

LCA and SimaPro-based assessment of decarbonization and toxicity reduction in cotton yarn production in Arequipa, Peru.

Andrea Lucia Valdivieso Espejo¹, Mariela Cristina Flores Javier¹, ¹ Lissette Vásquez Noblecilla¹, Juan Manuel Portal Calixto³, Reinier Jiménez Borges², Yoisdel Castillo Alvarez^{*1},

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Carlos Rafael Rodríguez de Cienfuegos, Cienfuegos.

*pcigycas@upc.edu.pe

Abstract

This study presents a Life Cycle Assessment (LCA) of the cotton yarn production process in a company located in Arequipa, Peru, with the aim of identifying opportunities to reduce the environmental impacts associated with this industry. The functional unit considered is the production of 1 kg of cotton yarn, using a “gate-to-gate” approach and primary data validated by the company. The production process begins with the reception and storage of raw cotton, followed by a series of mechanical operations—opener, batan, carding, drawing, doubling, combing, autoleveller, roving, spinning, and winding—that transform the fiber into yarn, generating by-products and waste at each stage. Calculations determined that to obtain 1 kg of yarn, 1.287 kg of raw cotton is required, with an energy consumption of 7.99 kWh and the generation of 0.024 kg of solid waste. The LCA, carried out using SimaPro, prioritized the following impact categories: global warming, terrestrial ecotoxicity, and human non-carcinogenic toxicity. Three improvement alternatives were evaluated: the use of photovoltaic energy, the replacement of conventional cotton with organic cotton, and the combination of both. The results indicate that the alternative based on organic cotton presents the lowest overall environmental impact, especially in terms of ecotoxicity and human toxicity, positioning it as the most sustainable option for the local textile industry.

Keywords—Life Cycle Assessment, cotton yarn, sustainability, environmental impact, SimaPro, organic cotton.

Evaluación basada en LCA y SimaPro de la descarbonización y la reducción de la toxicidad en la producción de hilo de algodón en Arequipa, Perú.

Andrea Lucia Valdivieso Espejo¹, Mariela Cristina Flores Javier¹, Lissette Vásquez Noblecilla

¹, Juan Manuel Portal Calixto³, Reinier Jiménez Borges², Yoisdell Castillo Alvarez^{*1},

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Carlos Rafael Rodríguez de Cienfuegos, Cienfuegos.

*pcigycas@upc.edu.pe

Resumen—Este estudio presenta un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso productivo de hilos de algodón en una empresa de Arequipa, Perú, con el objetivo de identificar oportunidades para reducir los impactos ambientales asociados a esta industria. Se empleó como unidad funcional la producción de 1 kg de hilo de algodón, bajo un enfoque “puerta a puerta” y utilizando datos primarios validados por la empresa. El proceso productivo inicia con la recepción y almacenamiento de la flocia de algodón, seguida de una serie de operaciones mecánicas —abridora, batán, carda, manuales, reunidor, peinadora, autoregulator, pavilera, continua y conera— que transforman la fibra en hilo, generando subproductos y residuos en cada etapa. Los cálculos realizados permitieron determinar que para obtener 1 kg de hilo se requiere el ingreso de 1.287 kg de flocia, con un consumo energético de 7.99 kWh y la generación de 0.024 kg de residuos sólidos. El ACV, realizado en SimaPro, priorizó las categorías de impacto: calentamiento global, ecotoxicidad terrestre y toxicidad humana no cancerígena. Se evaluaron tres alternativas de mejora: uso de energía fotovoltaica, reemplazo de algodón convencional por orgánico, y la combinación de ambas. Los resultados indican que la alternativa basada en algodón orgánico presenta el menor impacto ambiental global, especialmente en ecotoxicidad y toxicidad humana, posicionándose como la opción más sostenible para la industria textil local.

Keywords—Análisis de Ciclo de Vida, hilos de Algodón, sostenibilidad, Impacto ambiental, SimaPro, Algodón orgánico.

