

**Análisis socioeconómico de la utilización de cáscaras de chontaduro como
alternativa al plástico**

Sebastian Zamora Montealegre

Universidad Icesi
Maestría en Sostenibilidad
Programas Interdisciplinarios
Junio, 2025
Cali, Colombia

**Análisis socioeconómico de la utilización de cáscaras de chontaduro como
alternativa al plástico**

Sebastian Zamora Montealegre

Trabajo de Grado para optar al título de Máster en Sostenibilidad

Directora del Proyecto
Katherine Ortegón PhD

Universidad Icesi
Maestría en Sostenibilidad
Programas Interdisciplinarios
Junio, 2025
Cali, Colombia

Tabla de contenido

Resumen	5
Resumen Gráfico	6
Introducción	7
Contexto del problema	8
Objetivo del proyecto	12
Objetivos Específicos.....	12
Metodología.....	13
Análisis del estado de madurez tecnológica del biomaterial	13
Diseño del plan técnico-económico para el desarrollo de la cadena de valor	14
Propuesta de acciones para el desarrollo socioambiental de la cadena de valor	14
Resultados y Discusión.....	17
1. Análisis del estado de madurez tecnológica del biomaterial	17
1.1 Caracterización del estado actual de desarrollo del biomaterial	17
1.2 Acciones sugeridas para el desarrollo tecnológico del material	20
2. Diseño del plan técnico-económico para el desarrollo de la cadena de valor	21
2.1 Identificación de actores clave.....	22
2.2 Análisis de costos	22
2.3 Análisis comparativo	26
3. Propuesta de para el desarrollo socioambiental de la cadena de valor	30
3.1 Caracterización socioeconómica de la población con potencial productor de chontaduro.	30
3.2 Indicadores según UNEP, revisión de literatura y análisis contextual.	31
3.3 Acciones recomendadas	33
Conclusiones	35
Anexos	36
Referencias	38

Listado de anexos

Anexo 1 – Tabla de indicadores relevantes para la cadena de valor del aprovechamiento de la cáscara de chontaduro

Resumen

Este proyecto evalúa el potencial socioeconómico de integrar el biomaterial desarrollado por la Universidad Icesi a partir de cáscaras de chontaduro y bagazo de caña de azúcar en la cadena de valor del chontaduro, combinando innovación tecnológica con impacto social. Sus objetivos incluyen analizar la madurez tecnológica del biomaterial, diseñar un plan técnico económico y proponer acciones de desarrollo socioambiental en regiones productoras como Putumayo y Cauca, zonas afectadas por cultivos ilícitos y pobreza multidimensional, donde el chontaduro ofrece una alternativa legal para fortalecer economías rurales, generar empleo y reducir vulnerabilidades estructurales. Mediante metodologías comparativas de análisis de ciclo de vida (LCA), evaluación social (S-LCA) y modelos de negocio circular, el proyecto busca demostrar que esta innovación no solo mitiga impactos ambientales (-57% de huella de carbono vs EPS), sino que impulsa un desarrollo territorial inclusivo y regenerativo.

Palabras claves: Biomaterial, TRL, bioeconomía, impactos, valoración de residuos, economía circular

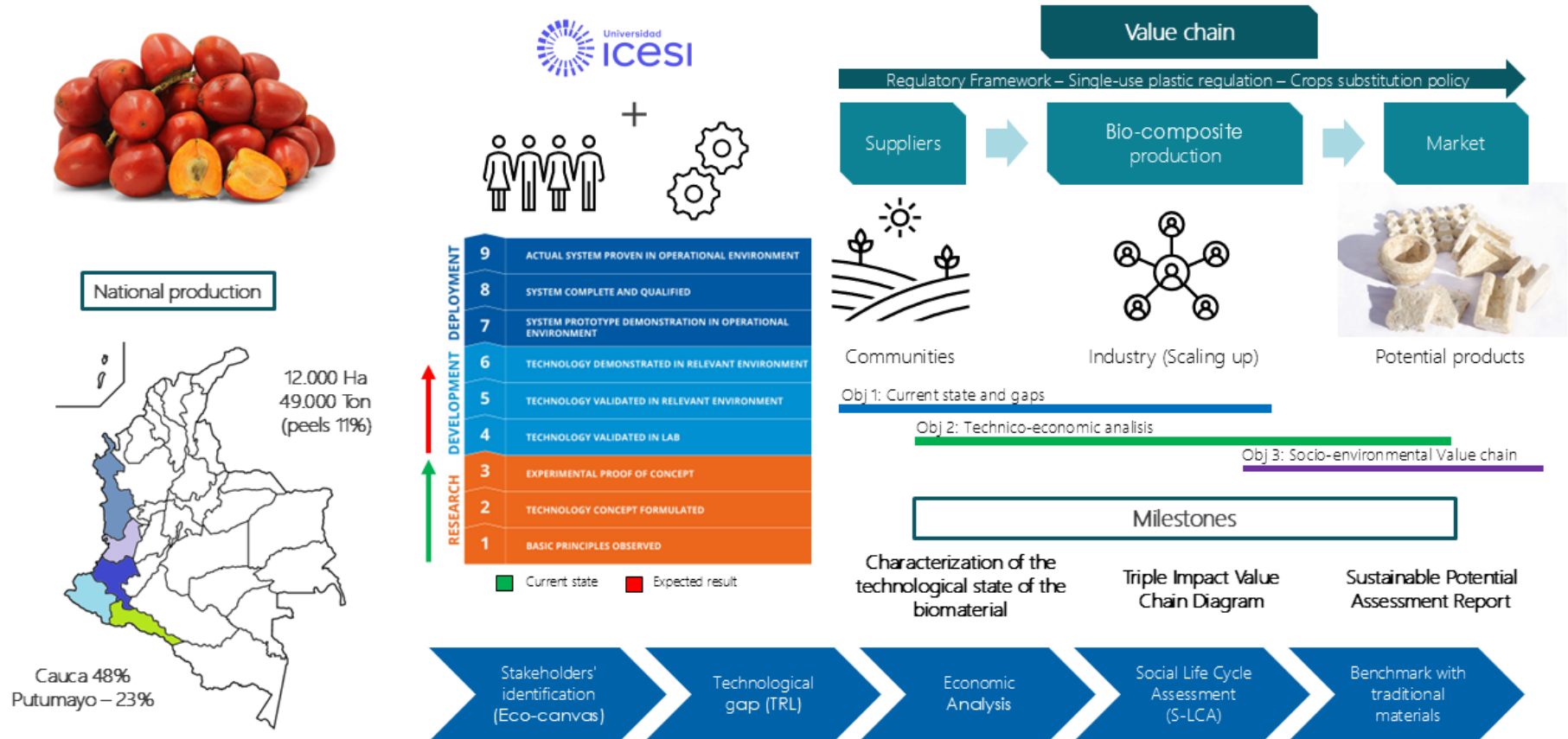
Abstract

This project evaluates the socioeconomic potential of integrating the biomaterial developed by Universidad Icesi—from chontaduro shells and sugarcane bagasse—into the chontaduro value chain, combining technological innovation with social impact. Its objectives include assessing the biomaterial's Technology Readiness Level, designing a techno-economic plan, and proposing socio-environmental development actions in producing regions such as Putumayo and Cauca—areas afflicted by illicit crop cultivation and multidimensional poverty—where chontaduro offers a legal alternative to strengthen rural economies, generate employment, and reduce structural vulnerabilities. Using life cycle assessment (LCA), social life cycle assessment (S-LCA), and circular business models, the project aims to demonstrate that this innovation not only mitigates environmental impacts (-57 % carbon footprint versus EPS) but also promotes inclusive and regenerative territorial development.

Key words: Biocomposite, TRL, bioeconomy, impacts, waste valorization, circular economy

Resumen Gráfico

Chontaduro peels as alternative to traditional polymers



Introducción

El panorama del desarrollo socioeconómico global enfrenta grandes retos derivados de los límites materiales del planeta tierra, el uso de recursos naturales y las expectativas de crecimiento económico no son compatibles con un sistema de desarrollo lineal, basado en extracción de recursos, producción en masa, consumo acelerado y generación de residuos (Levke Caesar et al., 2024). Investigaciones recientes, demuestran que muchos recursos se agotan a ritmos insostenibles, generando problemas ambientales y sociales, como la pérdida de biodiversidad y la desigualdad.(Barchielli et al., 2022) (Nadal Alejandro & Aguayo Francisco, 2020)(Gwiazdowska et al., 2024)

La incompatibilidad entre desarrollo socioeconómico y límites planetarios nos invita a repensar los paradigmas actuales. La sinergia entre la innovación tecnológica y la economía circular permite desarrollar materiales y procesos productivos alternativos, ayudando a las organizaciones a reducir su huella ambiental, optimizar recursos y generar valor en el ámbito socioeconómico como ecosistémico, respondiendo con mayor agilidad a los desafíos regulatorios y mejorando su competitividad en un mercado de modelos de negocios emergentes. (Sehnem et al., 2022)

Dado que el desafío actual es transformar un sistema lineal, el desarrollo de materiales basados en los principios de economía circular surge como una vía prometedora que para mitigar y restaurar los capitales naturales, intelectuales y sociales de las economías donde se implementen estas iniciativas.(Gomes et al., 2024; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio Industria y Turismo, 2019)

Uno de los materiales más utilizados y relevantes, que ha transformado las cadenas de suministro y ofrece más oportunidades de integrarse en modelos de economía circular es el plástico. (Melchor-Martínez et al., 2022) Utilizado en múltiples sectores económicos gracias a sus características, proviene casi exclusivamente del petróleo, cuya extracción y transformación generan impactos ambientales considerables. Ante esta situación, la transición desde los plásticos derivados del petróleo hacia los bioplásticos es crucial para abordar los desafíos ambientales y promover el desarrollo sostenible. Este cambio ofrece oportunidades económicas y beneficios ambientales, pero también presenta desafíos que deben gestionarse con cuidado. (Melchor-Martínez et al., 2022)

Contexto del problema

En un contexto donde los impactos de los plásticos tradicionales son una preocupación prioritaria, surgen iniciativas innovadoras que buscan transformar la forma en que se producen y consumen los materiales. La exploración de biomateriales alternativos se presenta como una solución necesaria frente a las consecuencias del uso intensivo de materiales convencionales. Este enfoque no solo reduce la contaminación y la dependencia del petróleo, sino que también abre oportunidades de negocio rentables que impulsan el desarrollo sostenible mediante el aprovechamiento de materias primas, residuos agroalimentarios y capitales tecnológicos.

