (2019). Assessment of thermal and mechanical properties of composite board produced from coconut (Cocos nucifera) husks, waste newspapers, and cassava starch. *International Journal of Thermophysics*, 40 (83), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2547-8>
- Saraiva, A., Carrascosa, C., Ramos, F., Raheem, D., Lopes, M. y Raposo, A. (2023). Coconut Sugar: Chemical Analysis and Nutritional Profile; Health Impacts; Safety and Quality Control; Food Industry Applications. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20, 3671. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043671>
- Secretaría de Ecología y Medio Ambiente [SEMA] (2022). *Informe de Medio Ambiente y Crecimiento Sustentable*. <https://n9.cl/4a7jj6>
- Sørmo, E., Krahn, K. M., Flatabø, G. Ø., Hartnik, T., Arp, H. P. y Cornelissen, G. (2024). Distribution of PAHs, PCBs, and PCDD/Fs in products from full-scale relevant pyrolysis of diverse contaminated organic waste. *Journal of Hazardous Materials*, 461, 132546. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132546>
- Sundrasegaran, S. y Mah, S. H. (2020). Extraction Methods of Virgin Coconut Oil and Palm-pressed Mesocarp Oil and their Phytonutrients. *EFood*, 1(6), 381-391. <https://doi.org/10.2991/efood.k.201106.001>
- Tang, N., Tan, X., Cai, Y., He, M. Y., Xiang, Z. Y., Ye, H. y Ma, J. L. (2022). Characterizations and application potentials of the hemicelluloses in waste oil-tea camellia fruit shells from Southern China. *Industrial Crops and Products*, 178, 114551. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114551>

- Varma, S. R., Sivaprakasam, T. O., Arumugam, I., Dilip, N., Raghuraman, M., Pavan, K. B. y Paramesh, R. (2019). In vitro anti-inflammatory and skin protective properties of Virgin coconut oil. *Journal of traditional and complementary medicine*, 9(1), 5-14. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2017.06.012>
- Vieira, F., Santana, H. E. P., Jesus, M., Santos, J., Pires, P., Vaz-Velho, M., Silva, D. P. y Ruzene, D.S. (2024). Coconut Waste: Discovering Sustainable Approaches to Advance a Circular Economy. *Sustainability* 16, 3066. <https://doi.org/10.3390/su16073066>
- Wagh, M. S., Sowjanya, S., Nath, P. C., Chakraborty, A., Amrit, R., Mishra, B., Mishra, A. K. y Mohanta, Y. K. (2024). Valorisation of agro-industrial wastes: circular bioeconomy and biorefinery process—a sustainable symphony. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.055>
- Zhang, M., Bobokalonov, J., Dzhonmurodov, A. y Xiang, Z. (2022). Optimizing yield and chemical compositions of dimethylsulfoxide-extracted birchwood xylan. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 7(3), 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.07.001>
- Zubiolo, C., de Santana, H. E., Pereira, L. L., Ruzene, D. S., Silva, D. P. y Freitas, L. S. (2023). Bio-Oil Production and Characterization from Corn Cob and Sunflower Stem Pyrolysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(1), 65-77. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.iecr.3c03337>