I. INTRODUCCION

La industria textil se reconoce como un sistema sociotécnico complejo con una elevada intensidad de recursos y generación de externalidades ambientales, situándose entre los principales sectores emisores de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y consumidores de agua a escala global. Este sector contribuye entre el 8 % y el 10 % de las emisiones antropogénicas de GEI equivalentes a más de 4 gigatoneladas de CO₂ eq anuales y demanda cerca de 93 mil millones de m³ de agua por año, exacerbando problemas de estrés hídrico y degradación ecosistémica [1], [2]. De forma paralela, la generación de residuos textiles supera los 92 millones de toneladas anuales, de las cuales menos del 25 % se recicla, evidenciando la persistencia de un modelo lineal que intensifica la pérdida de materiales, el consumo energético y las emisiones

asociadas a disposición final [3], [4]. En este contexto, el algodón, principal fibra natural utilizada en la manufactura textil (30 % del mercado global), presenta una problemática ambiental crítica: su cultivo involucra altos requerimientos de agua (700–1200 mm por ciclo) y agroquímicos (hasta el 11 % de los pesticidas globales), contribuyendo a procesos de salinización de suelos, eutrofización y ecotoxicidad acuática [5]. Si bien alternativas como el algodón orgánico y el algodón reciclado han demostrado reducciones significativas en categorías como ecotoxicidad terrestre y toxicidad humana no cancerígena [6], su adopción enfrenta limitaciones técnicas (rendimiento agrícola reducido, variabilidad en calidad de fibras) y económicas (costos de certificación y escalamiento industrial), lo que evidencia la necesidad de enfoques integrados que combinen estrategias en materia prima con eficiencia energética y economía circular. Ante estas problemáticas, las agendas regulatorias internacionales, como la Estrategia Europea para Textiles Circulares y Sostenibles (2022), establecen objetivos vinculantes orientados a la neutralidad climática, reciclabilidad y reducción de sustancias peligrosas para 2030, promoviendo un cambio estructural hacia modelos de producción y consumo circulares [7]. En paralelo, la presión social y los compromisos climáticos nacionales exigen la adopción de instrumentos analíticos que permitan evaluar de manera holística los impactos ambientales del sector textil y priorizar intervenciones de alto impacto en la cadena de valor. En este sentido, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), bajo los lineamientos de ISO 14040/44, constituye la metodología más robusta y científicamente reconocida para cuantificar impactos ambientales de manera multicriterio y sistémica [8]. Su aplicación en textiles permite identificar hotspots críticos como el consumo eléctrico en hilatura, el uso intensivo de agua en procesos húmedos y la dependencia de insumos químicos, a la vez que facilita la comparación de escenarios alternativos que integren materias primas sostenibles (algodón orgánico o reciclado) y transición energética mediante fuentes renovables como la fotovoltaica [9], [10]. Estudios recientes han demostrado que la sinergia entre la sustitución de materias primas y el abastecimiento energético renovable puede reducir

hasta un 50 % el calentamiento global y más del 60 % los impactos toxicológicos asociados, configurándose como una estrategia clave para alinear el sector textil con los principios de descarbonización y circularidad industrial [11], [12]. No obstante, existe un vacío significativo de evidencia científica contextualizada para regiones emergentes, donde las dinámicas productivas, la disponibilidad de recursos y la matriz energética difieren sustancialmente de los casos europeos o asiáticos predominantes en la literatura. En América Latina, particularmente en el Perú, la industria textil presenta una alta dependencia de algodón, un uso intensivo de electricidad proveniente de la red convencional y una baja penetración de tecnologías renovables y fibras certificadas, factores que limitan la extrapolación de modelos foráneos y subrayan la necesidad de estudios localmente adaptados. En respuesta a esta brecha, la presente investigación implementa un ACV con enfoque "puerta a puerta" para evaluar el proceso de hilado de algodón NM 17 en una empresa textil de Arequipa, Perú, incorporando inventarios primarios de operación real y modelando escenarios alternativos que integran la sustitución de algodón convencional por algodón orgánico y el cambio de electricidad de red a energía fotovoltaica. Este trabajo no solo aborda la falta de estudios aplicados en contextos latinoamericanos, sino que también propone una base metodológica replicable que vincula ACV, circularidad y transición energética como ejes estratégicos para la descarbonización y competitividad sostenible de la industria textil regional.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Caracterización del proceso productivo