En el centro de esta transformación, se ha investigado el uso de diversas fuentes orgánicas, como residuos agroalimentarios, hongos y microalgas, por su capacidad de generar biomateriales con propiedades fisicoquímicas similares a los plásticos convencionales. Estudios recientes muestran que subproductos de frutas y verduras pueden transformarse en materiales que, aunque en algunos casos son más costosos que sus equivalentes tradicionales, ofrecen las ventajas por ser bio basados. Con una adecuada gestión de su cadena de valor, estos sobrecostos pueden compensarse, como ocurre con la coproducción a partir de subproductos de la caña de azúcar, un modelo atractivo para diversas industrias.(Chalermthai et al., 2023; Thrän et al., 2024)

En el caso colombiano, el potencial es evidente dada su vocación y capacidad agrícola. Materiales alternativos se pueden desarrollar a partir de cultivos como el de chontaduro, que cuenta con cerca de 12.000 hectáreas sembradas y una producción estimada en 49.000 toneladas anuales. (Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2021) Este cultivo ya genera productos como harinas, cosméticos e incluso insumos para alta cocina. Sin embargo, dada la proporción entre pulpa. Se milla y cáscara, también produce cerca de 5.400 toneladas anuales de residuos, principalmente de la cáscara, aproximadamente el 11% de la producción, los cuales aún no tienen un aprovechamiento significativo, aunque existen acercamientos al desarrollo aceites, compuestos bioactivos y pigmentos orgánicos.

La distribución geográfica del chontaduro en Colombia favorece iniciativas sostenibles ya que la mayor capacidad productiva se encuentra en los departamentos del Cauca (48%) y Putumayo (23%) según cifras del Ministerio de agricultura. (*Evaluaciones Agropecuarias Municipales Chontaduro MinAgricultura*, 2016) Esto no solo impulsaría la economía local, sino que también tendría podría considerarse como una alternativa viable para la sustitución de cultivos

ilícitos, contribuyendo a un desarrollo rural más legítimo y sostenible. (Fundación Ellen MacArthur, 2015)

Este potencial está respaldado por el marco normativo desarrollado en Colombia, que incluye la Política de crecimiento verde (CONPES 3934) orientada a mejorar el desempeño ambiental de sectores productivos y fomentar innovaciones verdes (DNP, 2018), la Política nacional de desarrollo productivo (CONPES 3866) que impulsa la creación de productos con mayor valor agregado; (DNP, 2016) la ley 2232 de 2022 que prohíbe de manera progresivamente plásticos de un solo uso, promoviendo alternativas sostenibles como los biomateriales (Ley 2232 de 7 de Julio de 2022, 2022); y el Plan nacional de negocios verdes enfocado en modelos de negocio basados productos biodegradables y biomateriales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). Estas herramientas constituyen una base sólida para el desarrollo normativo de los productos bio-basados.

Un ejemplo destacable es la investigación de la Universidad Icesi, que desarrolló un material a partir de cáscaras de chontaduro. Mediante un proceso de biorrefinería, estos residuos se combinan con residuos de la producción azucarera para cultivar el micelio de los hongos *Ganoderma gibbosum*, *Ganoderma weberianum* y *Pleurotus ostreatus*. El resultado es un material con características similares al poliestireno expandido, capaz de reemplazar a los plásticos tradicionales en múltiples aplicaciones. (Enriquez-Medina et al., 2024)

El poliestireno expandido (EPS), conocido como “icopor” en Colombia, es fundamental en sectores como la construcción y el embalaje por su ligereza, aislamiento térmico y bajo costo. Entre 2022 y 2023 el mercado global de EPS superó los 10 mil millones de dólares, con una proyección de duplicar su valor para 2030 gracias a un crecimiento anual del 8%, especialmente en Asia, Norteamérica y Europa. (*Expanded Polystyrene Market Size, Share, Growth & Forecast*, n.d.) Latinoamérica representa cerca del 10% del consumo global, con ingresos de alrededor de mil millones de dólares y una tasa de crecimiento similar. (*Expanded Polystyrene Market Share Analysis Report, 2030*, n.d.)

En Colombia, aunque el mercado de EPS es más reducido, su relevancia estratégica es considerable. En 2023, la producción nacional se estimó entre 150 mil y 200 mil toneladas, con un valor de mercado de 300 a 4000 millones de dólares, equivalente al 15% de la producción plástica total del país (cerca de 1.5 millones de toneladas anuales). No obstante, avanzar hacia una

economía circular presenta retos importantes, los residuos de EPS están altamente dispersos, lo que encarece su recolección, y la falta de incentivos específicos limita su reciclaje. Además, la volatilidad en los precios de los insumos clave agrega incertidumbre a la industria.

Este panorama abre oportunidades para materiales alternativos, el desarrollo de un bio material a partir de residuos de chontaduro representa una opción viable para diversificar la oferta, reducir la dependencia de recursos fósiles y construir cadenas de valor más sostenibles. Su incorporación en el mercado colombiano podría no solo disminuir el impacto ambiental del EPS, sino también fortalecer capacidades tecnológicas y productivas a nivel nacional.

Para que esta cadena de valor funcione, la participación de diversos actores es fundamental. Los investigadores y desarrolladores de tecnología, en este caso la Universidad Icesi y la industria, juegan un papel clave al impulsar innovaciones que permitan mejorar la eficiencia y calidad de los biomateriales. Los inversionistas en I+D, empresas productoras o entidades que financien este tipo de proyectos, son esenciales para financiar el desarrollo y escalabilidad del modelo, mientras que los consumidores tienen el poder de acelerar la adopción de estos productos al generar demanda en el mercado.

El proceso de transformación en este modelo es complejo y abarca diferentes dimensiones. En primer lugar, los residuos se convierten en biomateriales funcionales, reduciendo la necesidad de extraer nuevas materias primas y evitando que los residuos terminen en rellenos sanitarios. Esta conversión ayuda a preservar el capital natural, mitigando su deterioro y favoreciendo su regeneración. Al mismo tiempo, el sistema genera oportunidades económicas al permitir la creación de nuevos modelos de negocio y mercados emergentes con cadenas de valor centradas en la sostenibilidad, en especial, las comunidades vulnerables económica y socialmente se pueden beneficiar al fortalecer a las economías rurales y diversificar los ingresos de los pequeños productores aumentando su resiliencia e independencia económica. (Dhillon & Moncur, 2023)

El elemento clave de este modelo, hacia donde van encaminados los esfuerzos del proyecto, es el nivel de madurez tecnológica, ya que la efectividad y competitividad de los biomateriales dependen de la capacidad de la ciencia y la ingeniería para desarrollar soluciones viables. La inversión en investigación y desarrollo no solo incrementa la calidad del producto, sino que también favorece la escalabilidad de la producción. (Petrescu et al., 2023)

La propuesta de valor de los biomateriales no solo radica en su capacidad para sustituir materiales convencionales, sino en su potencial para generar impactos positivos en la sociedad y en el medio ambiente.

Sin embargo, este sistema no está exento de desafíos. La disponibilidad de residuos adecuados para la producción de biomateriales puede ser una limitante, al igual que los costos asociados con su procesamiento y desarrollo tecnológico. Además, la aceptación del mercado dependerá de la capacidad de los biomateriales para competir en términos de precio y desempeño con alternativas tradicionales. (Rajvanshi et al., 2023)

Por otro lado, la regulación y normativas ambientales pueden ser tanto una barrera como un incentivo, dependiendo de cómo se adopten las políticas públicas que fomentan el uso de materiales sostenibles y cómo se gestionen los procesos de I+D de las empresas.

A pesar de estas limitaciones, este modelo presenta una oportunidad única para seguir redefiniendo la relación entre producción y sostenibilidad. Con una combinación adecuada de innovación, financiamiento y compromiso del mercado, es posible construir un sistema donde el capital natural, económico y social trabajen en armonía, permitiendo un desarrollo más equitativo y sostenible.

Teniendo en cuenta este contexto, surge la pregunta **¿De qué manera la integración del biomaterial puede mejorar la sostenibilidad de la cadena de valor del chontaduro?**

Objetivo del proyecto

Evaluar el potencial socioeconómico de la integración del biomaterial desarrollado por la Universidad ICESI, en la cadena de valor del chontaduro.

Objetivos Específicos

- Analizar el estado de madurez tecnológico actual del biomaterial desarrollado.

Resultado esperado: Caracterización de estado tecnológico del biomaterial.

- Diseñar un plan técnico-económico para el desarrollo de la cadena de valor.

Resultado esperado: Esquema de cadena de valor de triple impacto que incluya el biomaterial desarrollado – Ecocanvas.

- Proponer acciones para el desarrollo socioambiental de la cadena de valor.

Resultado esperado: Reporte de evaluación y recomendaciones sostenibles.

Metodología

El proyecto se desarrolló con el propósito de comparar, desde las perspectivas, social y técnico-económica, un bio-compuesto desarrollado por la Universidad Icesi frente al plástico con características fisicoquímicas similares. Esta investigación cuantitativa descriptiva se centra en comprender las características de la cadena de valor del chontaduro y cómo el material desarrollado puede impactar en esta cadena, teniendo en cuenta sus actores de mayor impacto, el proceso tecnológico, los costos asociados y los impactos sociales. A partir de la información disponible se realizó un análisis comparativo que permitió identificar las sinergias, trade-off y desafíos del bio-compuesto frente a las cadenas de valor de materiales tradicionales.

La investigación se desarrolló en tres fases, cada una orientada al cumplimiento de los objetivos específicos propuestos

Análisis del estado de madurez tecnológica del biomaterial

Esta fase se enfocó en caracterizar el proceso de biorrefinería y de producción del bio-compuesto y determinar su nivel de desarrollo frente a la escala TRL establecida por la NASA. (Ministerio de ciencia, 2021) Para esto se hizo una revisión documental de los avances realizados por la Universidad Icesi, publicaciones y antecedentes referentes a su desempeño fisicoquímico y mecánico, esta información se analizó a través de una matriz de validación que relaciona el nivel de desarrollo y los elementos clave que soportan su desarrollo. Adicionalmente se identificaron elementos necesarios para avanzar a etapas superiores de madurez tecnológica, tales como pruebas piloto, validaciones industriales, certificaciones técnicas y procesos de escalamiento.

Se consideraron 9 niveles que se extienden desde los principios básicos de la nueva tecnología hasta llegar a sus pruebas con éxito en un entorno real:

Tabla 1 - Niveles de madurez tecnológico definidos por la NASA

TRL	Etapas	Productos
1	Observación de principios básicos	Artículos de investigación.
2	Formulación del concepto	
3	Prueba experimental del concepto	Productos tecnológicos patentados o en proceso de solicitud de patente
4	Validación del desarrollo en entorno laboratorio	
5	Validación del desarrollo en entorno pertinente	

6	Demostración del desarrollo en entorno pertinente	Productos tecnológicos certificados o validados: diseños industriales, esquemas de circuitos integrados, software, plantas piloto, prototipos industriales y signos distintivos.
7	Demostración del desarrollo en el entorno real	
8	Desarrollo completo y certificado	Productos empresariales, innovaciones generadas en la gestión empresarial e innovaciones en procesos y servicios.
9	Despliegue del desarrollo	

Adaptado de (Ministerio de ciencia, 2021)

Diseño del plan técnico-económico para el desarrollo de la cadena de valor

Esta fase se orientó a diseñar un plan que permita establecer una cadena de valor robusta, sostenible y económicamente viable para el bio-compuesto. Para ello, se consideraron los siguientes aspectos relevantes: la identificación de actores claves para la cadena de valor, desde productores de chontaduro, fabricantes de productos derivados, comercializadores, entes regulatorios y centros de desarrollo tecnológico, este análisis permitió comprender las capacidades, necesidades y oportunidades de cada actor de la cadena.

Se evaluó la disponibilidad y costos asociados a los cultivos de chontaduro, así como su impacto en la logística de abastecimiento, considerando la articulación con comunidades productoras locales y el aprovechamiento de residuos agroindustriales como un factor clave de sostenibilidad, incluyendo costos directos (materias primas, mano de obra, energía) e indirectos (logística, almacenamiento).

Por último, en esta fase se realizó una comparación económica y ambiental con materiales de referencia como el poliestireno expandido, evaluando condiciones de competitividad y desempeño ambiental mediante LCA. Los resultados de esta fase se condensaron y presentaron mediante un eco-canvas, herramienta que permite identificar y comunicar la propuesta de valor sostenible para la cadena de valor.

Propuesta de acciones para el desarrollo socioambiental de la cadena de valor

En esta última fase se integró la dimensión social y ambiental del proyecto mediante un Análisis del Ciclo de Vida Social (S-LCA) alineado con las directrices de UNEP/SETAC y la información oficial disponible, con el fin de comprender los posibles impactos del bio-compuesto en los territorios donde se implementaría su producción. Se enfocó en conocer el componente social y ambiental de la cadena de valor del bio-compuesto analizando los impactos en las

comunidades vinculadas al cultivo y procesamiento del chontaduro, considerando los indicadores definidos a partir de una revisión sistemática de literatura.

Para esta revisión se tuvieron en cuenta artículos de investigación relacionados con proyectos de materiales y energía sostenibles, publicados entre los años 2019 y 2025, extraídos de las bases de datos de Science Direct y Scopus. A partir de esta revisión y de la categorización establecida en el estándar de S-LCA, se agruparon y seleccionan los indicadores más relevantes para el estudio del potencial de la valorización de las cáscaras en la cadena de valor del chontaduro enmarcados en el contexto característico de las poblaciones con potencial productor de chontaduro. El proceso de selección de indicadores se muestra en el Gráfico 1 y los seleccionados se muestran en la Tabla 2

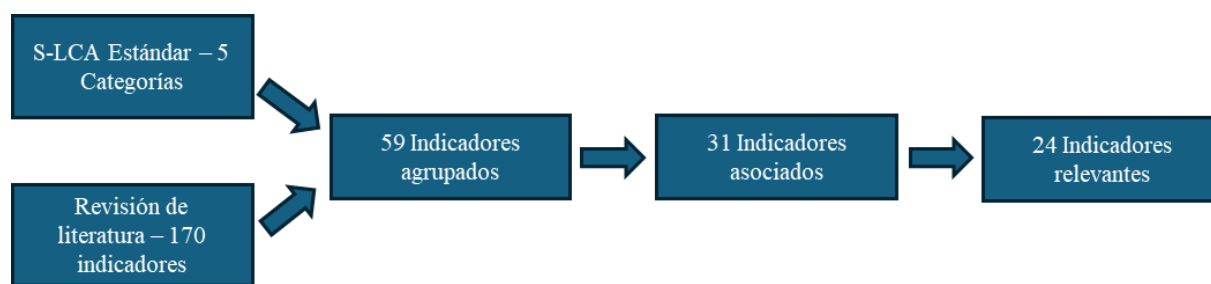


Gráfico 1 - Proceso de selección de indicadores - Estándar S-LCA - Revisión de literatura

Tabla 2 - Indicadores socioeconómicos definidos a partir del estándar UNEP/ SETAC y revisión de literatura

Categoría	Indicador	Métrica
Comunidad local	Acceso a servicios básicos (agua)	% de hogares sin acceso a fuente de agua mejorada
	Cohesión comunitaria y asociaciones	Número de organizaciones locales activas
	Tenencia y uso de la tierra	% de comunidad con propiedad sobre los predios
	Creación de empleo	Número de familias con ingresos de la actividad
	Desempleo	% de personas con desempleo de larga duración
	Empleo local / oportunidades económicas	número de nuevos emprendimientos asociados
	Huella ecológica	kg CO ₂ eq/producción
	Índices agregados (IPM)	Valores de este índice en la zona de influencia
	Ingreso familiar / promedio	COP / ha cultivada
	Inversión comunitaria	COP/año invertido en proyectos sociales
	Participación de pequeños productores	% de actores pequeños en la cadena
	PIB per cápita	COP/persona/año
Otros actores	Gasto en I+D	% del ingreso o presupuesto destinado a innovación
Sociedad	Control de la corrupción	Índice de percepción Transparency International
	Estabilidad política	Índice de gobernabilidad o estabilidad institucional
	Índice de buen país	Ranking del país en contribuciones al bien común
	Índice de Desarrollo Humano de la ONU	Valor de 0 a 1

Trabajadores	Índice de Paz Global	Valor del índice por país
	Seguridad alimentaria / precio de canasta	% del ingreso familiar destinado a la canasta básica
	Tasa de reciclaje	% de residuos reciclados
	Condiciones de trabajo	% de contratos informales
	Labor infantil	% de trabajadores menores de la edad mínima legal
	Proporción de mujeres en la fuerza laboral	% de mujeres empleadas sobre total de empleados
	Salario vs. salario mínimo / equidad salarial	% (entre salario promedio y salario mínimo legal)

(Fuente: elaboración propia)

Este enfoque permitió identificar tanto los beneficios potenciales de integración del bio-compuesto en la cadena de valor del chontaduro, como los posibles riesgos sociales asociados a la implementación del proceso. De esta forma, se propusieron acciones para la distribución equitativa de beneficios, fortalecimiento organizativo y participación comunitaria considerando estas como herramientas clave para mitigar conflictos y promover la cohesión social alrededor del cultivo. Adicionalmente, se valoró la contribución del bio-compuesto a los principios de economía circular y bioeconomía, destacando su capacidad para cerrar ciclos productivos, reducir residuos y generar valor en territorios tradicionalmente vinculados a cadenas de bajo valor agregado.

Resultados y Discusión

1. Análisis del estado de madurez tecnológica del biomaterial

1.1 Caracterización del estado actual de desarrollo del biomaterial

A partir de la revisión documental de los avances realizados en materia de bio-compuestos y del material desarrollado por la Universidad Icesi, se analizó el estado de madurez tecnológica actual con una matriz que considera las características de los productos representativos que se debe tener para cada nivel y que análisis se han realizado para lograrlos.

Tabla 3 - Características de los productos y referencias asociadas a cada nivel de madurez tecnológica que inciden actualmente en el biomaterial desarrollado

Etapa	Requerimiento	Estado	Productos representativos	Desarrollo	Análisis realizados	Referencia
1 - Observación de principios básicos	Principios cualitativamente postulados y observados	Completado	Artículos de investigación.	Fungal mycelium-bioproducts development: A new material culture and its impact on the transition to a sustainable economy	Análisis de la interacción micelio-sustrato mediante técnicas como SEM y FTIR.	(Feijóo-Vivas et al., 2021)
	Investigación básica inicial se ha completado. transición hacia la investigación aplicada.	Completado			Estudio de la composición química de la pared celular del micelio y su relación con propiedades mecánicas e hidrofobicidad.	(Feijóo-Vivas et al., 2021)
2 - Formulación del concepto	Aplicaciones especulativas y puede no haber análisis detallados que confirmen suposiciones	Completado			Diseño de biomateriales como espumas y compuestos tipo sándwich para empaquetado y aislamiento térmico/acústico	(Feijóo-Vivas et al., 2021)
	Estudios y pequeños experimentos proporcionan una “prueba de concepto”	Completado			Optimización de condiciones de cultivo (humedad: 55–75%, temperatura: 24–28°C) para maximizar la colonización.	(Feijóo-Vivas et al., 2021)
	Se formulan posibles usos de la tecnología	Completado		Biopolymers: Progress and prospects	Análisis de las propiedades químicas y mecánicas, basándose en literatura previa y modelos teóricos, sin presentar nuevos datos experimentales.	(Fernando Valero-Valdivieso et al., 2013)
3 - Prueba experimental del concepto	Estudios analíticos y estudios a escala laboratorio	Completado	Productos tecnológicos patentados o en proceso de solicitud de patente	Bridging gap between agro-industrial waste, biodiversity and mycelium-based biocomposites: Understanding their properties by multiscale methodology	Se caracterizó la degradación de polímeros lignocelulósicos (glucano, arabinoxilano, lignina) durante la fermentación en estado sólido SSF	(Enriquez-Medina et al., 2024)