El proceso productivo Fig. 1 de hilos de algodón inicia con la recepción y almacenamiento de la floc de algodón como materia prima. Cuando se recibe un pedido, se programa el ingreso al proceso productivo y el almacén entrega la cantidad requerida de algodón, en este caso 46,55 kg, a la sección de hilandería. El algodón es pesado y cargado en la primera máquina, denominada Abridora, cuya función es abrir la fibra y prepararla para el siguiente paso. Posteriormente, la fibra pasa a la máquina Batán, donde se sacude para eliminar cascarilla y pajitas, generando residuos como subproductos, y la fibra sale en forma de rollo. Estos rollos se trasladan a la máquina Carda, que limpia y elimina impurezas, generando más residuos y transformando la fibra en mecha. A continuación, la fibra es llevada en tachos reutilizables al Manuar 1, donde se realiza el primer estiraje y se validan características técnicas como el peso de 5 gramos por metro, generando también residuos. El proceso sigue en el Reunidor, una máquina similar donde se reúnen las mechas y se valida nuevamente el peso. Después, la fibra pasa a la Peinadora, donde se limpia y elimina la fibra corta, generando residuos y validando el peso técnico. Seguidamente, la fibra es llevada al Manuar 2 para un nuevo estiraje, generando residuos y validando el peso. El proceso continúa en la máquina Autoregulator, donde se realiza otro estiraje de la mecha y se generan residuos. El producto en proceso es llevado a la máquina Pavilera, donde se le asigna el número métrico requerido, en este caso NM 17. Luego,

pasa a la máquina Continua, donde se le da torsión al hilo y se enrolla en canillas, generando más residuos. Finalmente, el hilo se lleva a la máquina Conera, donde se le da uniformidad, se eliminan defectos y se cambia la presentación de canilla a cono, generando los últimos residuos de subproductos de la fibra. Así, el proceso productivo concluye con la obtención del hilo de algodón listo para su entrega.

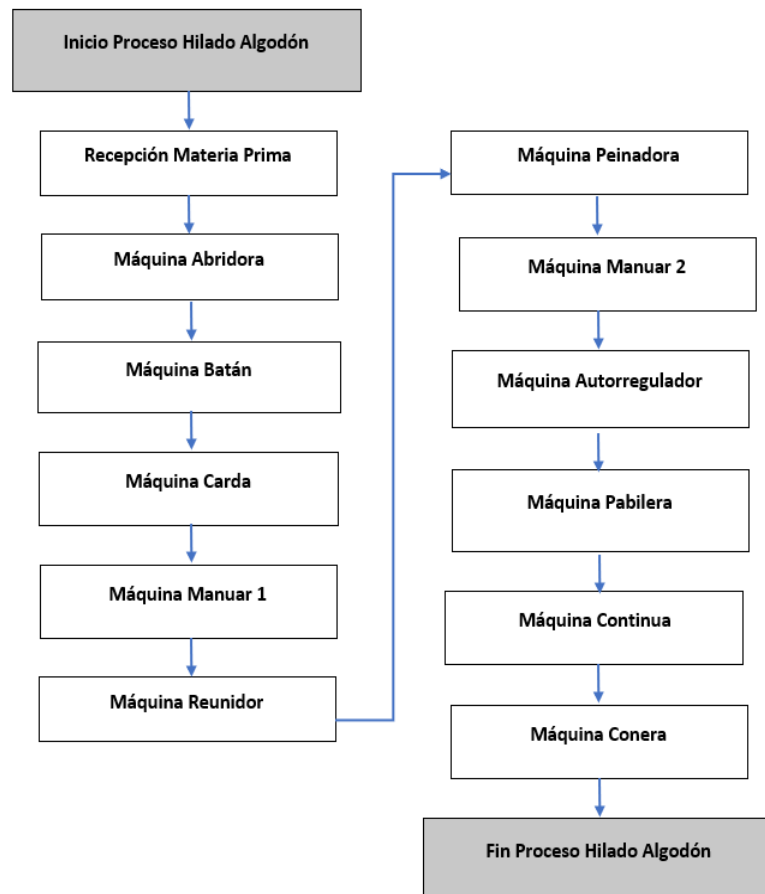


Fig. 1: Diagrama del proceso productivo de hilado de algodón de una empresa en Arequipa.

B. Metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

El ACV trasciende su concepción como técnica evaluativa para posicionarse como un marco científico integrador que permite comprender las interacciones complejas entre flujos de materia y energía a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o proceso. En la industria textil, caracterizada por cadenas de valor altamente fragmentadas y una notable intensidad de recursos, su implementación no solo facilita la identificación precisa de los nodos de mayor contribución a la huella ambiental ("hotspots"), sino que además habilita el diseño de intervenciones sistémicas de mitigación con fundamento cuantitativo. Al proporcionar una visión holística y multicriterio, el ACV posibilita decisiones basadas en evidencia que equilibran desempeño técnico, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental, alineándose con las exigencias de

la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (Fig.2), se basa en los principios establecidos por las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, las cuales definen el marco metodológico y las directrices para su aplicación [13], [14]. El ACV sigue un enfoque sistemático denominado "de la cuna a la tumba", considerando todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas, manufactura, transporte y distribución, uso, hasta su disposición final [15].