	Los componentes de la tecnología son validados, pero no hay integración en un sistema completo.	Completado		From purposeless residues to biocomposites: A hyphae made connection	Validación en ambiente de laboratorio: Crecimiento de micelios en residuos agrícola, se realizó el análisis morfológico y químico.	(Enriquez-Medina et al., 2023)
	El concepto y los procesos han sido demostrados a escala de laboratorio.	Completado		Bridging gap between agro-industrial waste, biodiversity and mycelium-based biocomposites: Understanding their properties by multiscale methodology	Análisis químico HPLC y pruebas físicas de absorción de agua, densidad, y mecánicas.	(Enriquez-Medina et al., 2024)
					Demostración de producción del biocompuesto a base de micelio a partir de residuos agroindustriales (cascara de chontaduro y bagazo de caña) y la cepa nativa Ganoderma gibbosum	(Enriquez-Medina et al., 2024)
	Inicio del posible producto y/o mercado con stakeholders relevantes.	En proceso		Análisis socioeconómico de la utilización de cáscaras de chontaduro como alternativa al plástico		
4 - Validación del desarrollo en entorno laboratorio	Validación de componentes o el sistema en un ambiente de laboratorio	Completado		From purposeless residues to biocomposites: A hyphae made connection	Validación de integración de cepas, sustratos y post tratamiento	(Enriquez-Medina et al., 2023)
	Este nivel es el primero para determinar si los componentes individuales trabajarán juntos como un sistema	Completado			Se realizaron balances de masa y se estimó la escalabilidad a partir de 50kg con la que se podría producir 1840 vasos de un solo uso.	(Enriquez-Medina et al., 2023)
	Una unidad de desarrollo de prototipo ha sido construida en el laboratorio y en un entorno controlado.	Completado		Bridging gap between agro-industrial waste, biodiversity and mycelium-based biocomposites: Understanding their properties by multiscale methodology	Se evaluaron propiedades mecánicas módulo de Young 3,83 resistencia a la flexión 0,12 MPa densidad 104,98 kg/m3 absorción de agua 54,79%	(Enriquez-Medina et al., 2024)
					Se produjo el biocompuesto en moldes de acuerdo con las normas ASTM D570 D790 y C303-02	(Enriquez-Medina et al., 2024)
	Se han desarrollado evaluaciones del ciclo de vida preliminares y modelos de evaluación económica y social.	En proceso			Análisis socioeconómico de la utilización de cáscaras de chontaduro como alternativa al plástico	
5 - Validación del desarrollo en entorno pertinente	Su operatividad es aún a nivel laboratorio. Se dan pruebas a escala en laboratorio en un sistema operativo condicionado	Completado	Productos tecnológicos certificados o validados: diseños industriales, esquemas de circuitos integrados, software, plantas piloto, prototipos industriales y signos distintivos.	Bridging gap between agro-industrial waste, biodiversity and mycelium-based biocomposites: Understanding their properties by multiscale methodology	Se compararon las propiedades del biocompuesto con materiales comerciales (espumas poliméricas)	(Enriquez-Medina et al., 2024)
	La tecnología se ha validado a través de pruebas en el entorno previsto simulada o real.	No iniciado			(Ver acciones sugeridas)	

	Se han identificado aspectos de salud y seguridad, limitaciones ambientales, regulatorios y de disponibilidad de recursos	En proceso		Análisis socioeconómico de la utilización de cáscaras de chontaduro como alternativa al plástico		
6 - Demostración del desarrollo en entorno pertinente	Prototipo piloto con diseño detallado y con condiciones de escalamiento	No iniciado		Effects of field conditions on the degradation of cellulose-based and PLA nonwoven mulches	Se realizaron ensayos con geomallas de celulosa pura y de PLA, haciendo seguimiento de sus características y la morfología de sus fibras	(Marasović et al., 2025)
	Los componentes y los procesos se han ampliado para demostrar el potencial industrial	No iniciado		Production of biomaterials and biochemicals from lignocellulosic biomass through sustainable approaches and future perspectives	Se revisó cómo componentes tradicionales de la biomasa y nuevos procesos se han integrado para demostrar su potencial industrial, considerando acciones para el escalado.	(Ingle et al., 2025)
	Se ha identificado y modelado el sistema a escala comercial completa.	No iniciado		Techno-Economic Analysis on an Industrial-Scale Production System of PHA from Cheese By-Products by Halophiles	Fue desarrollado un modelo tecno-económico de un sistema industrial de producción de un tipo de poliéster biodegradable, usando flujos de subproductos lácteos como materia prima	(Amabile et al., 2024)
7 - Demostración del desarrollo en el entorno real	Prototipo completo funcional demostrado en ambiente real.	No iniciado				
	Evaluación económica y de ciclo de vida perfeccionadas.	No iniciado		Techno-Economic and Life Cycle Assessment of a Small-Scale Integrated Biorefinery for Butyric-Acid Production in Chile	Se evaluaron dos escenarios de biorrefinería que utilizan paja de trigo y purines de cerdo como materias primas, encontrando que la integración de biogás reduce la mayoría de los impactos.	(Suazo et al., 2024)
8 - Desarrollo completo y certificado	La tecnología ha sido probada en su forma final y bajo condiciones supuestas.	No iniciado	Productos empresariales: secretos empresariales, empresas de base tecnológica (spin-off o start-up), empresas creativas y culturales, innovaciones generadas en la gestión empresarial e innovaciones en procesos y servicios.		(Ver acciones sugeridas)	
	Se ha demostrado que la tecnología funciona a nivel comercial.	No iniciado			(Ver acciones sugeridas)	
	Las soluciones propuestas, así como un plan para adaptación han sido terminados y validados.	No iniciado			(Ver acciones sugeridas)	
9 - Despliegue del desarrollo	La tecnología se encuentra en su forma final y operable.	No iniciado			(Ver acciones sugeridas)	
	Entrega de producto o tecnología para producción en serie y comercialización.	No iniciado			(Ver acciones sugeridas)	
	Transferencia y apropiación de resultados en comunidades objetivo.	No iniciado			(Ver acciones sugeridas)	

Según el análisis de estado tecnológico presentado, el biomaterial desarrollado por la Universidad Icesi se encuentra en un nivel TRL 4, este nivel indica que el material ha superado la demostración en un entorno de laboratorio, donde se han validado sus propiedades fisicoquímicas mediante estudios experimentales, sin embargo, aún requiere validación en entornos pertinentes.

1.2 Acciones sugeridas para el desarrollo tecnológico del material

A partir del nivel de desarrollo actual (TRL 4) no se cuenta con insumos para cumplir los requisitos de las etapas siguientes. De acuerdo con esto y basándose en trabajos previos, se proponen a continuación acciones específicas orientadas a alcanzar los objetivos requeridos en cada nivel. (Petrescu et al., 2023)

Tabla 4- Acciones sugeridas para incrementar el TRL del material desarrollado.

Etapas	Acciones clave	Actores	Recursos necesarios	Resultado	Duración estimada
5 - Validar sistema en entorno relevante	Escalar producción (5-10 kg/lote)	Universidad, Centros de I+D, Ingenieros de materiales y bioprocesos	Planta piloto, Equipos de prueba, Equipos de medición	Informe técnico, Prototipos funcionales, Análisis TEA y LCA preliminar	6-9 meses
	Desarrollar moldes y prototipos				
	Pruebas mecánicas, térmicas y de biodegradabilidad				
	Iniciar pilotos incubadores				
6 - Demostrar rendimiento en entorno relevante	Pilotos con clientes	Empresas aliadas, Laboratorios externos	Financiamiento inicial, Infraestructura semiindustrial	Resultados de pilotos, SOPs, Versión beta del producto	6-9 meses
	Pruebas ISO/ASTM de empaque				
	Desarrollo de SOPs				
	Refinamiento de modelo de negocio				
7 - Validar tecnología en entorno real	Pruebas de uso prolongado	Clientes industriales, Proveedores, Entidades gubernamentales	Planta piloto operativa, Estudios de mercado	Informe de desempeño comercial, Comparativa con EPS/cartón	9-12 meses
	Optimizar cadena de suministro				
	Estudios de percepción y aceptación				
	Ensayos comparativos con materiales actuales				
8 - Certificar sistema y viabilidad industrial	Certificación del producto	Entidades certificadoras	Capital para industrialización, Planta escalada, Herramientas de certificación	Certificaciones, Dossier técnico-comercial, Informe S-	9-12 meses
	Escalado industrial				

	Implementación de S-LCA y LCA completos			LCA y LCA completo	
9 - Comercializar y operar en el mercado	Lanzamiento comercial	Clientes finales, Distribuidores, Socios financieros y comerciales	Red de distribución, Sistema de calidad y ventas	Producto en el mercado, Primeras ventas, Informe post-S-LCA	6-9 meses
	Establecer canales de distribución				
	Mejora continua post-lanzamiento				
	Evaluación de impacto real				

2. Diseño del plan técnico-económico para el desarrollo de la cadena de valor

De acuerdo con la experiencia y conocimiento de directivos de las empresas Borojó de Colombia y Frudelpa, la cadena de valor del chontaduro en Colombia se caracteriza por una producción fragmentada, con pequeños agricultores que cultivan en áreas de menos de 2 hectáreas y enfrentan limitaciones de acceso a tecnología, financiamiento y asistencia técnica. Su comercialización se realiza principalmente de forma informal y de bajo valor agregado, adicionalmente la escasa capacidad tecnológica desarrollada por pymes, se ha direccionado a la producción de harinas y alimentos concentrados. El estado actual de la cadena presenta múltiples oportunidades de mejora, entre las cuales la valorización de la cáscara de chontaduro se presenta como una alternativa importante. En el Gráfico 1 se muestran los factores de abastecimiento, producción y mercado relevantes para la cadena de valor.

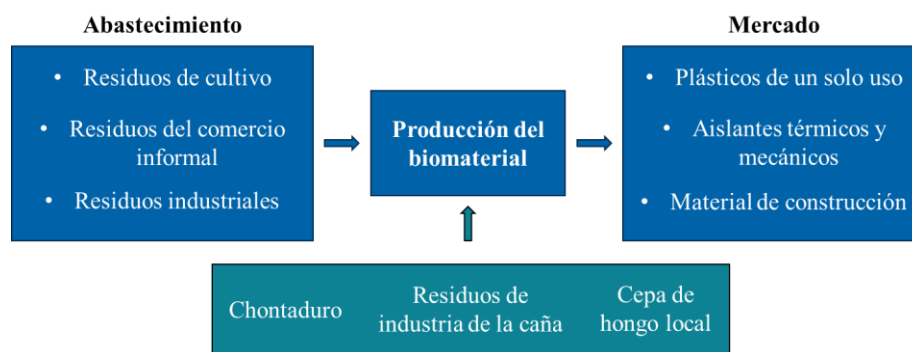


Gráfico 2 - Factores principales del esquema de producción del biomaterial a partir de cáscaras de chontaduro

2.1 Identificación de actores clave

Con el fin de identificar cómo se relaciona cada actor de la cadena de valor a través de sus fortalezas y debilidades, detectar áreas críticas que requieran atención y maximizar la generación de valor compartido, se realizó un análisis de los seis capitales, priorizando aquellos más relevantes para los actores con mayor interés e influencia en el proyecto.

Universidad Icesi

Capital intelectual: El proyecto tiene el conocimiento y experiencia a nivel de laboratorio y pruebas de concepto, publicaciones en 2023 y 2024, y trabajos de grado asociados.

Capital financiero: Desarrollado con presupuesto asignado por la facultad de ingeniería, sin embargo, es necesario financiar pruebas fisicoquímicas (resistencia mecánica y biodegradabilidad)

Industria

Capital de manufactura: Instalaciones y capacidad de escalar los procesos

Capital intelectual: Capacidad de estructurar procesos y responder ante normativas y regulaciones referentes a estándares de calidad y de producto.

Comunidad productora

Capital humano: Conocimiento de agricultura tradicional y su relación con la naturaleza, estructuran habilidades para el desarrollo de los cultivos, puede generar motivación dadas las condiciones socioeconómicas (cultivos alternativos)

Capital natural: Generación de impactos positivos al fomentar cultivos autóctonos, aprovechamiento de residuos y preservación de biodiversidad.

Capital financiero: La accesibilidad a fuentes de financiación está condicionada por la propiedad de las tierras.

2.2 Análisis de costos

Con base en el documento Marco de referencia agroeconómico para la producción de chontaduro rojo y amarillo en Villagarzón, Putumayo (Finagro, 2020), y los trabajos de investigación realizados en la Universidad Icesi (Enriquez-Medina et al., 2023, 2024) , se

construyó el siguiente esquema de costos para una cadena valor con el aprovechamiento de la cáscara de chontaduro, considerando que representa el 11% del peso total de la cosecha, a continuación, se presenta un esquema simplificado con las principales etapas y los costes asociados.



Gráfico 3 - Fases de la cadena de valor para el biomaterial desarrollado

Abastecimiento de materia prima

El cultivo de chontaduro en Putumayo atraviesa un periodo improductivo de 2 años a partir de su siembra, durante el tercer año comienza su etapa productiva y alcanza su producción máxima estable desde el año 5 hasta el año 12, para luego desacelerar levemente durante los años 13 y 15. Por cada hectárea se obtienen en promedio 5.860 kilogramos de fruto por año, distribuidos de la siguiente forma de acuerdo con la calidad del fruto:

Tabla 5- Distribución de calidad y precios de venta del chontaduro y cáscara

Calidad	Proporción del cultivo (%)	Precio (COP/kg)	Cantidad fruto (kg/ha-año)	Precio cáscara (COP/kg)	Cantidad cáscara (kg/ha-año)	Precio total cáscara (COP/ha)
Primera	30	2.333	1.770	257	194,7	50.038
Segunda	50	1.200	2.950	132	324,5	42.834
Tercera	20	350	1.180	39	139,8	5.452

Fuente: Adaptado de (Finagro, 2020)

A partir de estudio realizado por Finagro y considerando que, del fruto total, la cáscara representa aproximadamente 11% en peso, se generan 645 kg de cáscara por hectárea, con un costo aproximado de COP 98.324 / hectárea - año de fruto cosechado (sin considerar la calidad del fruto). Es decir, habría un costo promedio aproximado COP 152 / kg de cáscara. (Finagro, 2020)

Actores relevantes en esta etapa: Productores de chontaduro e intermediarios locales.

Transformación

A partir del proceso de transformación descrito en *From purposeless residues to biocomposites: A hyphae made connection* y resumido en el balance de materia ilustrado (Ver

gráfico 1) Podemos identificar los aspectos más representativos del proceso de transformación, y sus costos estimados.

Tabla 6 - Costo de transformación de la cáscara de chontaduro en el biomaterial desarrollado

Concepto	Etapas	Cantidad	Estimación (COP)
Materias primas	Cáscara de chontaduro	0.54 kg	82,08
	Bagazo de caña	0.54 kg	0
Energía	Secado inicial	0.25 kWh	234,5
	Incubación (SSF)	0.56 kWh	525,28
	Secado inicial	0.25 kWh	234,5
	Termoprensado	0.03 kWh	2,63
Otros costos operativos	Inóculo micelial	-	500
	Molienda y tamizado	-	300
	Suplementos (CaCO ₃)	0.024 kg	54
	Mano de obra	-	3.379
Costos indirectos	-	10% del total	532
Costo total			5.845

(Fuente: elaboración propia)

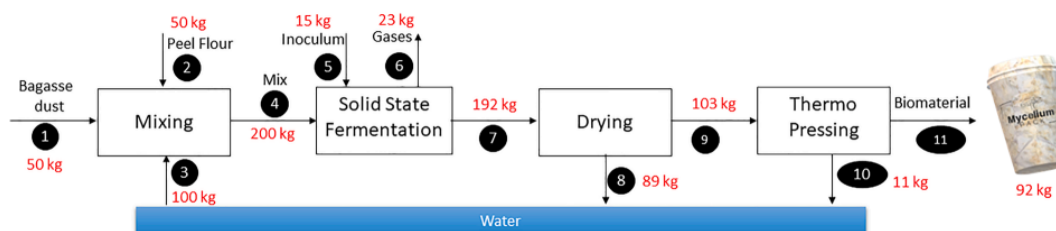


Gráfico 4 - Balance de materia del proceso desarrollado para la fabricación del biomaterial derivado de cáscaras de chontaduro (Enriquez-Medina et al., 2023)

Actores relevantes en esta etapa: Productores de chontaduro, industria y centros de desarrollo.

Distribución

Los costos de distribución de biomateriales es un aspecto crucial para garantizar su adopción efectiva a gran escala. De acuerdo con estudios revisados (Petrescu et al., 2023; Suazo et al., 2024), factores como el TRL, la percepción y aceptación del mercado, la infraestructura disponible y la posibilidad de integrar subproductos en cadenas productivas locales inciden directamente en los costos de distribución, donde estos pueden representar entre un 10% y 30% del costo total del biomaterial. De igual manera, desde el enfoque de la bioeconomía promovido

por organismos como la FAO (FAO, n.d.), es fundamental que esos sistemas logísticos respeten los principios de eficiencia en el uso de recursos, equidad económica y resiliencia territorial.

Tabla 7 - Costo de distribución estimado del biomaterial desarrollado

Concepto	Costo estimado (COP/kg)
Transporte	800
Almacenamiento	200
Costo de distribución	1.000
Costo total con distribución	6.845

(Fuente: elaboración propia)

Actores relevantes en esta etapa: Industria e intermediarios locales.

Costo total final estimado del biomaterial puesto en mercado: \$6.845 COP/kg

Disposición final

Este biomaterial representa una alternativa sostenible al poliestireno expandido como se verá más adelante, sin embargo, su disposición final debe alinearse con principios de economía circular, priorizando su reutilización directa, el compostaje industrial y domiciliario, la digestión anaerobia y el uso agrícola como compost, aprovechando su potencial para integrarse en flujos de residuos orgánicos. A continuación, se detalla la jerarquía de disposición final propuesta.

Tabla 8 - Jerarquía de disposición final propuesta para el biomaterial desarrollado

Nivel	Estrategia	Descripción	Requisitos
1	Reutilización directa	Reutilizar el biomaterial en su misma función (empaques y embalajes)	• Producto diseñado para ser reutilizado • Incentivos para devolución.
2	Compostaje industrial y domiciliario	Procesamiento aeróbico del material con residuos orgánicos	• Certificación de compostabilidad • Infraestructura local
3	Digestión anaerobia	Integración del biomaterial en biodigestores	• Coordinación con biodigestores existentes
4	Recuperación de nutrientes	Aplicación como biofertilizante en suelos	• Análisis de composición • Autorización ambiental
5	Relleno sanitario	Última opción	• Reducción máxima del volumen in situ

(Fuente: elaboración propia)

Actores relevantes en esta etapa: Industria y consumidores finales.

2.3 Análisis comparativo

Como parte del desarrollo de una cadena de valor, es importante considerar diversos aspectos que pueden condicionar o potenciar su evolución. A continuación, se muestra el análisis comparativo de estos aspectos realizado.

Tabla 9 - Análisis comparativo de los aspectos clave para el desarrollo de la cadena de valor del biomaterial desarrollado

Aspecto clave	EPS	Biomaterial
Costos de producción y transporte	Procesos y cadenas bien establecidas, se soporta en economías de escala	Sus procesos de transformación aún no tienen la madurez y eficiencias necesarias
Infraestructura	Infraestructura industrial bien establecida, redes de distribución comercial y canales de uso	El desarrollo industrial aún no se adopta a gran escala
Madurez del mercado	Es maduro y creciente, con productos estandarizados ampliamente aceptados	Mercado de biomateriales está creciendo y se tienen soluciones prometedoras en fase experimental
Regulaciones y políticas públicas	La reglamentación de la Responsabilidad Extendida de Productor y prohibición de plásticos de un solo uso añade presión para adoptar medidas de economía circular.	Existen diversas normativas cuyo objetivo principal es reducir la contaminación ambiental y promover la sostenibilidad.
Impacto ambiental	Es derivado del petróleo y no es biodegradable, su acumulación genera diversos problemas de contaminación. Su baja densidad dificulta la creación de cadenas de reciclaje efectivas	De origen agrícola son renovables y biodegradables, la cadena de suministro de los biomateriales se puede construir aprovechando las capacidades locales

(Fuente: elaboración propia)

Esta comparación revela oportunidades y retos claros. El EPS es un material económico, con infraestructura tecnológica establecida; sin embargo, presenta presiones legales y ambientales crecientes. Por otra parte, los biomateriales ofrecen una alternativa sostenible, convirtiendo residuos no aprovechados en materiales útiles, que se alinean con la tendencia de modelos económicos y normativos circulares. Sin embargo, hoy son más caros y menos escalables, dado que requieren inversiones en esquemas de recolección y procesamiento. Dado el contexto ambiental y normativo, los retos radican en disminuir costos y escalar procesos, superando su

punto de equilibrio. De esta forma, los biomateriales podrían capturar segmentos de mercado dominados por el EPS, transformando y valorizando las cadenas de valor asociadas.