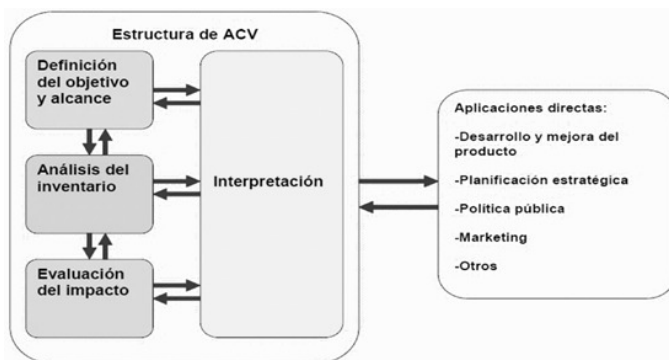


Fig. 2: Estructura de la Metodología ACV.

Definición del Objetivo y Alcance

En esta fase, se establece el propósito del estudio y el sistema bajo análisis, determinando los límites del sistema y la unidad funcional, que es el parámetro de referencia que permite la comparación de resultados entre distintos estudios [16]. Los límites del sistema pueden definirse bajo distintos enfoques, como "de la cuna a la tumba," "de la cuna a la puerta", dependiendo del alcance del estudio [17]. Es esencial definir el objetivo del ACV, el cual puede estar orientado a la mejora de procesos, comparación de tecnologías o toma de decisiones estratégicas. La correcta formulación del objetivo y alcance garantiza la coherencia y aplicabilidad de los resultados [18].

Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

El análisis del inventario implica la recopilación y cuantificación de datos sobre flujos de entrada (materias primas, consumo energético, agua) y flujos de salida (emisiones, residuos, productos intermedios). Este proceso es clave para identificar las contribuciones ambientales de cada fase del ciclo de vida y suele ser la etapa más demandante en términos de recolección de datos [19].

En esta etapa, se generan balances de masa y energía que permiten evaluar los impactos de los insumos y emisiones en cada etapa del proceso [20]. La calidad de los datos utilizados en el inventario es determinante para la precisión del ACV, por lo que se recomienda el uso de bases de datos reconocidas, como Ecoinvent, ILCD o Gabi [21].

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

La evaluación del impacto ambiental se basa en la clasificación de los flujos de inventario en categorías de impacto, tales como cambio climático, eutrofización, acidificación, toxicidad humana, entre otros [22]. Posteriormente, se aplica un proceso de caracterización en el cual los datos de emisiones se convierten en indicadores de impacto a través de modelos específicos, como Ecoindicator 99 o ReCiPe [23]. Además, se pueden aplicar métodos de normalización y ponderación para facilitar la interpretación de los resultados y la toma de decisiones [24]. La normalización permite comparar los impactos de cada categoría con una referencia global o regional, mientras que la ponderación asigna valores relativos a cada impacto según su relevancia ambiental [20].

Interpretación de Resultados

En esta etapa, se analizan los resultados obtenidos en el ICV y la EICV, con el objetivo de identificar los puntos críticos del sistema y proponer estrategias de mejoras [25]. Se pueden realizar análisis de sensibilidad y de incertidumbre para evaluar la robustez de los resultados [26]. La interpretación de resultados debe garantizar la transparencia y validez del estudio, cumpliendo con los principios de exhaustividad y coherencia metodológica [27]. Además, la correcta comunicación de los hallazgos permite la toma de decisiones informadas y la formulación de estrategias de reducción de impacto ambiental [?].

III. RESULTADOS

A. Caracterización del proceso productivo

Las fronteras del sistema se establecen desde la recepción de la floc de algodón en planta hasta la obtención del hilo acabado en conos. El diagrama de flujo (Fig.3) representa de manera sistemática y cuantificada las entradas (materia prima, energía eléctrica, insumos auxiliares como conos de cartón) y las salidas (hilo de algodón, subproductos de fibra y residuos sólidos), considerando únicamente las operaciones internas bajo un enfoque "gate-to-gate".