Análisis de ciclo de vida e impactos ambientales

Con el fin de identificar los beneficios y desafíos ambientales asociados al biomaterial desarrollado, se recurrió al Análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés), una herramienta metodológica estandarizada que permite evaluar de manera integral los impactos ambientales a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de un material. Esta metodología complementa los análisis económicos al visibilizar externalidades ambientales que podrían traducirse en costos ocultos o contingentes, aportando así insumos relevantes para una toma de decisiones fundamentada en criterios de sostenibilidad.

En estudios previos, se ha comparado mediante LCA el desempeño ambiental de insertos de EPS para embalaje y un biocompuesto de micelio, el análisis se fundamentó en un enfoque “gate-to-crave” siguiendo el estándar ISO 14040 utilizando SimaPro 9.4, con el objetivo de informar sobre decisiones de diseño y selección de materiales para embalajes.

Las fases definidas para la comparación fueron: Producción de materias primas, fabricación del producto, transporte y distribución, uso y fin de vida; asumiendo que ambos materiales cumplen la misma función (protección mecánica y aislamiento térmico). (En este análisis se excluye la construcción de infraestructura tecnológica).

Tabla 10- Indicadores y resultados del LCA comparativo entre EPS y un biomaterial derivado de residuos agrícolas y micelio, categorías de impacto críticas en el estudio referenciado.

Metodología	Indicador	EPS	Biomaterial	Diferencia
CED (Cumulative Energy Demand)	MJ totales por unidad	85.12	38.16	-55.2%
IPCC GWP100 (Global Warming Potential)	Kg CO ₂ -eq / unidad	1.15	0.49	-57.2%
ReCiPe 2016 (Midpoint)	Agotamiento de ozono kg CFC-11-eq	1.16x10 ⁻⁷	1.37x10 ⁻⁷	+18.4%
	Eutrofización marina kg N-eq	5.62x10 ⁻⁴	5.8x10 ⁻⁴	+3.2%
	Uso de suelo m ² de superficie afectada	0.0186	0.0188	+1.2%
ReCiPe 2016 (Endpoint H)	Puntaje único agregado mPt	11.12	5.43	-51.2%

(Enarevba & Haapala, 2023)

Este LCA demuestra que bajo condiciones óptimas el biomaterial de micelio estudiado es ambientalmente superior al EPS en términos de huella de carbono y demanda energética, no obstante, es imprescindible controlar los impactos relacionados con eutrofización marina (mediante el manejo adecuado de nutrientes y compostaje), además minimizar aporte al agotamiento de ozono mejorando los procesos de esterilización e incubación.

Estos hallazgos respaldan la posibilidad de incorporar el biomaterial de cáscara de chontaduro en la cadena de valor como alternativa ambientalmente responsable al poliestireno expandido siempre y cuando se adopten las recomendaciones orientadas a mitigar las categorías de impacto críticas.

Costos de producción

A partir del análisis técnico-económico y ambiental realizado, se identificó que el costo el biomaterial puede ser ligeramente superior o igual al del poliestireno expandido, esto debido a la baja escala de producción y la falta de economías industrial. Sin embargo, el biomaterial aprovecha residuos agroindustriales con bajo costo y tiene un perfil ambiental mucho más favorable, al reducir más del 55% de su huella de carbono y demanda energética respecto al EPS.

Tabla 11 - Comparativa de costos de producción entre EPS y el biomaterial desarrollado

Concepto	EPS (COP/kg)	Biomaterial (COP/kg)
Materia prima	5.100	82,08
Energía	425	997
Otros insumos	213	854
Mano de obra	213	3.379
Costos indirectos	425	532
Subtotal	6.375	5.845
Distribución	638	1.000
Costo total	7.000	6.845

(*Expanded Polystyrene Market Share Analysis Report, 2030, n.d.*)

En este contexto, aunque los costos actuales son similares, el biomaterial presenta ventajas estrategias en sostenibilidad, regeneración de economías rurales y cumplimiento de nuevas regulaciones ambientales. A medida que el biomaterial avance hacia niveles tecnológicos superiores, se podría esperar una reducción significativa de costos, haciéndolo más competitivo frente al EPS.

Con los resultados de este análisis, se construyó un Eco-canvas como herramienta visual para estructurar un negocio sostenible alrededor del aprovechamiento de la cáscara de chontaduro, integrando aspectos ambientales, sociales y económicos, con el fin de orientar decisiones estratégicas, atraer inversión o aliados y guiar el escalamiento del proyecto dentro de un enfoque de bioeconomía y economía circular.



Gráfico 5 - Eco-canvas para la cadena de valor del biomaterial desarrollado

3. Propuesta de para el desarrollo socioambiental de la cadena de valor

El chontaduro es una palma tropical adaptada a ecosistemas húmedos entre 0 y 1800 msnm, temperaturas de 24 a 30°C y precipitaciones superiores a 2000 mm anuales. En Colombia, estos cultivos se concentran en Putumayo, la región Pacífica y los Andes bajos, sin embargo, estas regiones, coinciden con áreas con presencia de grupos armados y débil presencia estatal (FARC, ELN y paramilitares), donde históricamente se han dado disputas territoriales y la proliferación de cultivos de uso ilícito.

3.1 Caracterización socioeconómica de la población con potencial productor de chontaduro.

Durante décadas, el cultivo de hoja de coca en Colombia ha sido uno de los principales focos de atención de las políticas antidrogas. Aunque los esfuerzos han estado centrados en la erradicación forzada, la persistencia del fenómeno revela que el problema no es solo delictivo sino profundamente estructural. Las comunidades productoras de coca no eligen esta actividad por convicción, sino por falta de opciones. Para este proyecto partiremos del supuesto que los habitantes de estas regiones sí pueden dedicarse a cultivos lícitos, pero dicha transición solo será viable si se garantizan condiciones mínimas de infraestructura, apoyo técnico, acceso a mercados y presencia estatal sostenida.

Las comunidades productoras de coca están ubicadas en regiones con alta pobreza, baja institucionalidad y escasa infraestructura. Según el diagnóstico realizado por la UNODC y la FIP en 2018, el 57% de los hogares en zonas cocaleras vive en pobreza monetaria y el 47% en pobreza multidimensional. La falta de caminos, títulos de propiedad y acceso a servicios básicos hace que el cultivo de coca represente, para muchos, la única opción de sustento. (Dávalos et al., 2024)

Además, la coca tiene una cadena de comercialización consolidada e ilegal que recoge el producto directamente en el predio, eliminando los costos de transporte y los riesgos de mercado que afectan a los cultivos ilícitos (UNODC, 2018). Por eso, la simple erradicación sin alternativas ha llevado a ciclos de replante o desplazamiento del problema, más que soluciones duraderas.

Ahora bien, que los cocaleros puedan dedicarse a cultivos lícitos no implica que puedan hacerlo en cualquier circunstancia. La experiencia ha demostrado que, sin condiciones adecuadas, la sustitución no es sostenible. La falta de infraestructura vial es uno de los principales obstáculos,

solo 47,8% de los hogares tienen acceso a vías. Esta limitación impide comercializar productos lícitos, mientras que la coca, al ser parte de una economía ilícita organizada, se compra directamente en el predio.

Tampoco existen cadenas de valor funcionales para muchos productos alternativos. Aunque se han impulsado cultivos como el cacao, el café, el caucho o el palmito, estos requieren asistencia técnica, tiempo de maduración y acceso estable a mercados. Sin precios justos, sin compradores seguros y sin asociatividad efectiva, los cultivos lícitos no logran compartir con la coca, ni en ingresos ni en facilidad logística.

Además, la tenencia informal de la tierra limita el acceso a créditos y programas de apoyo. Aunque el 58% de las familias afirma ser propietaria de su predio, solo el 13% tiene título formal, lo que los excluye de muchos programas estatales y de instituciones financieras. Sin embargo, también hay razones para el optimismo, la mayoría de las familias ya cultivan productos lícitos en paralelo a la coca, como pancoger, plátano o yuca. Esto significa que hay conocimientos agrícolas que pueden ampliarse. El 41% de la población es joven, lo que representa una oportunidad para desarrollar capacidades técnicas liderazgos nuevos y un vínculo renovado con la tierra. Además, muchas comunidades tienen estructuras organizativas activas con participación significativa de mujeres (29% en jefas de hogar), lo que ofrece una base social sólida para impulsar la sustitución colectiva. (UNODC, 2018)

3.2 Indicadores según UNEP, revisión de literatura y análisis contextual.

Partiendo del supuesto que las comunidades productoras de coca pueden ser productoras de chontaduro y con ello ser proveedoras de cáscara para producir el biomaterial, se analizaron los indicadores definidos anteriormente, permitiendo conocer su potencial como una alternativa productiva sostenible para comunidades afectadas por los cultivos ilícitos. Este análisis permitió identificar las oportunidades existentes frente a problemáticas como el desempleo, la informalidad laboral y la dependencia de cultivos ilícitos, adicionalmente permiten tener una línea base para monitorear el impacto que la cadena de valor propuesta pueda tener en el tiempo.

A partir de los indicadores presentados en el Anexo 1 y el contexto de las comunidades productoras de coca, se puede concluir que estas comunidades se enfrentan a altos niveles de vulnerabilidad social y económica, con bajo acceso a servicios básicos, alta informalidad laboral,

desempleo persistente y bajos niveles de ingreso y desarrollo humano. La participación comunitaria es limitada, aunque existen algunas organizaciones activas, y la tenencia de la tierra es mayormente informal. Aunque existen algunos esfuerzos de inversión comunitaria y surgimiento de emprendimientos alternativos, la baja participación en cadenas de valor legales y la débil infraestructura social reflejan la necesidad urgente de alternativas viables y sostenibles, que puedan mejorar las condiciones locales y fomentar el desarrollo territorial inclusivo.

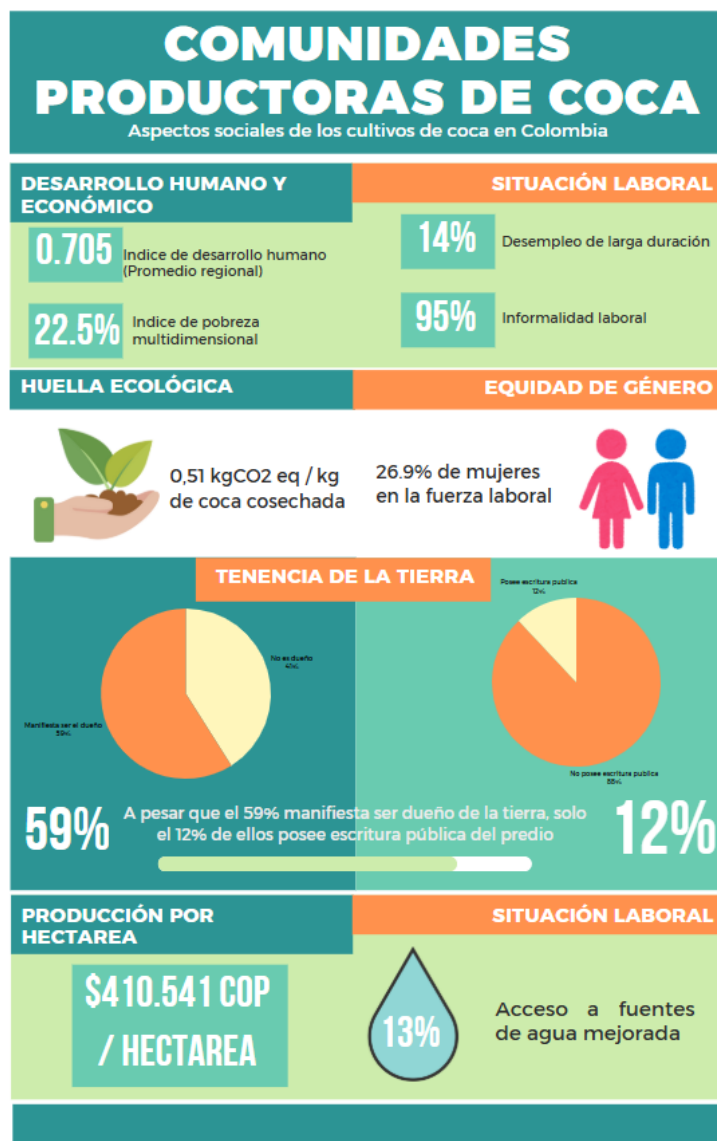


Gráfico 6 - Infografía de indicadores clave en las comunidades productoras de coca

3.3 Acciones recomendadas

Con base en el análisis desarrollado en este reporte, se identificaron diversas acciones sociales clave para promover una integración equitativa y sostenible del aprovechamiento de la cáscara de chontaduro en la cadena de valor del cultivo. Estas acciones buscan responder a las condiciones de vulnerabilidad estructural presentes en las regiones productoras, fortalecer la economía rural y contribuir a los objetivos de la economía circular.

Fortalecimiento de capacidades comunitarias: Es fundamental desarrollar procesos de formación técnica y educación ambiental dirigidos a los actores locales vinculados al cultivo de chontaduro. La implementación de programas de capacitación en buenas prácticas agrícolas, manejo postcosecha de residuos agroindustriales y procesos de transformación básicos.

Impulso del asociativismo y organización social: Para garantizar una participación y equitativa de las comunidades rurales en la cadena de valor, se sugiere fomentar la conformación y fortalecimiento de asociaciones de pequeños productores, cooperativas agrícolas y otras formas de economía solidaria.

Inclusión productiva de poblaciones vulnerables: Considerando el contexto de los territorios con presencia de cultivo ilícitos, el aprovechamiento de la cáscara de chontaduro ofrece una alternativa concreta para avanzar en la transición hacia economías lícitas. En este sentido, se recomienda priorizar estrategias de inclusión productiva para poblaciones tradicionalmente excluidas, como familias campesinas, jóvenes rurales y mujeres.

Generación de empleo local y emprendimientos verdes: La instalación de unidades de transformación comunitarias para procesar la cáscara de chontaduro puede convertirse en una fuente directa de empleo local y dinamización de economías rurales. Además, se promueve la creación de emprendimientos verdes vinculados al uso del biomaterial para la fabricación de otros productos derivados como elementos decorativos, macetas, entre otros.

Seguridad jurídica y acceso a tierras productivas: Dado que el acceso formal a la tierra es un factor limitante para la participación en cadenas de valor legales, se recomienda implementar estrategias para la formalización de la propiedad rural, lo cual facilitaría el acceso a programas de crédito, asistencia técnica e inversión productiva. Adicionalmente, pueden impulsarse acuerdos de

conservación y productividad que incentiven prácticas agroecologías y restauración de ecosistemas mediante cultivos autóctonos como el chontaduro.

Inversión social con enfoque circular: Se propone la creación de mecanismos financieros orientados a reinvertir parte del valor generado por la cadena del biomaterial en proyectos sociales locales, como fondos de inversión comunitaria, infraestructura productiva, acceso al agua, educación o salud rural.

A continuación, se resumen las actividades propuestas:

Tabla 12 - Acciones recomendadas para consolidar el aspecto social de la cadena de valor del biomaterial

Acción recomendada	Objetivo	Actores responsables	Nivel de intervención
Fortalecimiento de capacidades comunitarias	Mejorar habilidades técnicas y ambientales.	Universidades, SENA, ONG	Comunitario y regional
Impulso del asociativismo y organización social	Incrementar la participación de pequeños productores	Organizaciones campesinas, alcaldías	Comunitario
Inclusión productiva de poblaciones vulnerables	Facilitar la transición a economías lícitas	UNODC, Ministerio de agricultura, alcaldías	Regional
Generación de empleo local y emprendimientos verdes	Crear empleos rurales	Cooperativas, emprendedores, cámaras de comercio	Comunitario y regional
Seguridad jurídica y acceso a tierras productivas	Mejorar el acceso a financiamiento	Agencia Nacional de Tierras, Ministerio de agricultura	Nacional y regional
Inversión social con enfoque circular	Redistribuir valor hacia proyectos comunitarios	Empresas compradoras, alcaldías, organizaciones comunitarias	Comunitario y regional

(Fuente: elaboración propia)

Conclusiones

El presente estudio evaluó el potencial socioeconómico y ambiental de un biomaterial derivado de la cáscara del chontaduro como alternativa al poliestireno expandido. Tras la caracterización fisicoquímica y mecánica del material, realizada en trabajos previos, se determinó que su nivel de madurez tecnológica corresponde al TRL 4, al haberse validado en laboratorio sus propiedades fundamentales, aunque aún resta demostrar su desempeño en entornos de uso real para avanzar en el escalamiento industrial.

El análisis técnico económico revela que, si bien la producción a pequeña escala implica un costo de \$6.845 COP/kg, estos valores podrían mejorar sustancialmente con economías de escala y la valorización de residuos agroindustriales de bajo costo. Adicionalmente, el biocompuesto ofrece una reducción del 57.2% en huella de carbono y del 55.2 en demanda energética acumulada respecto al poliestireno expandido, aunque presenta incrementos en eutrofización marina +3,2% y agotamiento de ozono +18,4%, estos impactos podrían mitigarse mediante la optimización del manejo de nutrientes y mejoras en los procesos de incubación.

Desde la perspectiva de la bioeconomía, el aprovechamiento de cáscaras de chontaduro no valorizadas actualmente abre oportunidades para diversificar la cadena de valor en zonas rurales, generar ingresos adicionales para pequeños productores y contribuir a procesos de sustitución de cultivos ilícitos. No obstante, la concentración de estos beneficios depende de la creación de infraestructura adecuada, el fortalecimiento de capacidades técnicas y la formalización de esquemas asociativos que integren a las comunidades locales.

En conclusión, el biocompuesto derivado de cáscara de chontaduro constituye una alternativa importante al EPS, con ventajas competitivas en costos y emisiones y un potencial significativo de impacto socio económico. Su éxito dependerá del avance en el escalado tecnológico y del fortalecimiento de la bioeconomía local, a través de sinergias público privadas y la participación de la academia y las comunidades rurales.

Anexos

Anexo 1 – Tabla de indicadores relevantes para la cadena de valor del aprovechamiento de la cáscara de chontaduro.

Categoría	Indicador	Metrica	Chocó	Valle del cauca	Cauca	Nariño	Putumayo	Región pacífica	Fuente	Observación
Comunidad local	Acceso a servicios básicos (agua, educación, salud)	% de hogares sin acceso a fuente de agua mejorada	71,1%	19,3%	23,8%	36,4%	58,3%	13,0%	DANE 2024	Centros poblados y rural disperso
	Cohesión comunitaria y asociaciones	Número de organizaciones locales activas	132						Guerrero Lovera 2017	Región pacífica
	Tenencia y uso de la tierra	% de comunidad con propiedad sobre los predios	59% manifiesta ser dueño de la tierra, 12% tiene escritura publica						UNODC 2018	Comunidad
	Creación de empleo	Número de familias que obtienen ingresos de la actividad	200.000						UNODC 2023	Comunidad
	Desempleo	% de personas con desempleo de larga duración	20,4%	17,3%	11,0%	11,7%	5,0%	14,0%	DANE 2024	Centros poblados y rural disperso
	Empleo local / oportunidades económicas	número de nuevos emprendimientos asociados	163	242	92	122	351	619	Diagnostico negocios verdes	Emprendimientos validados por las CAR
	Huella ecológica	kg CO ₂ eq/producción	0,51 kgCO ₂ eq / kg de coca cosechada						Informe mundial sobre drogas y medio ambiente 2022	Comunidad
	Índices agregados (IPM)	Valores oficiales de estos índices en la zona de influencia	45,2%	15,9%	17,3%	24,5%	15,1%	22,5%	DANE 2024	Centros poblados y rural disperso
	Ingreso familiar / promedio	COP / ha cultivada	\$ 410.541						PUND 2025	En promedio cada familia cultiva 0,5 ha
	Inversión comunitaria	COP/año invertido en proyectos sociales	2,3 billones de pesos						Monitoreo UNODC 2023	Inversión entre 2017 y 2023 Sustitución de cultivos
	Participación de pequeños productores	% de actores pequeños en la cadena / volumen que aportan	Entre 11 y 19% de los hogares estan vinculados a asociaciones productivas o comunitarias						PUND 2025	Comunidad
	PIB per cápita	COP/persona/año	\$ 1.640	\$ 13.700	\$ 4.931	\$ 4.427	\$ 458		DANE 2023	PIB por departamento en actividades agrícolas

Otros actores	Gasto en I+D	% del ingreso o presupuesto destinado a innovación	1,86 billones de pesos (0,29% del PIB)						DANE 2021	Incluye sector privado y publico
Sociedad	Control de la corrupción	Índice de percepción de corrupción Transparency International	39 puntos							
	Estabilidad política	Índice de gobernabilidad o estabilidad institucional	2						GPI 2024	
	Índice de buen país	Ranking global del país en contribuciones al bien común	Puesto 51 (3 en Latinoamérica)						GCI 2025	Good Country Index v1.6
	Índice de Desarrollo Humano de la ONU	Valor de 0 a 1	0,687	0,782	0,710	0,713	0,708	0,758	PNUD 2024	
	Índice de Paz Global	Valor del índice por país	2,887						GPI 2024	Cifra Colombia, puesto 146 a nivel mundial, 11 en Latinoamérica (menos es mejor)
	Seguridad alimentaria / precio de canasta	% del ingreso familiar destinado a la canasta básica	69%						DANE 2020	Teniendo en cuenta el ingreso por área cultivada promedio
	Tasa de reciclaje	% de residuos reciclados respecto al total de residuos generados	13,46%						DANE 2020	
Trabajadores	Condiciones de trabajo	% de contratos informales	93,40%	77,20%	93,40%	96,60%	96,80%	76,80%		Centros poblados y rural disperso
	Labor infantil	% de trabajadores menores de la edad mínima legal	1,30%	1,30%	4,30%	2,90%	2,50%	1,40%		Centros poblados y rural disperso
	Proporción de mujeres en la fuerza laboral	% de mujeres empleadas sobre total de empleados	29,6%						DANE 2021	Sector agrícola
	Salario vs. salario mínimo / equidad salarial	% (entre salario promedio y salario mínimo legal)	32%							Salario mínimo 2024 1'300.000

Referencias

- Amabile, C., Abate, T., Muñoz, R., Chianese, S., & Musmarra, D. (2024). Techno-economic assessment of biopolymer production from methane and volatile fatty acids: effect of the reactor size and biomass concentration on the poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) selling price. *Science of the Total Environment*, 929. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172599>
- Barchielli, B., Cricenti, C., Gallè, F., Sabella, E. A., Liguori, F., Da Molin, G., Liguori, G., Orsi, G. B., Giannini, A. M., Ferracuti, S., & Napoli, C. (2022). Climate Changes, Natural Resources Depletion, COVID-19 Pandemic, and Russian-Ukrainian War: What Is the Impact on Habits Change and Mental Health? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19). <https://doi.org/10.3390/ijerph191911929>
- Chalermthai, B., Charoensuppanimit, P., Nootong, K., Olsen, B. D., & Assabumrungrat, S. (2023). Techno-economic assessment of co-production of edible bioplastic and food supplements from Spirulina. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37156-3>
- Dávalos, E., Hernández, E., Llanes, L. M., Rubiano-Lizarazo, J., & Alejandra Vélez, M. (2024). *Características socioeconómicas de los cultivadores de coca en Colombia: recomendaciones para una política de transformación territorial con enfoque étnico y ambiental*.
- Dhillon, R., & Moncur, Q. (2023). Small-Scale Farming: A Review of Challenges and Potential Opportunities Offered by Technological Advancements. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su152115478>
- DNP. (2016). *Política nacional de desarrollo productivo CONPES 3866*.
- DNP. (2018). *Política de crecimiento verde CONPES 3934*.
- Enarevba, D. R., & Haapala, K. R. (2023). A Comparative Life Cycle Assessment of Expanded Polystyrene and Mycelium Packaging Box Inserts. *Procedia CIRP*, 116, 654–659. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.110>

- Enriquez-Medina, I., Bermudez, A. C., Ortiz-Montoya, E. Y., & Alvarez-Vasco, C. (2023). From purposeless residues to biocomposites: A hyphae made connection. *Biotechnology Reports*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00807>
- Enriquez-Medina, I., Rodas-Ortiz, I., Bedoya-Garcia, I., Velasquez-Godoy, A. M., Alvarez-Vasco, C., & Ceballos Bermudez, A. (2024). Bridging gap between agro-industrial waste, biodiversity and mycelium-based biocomposites: Understanding their properties by multiscale methodology. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2024.07.001>
- Evaluaciones agropecuarias municipales Chontaduro MinAgricultura*. (2016).
- Expanded Polystyrene Market Share Analysis Report, 2030*. (n.d.). Retrieved May 11, 2025, from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/expanded-polystyrene-eps-market>
- Expanded Polystyrene Market Size, Share, Growth & Forecast*. (n.d.). Retrieved May 11, 2025, from <https://www.chemanalyst.com/industry-report/expanded-polystyrene-market-2967>
- FAO. (n.d.). *Sustainable bioeconomy and FAO*.
- Feijóo-Vivas, K., Bermúdez-Puga, S. A., Hernán-Rebolledo, Figueroa, J. M., Zamora, P., & Naranjo-Briceño, L. (2021). Fungal mycelium-bioproducts development: A new material culture and its impact on the transition to a sustainable economy. In *Bionatura* (Vol. 6, Issue 1, pp. 1637–1652). Centro de Biotecnología y Biomedicina, Clinical Biotec. Universidad Católica del Oriente (UCO), Univesidad Yachay Tech. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.29>
- Fernando Valero-Valdivieso, M., Ortegón, Y., & Uscategui, Y. (2013). *Biopolymers: Progress and prospects*. 80, 171–180.
- Finagro. (2020). *Marco de referencia agroeconómico - Chontaduro rojo y amarillo*.
- Fundación Ellen MacArthur. (2015). *Hacia una economía circular: Motivos económicos para una transición acelerada*.

- Gomes, G. M., Pigosso, D. C. A., & McAloone, T. C. (2024). Design and collaboration strategies for circular economy implementation across the value chain. *Proceedings of the Design Society*, 4, 1259–1268. <https://doi.org/10.1017/pds.2024.128>
- Gwiazdowska, D., Marchwińska, K., & Juś, K. (2024). Sustainable food production and processing—sustainable agriculture and biotechnological approaches in food chain. In *Sustainable food. Production and consumption perspectives* (pp. 13–28). Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu. <https://doi.org/10.18559/978-83-8211-209-2/1>
- Ingle, A. P., Saxena, S., Moharil, M. P., Rivaldi, J. D., Ramos, L., & Chandel, A. K. (2025). Production of biomaterials and biochemicals from lignocellulosic biomass through sustainable approaches: current scenario and future perspectives. *Biotechnology for Sustainable Materials*, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s44316-025-00025-2>
- Levke Caesar, Sakschewski Boris, Andersen Lauren Seaby, Beringer Tim, Johanna Braun, Donovan Dennis, Dieter Gerten, Adrian Heilemann, Jonas Kaiser, Niklas H. Kitzmann, Sina Loriani, Wolfgang Lucht, Josef Ludescher, Maria Martin, Sabine Mathesius, Anja Paolucci, Sofie te Wierik, & Johan Rockström. (2024). *Planetary Health Check A Scientific Assessment of the State of the Planet*.
- Ley 2232 de 7 de julio de 2022. (2022).
- Marasović, P., Puchalski, M., & Kopitar, D. (2025). Effects of field conditions on the degradation of cellulose-based and PLA nonwoven mulches. *Scientific Reports*, 15(1), 11986. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94686-8>
- Melchor-Martínez, E. M., Macías-Garbett, R., Alvarado-Ramírez, L., Araújo, R. G., Sosa-Hernández, J. E., Ramírez-Gamboa, D., Parra-Arroyo, L., Alvarez, A. G., Monteverde, R. P. B., Cazares, K. A. S., Reyes-Mayer, A., Lino, M. Y., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldívar, R. (2022). Towards a Circular Economy of Plastics: An Evaluation of the Systematic Transition to a New Generation of Bioplastics. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14061203>
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural. (2021). *Informe Rendición de cuentas 2021*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Plan de Negocios verdes 2022 - 2030*.
<https://www.minambiente.gov.co/negocios-verdes/plan-nacional-de-negocios-verdes/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Ministerio de Comercio Industria y Turismo. (2019). *Estrategia nacional de economía circular: Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*.

Ministerio de ciencia, tecnología e innovación. (2021). *Niveles de madurez tecnologica y de manufactura TRL y MRL*.

Nadal Alejandro, & Aguayo Francisco. (2020). *Los motores de la degradación ambiental: el modelo macroeconómico y la explotación de los recursos naturales en América Latina*.
www.cepal.org/apps

Petrescu, T. C., Voordijk, J. T., & Mihai, P. (2023). Developing a TRL-oriented roadmap for the adoption of biocomposite materials in the construction industry. *Frontiers of Engineering Management*, 10(2), 223–236. <https://doi.org/10.1007/s42524-021-0154-4>

Rajvanshi, J., Sogani, M., Kumar, A., & Arora, S. (2023). Biomaterials: A Sustainable Solution for a Circular Economy †. *Engineering Proceedings*, 59(1).
<https://doi.org/10.3390/engproc2023059133>

Sehnem, S., de Queiroz, A. A. F. S. L., Pereira, S. C. F., dos Santos Correia, G., & Kuzma, E. (2022). Circular economy and innovation: A look from the perspective of organizational capabilities. *Business Strategy and the Environment*, 31(1), 236–250.
<https://doi.org/10.1002/bse.2884>

Suazo, A., Tapia, F., Aroca, G., & Quintero, J. (2024). Techno-Economic and Life Cycle Assessment of a Small-Scale Integrated Biorefinery for Butyric-Acid Production in Chile. *Fermentation*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/fermentation10010001>

Thrän, J., Garcia-Garcia, G., Parra-López, C., Ufarte, A., García-García, C., Parra, S., & Sayadi-Gmada, S. (2024). Environmental and economic assessment of biodegradable and compostable alternatives for plastic materials in greenhouses. *Waste Management*, 175, 92–100. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2023.12.049>

UNODC. (2018). *Quiénes son las familias que viven en las zonas con cultivos de coca*.