El proceso productivo comprende once etapas operativas: recepción de materia prima, apertura (Abridora), limpieza (Batán), cardado (Carda), estirajes sucesivos (Manuar 1 y 2, Reunidor, Autoregulator), peinado (Peinadora), pabilado, torsión (Continua) y conformado final en cono (Conera). Este desglose permite identificar los puntos críticos de consumo energético y generación de residuos a lo largo de la cadena interna de hilado.

El balance de masa y energía evidencia que para producir 1 kg de hilo de algodón NM 17 es necesario un ingreso de 1,287 kg de floc de algodón, asociado a un consumo eléctrico de 7,99 kWh y la generación de 0,024 kg de residuos sólidos (2,4 % del total de la fibra procesada). Además, se utiliza un cono de cartón de 0,035 kg por cada kg de hilo producido.

Este análisis permite cuantificar de manera detallada los consumos y emisiones indirectas de CO₂ asociadas a la electricidad de red, así como los subproductos generados en la limpieza

de la fibra. En conjunto, esta caracterización sustenta la evaluación de impactos ambientales mediante ReCiPe 2016 Midpoint (H), facilitando la identificación de hotspots como el elevado consumo eléctrico en maquinaria y las pérdidas de fibra durante el cardado, peinado y estirajes, y fundamenta la comparación con escenarios alternativos de energía renovable y uso de algodón orgánico.

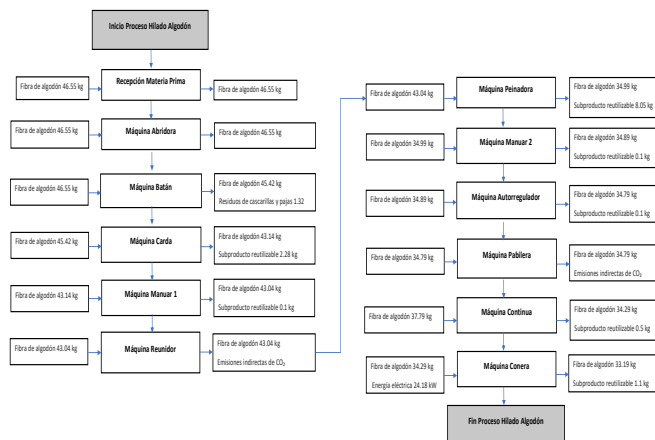


Fig. 3: Diagrama para el balance de masa y energía del proceso productivo de hilado de algodón.

B. Metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

III-A. Alcance del Estudio

III-A1. Unidad Funcional: La unidad funcional corresponde a 1 kg de hilo de algodón, que representa la cantidad estándar de producto final sobre la cual se realiza el análisis. Esta unidad permite evaluar y comparar los impactos ambientales y energéticos asociados al proceso de hilado desde una base homogénea y representativa, facilitando la interpretación y comparación de resultados en el análisis de ciclo de vida.

III-A2. Sistema de productos: Se realizará un análisis Puerta a Puerta, es decir, se incluirán únicamente los procesos que intervienen dentro de los límites del proceso de hilado del algodón, tales como:

- Recepción del algodón
- Limpieza del algodón
- Hilado del algodón
- Empaque del hilo del algodón

III-A3. Fronteras del sistema: Para el análisis Puerta a Puerta se considerará:

- La materia prima en puerta
- Entradas y salidas al proceso de producción
- Producción y abastecimiento de combustible y electricidad proveniente de fuente convencional
- El producto final

III-A4. Nivel de detalle: La data que se usará para el análisis tendrá el siguiente alcance:

- Tiempo: producción del año 2024
- Límite geográfico de la información: Arequipa – Perú
- Fuente de datos: Empresa peruana dedicada a la producción de hilos de algodón, con energía de fuente convencional

IV. METODOLOGÍA Y CRITERIO DE EVALUACIÓN

IV-A. Criterios de exclusión

Dado que el presente Análisis de Ciclo de Vida es de puerta a puerta, quedan excluidas las actividades previas a la producción y posteriores al empaque del producto final. A continuación, en la Tabla I se listan las actividades que se excluirán del presente análisis.

Tabla I: Criterios de exclusión

Actividades previas	Actividades posteriores
Extracción de la materia prima (algodón)	Distribución del producto final (kg de hilo de algodón)
Transformación de la materia prima (algodón)	Uso del producto final (kg de hilo de algodón) por los consumidores
Distribución de la materia prima (algodón)	Fin de vida del producto final (kg de hilo de algodón)

IV-B. Métodos de asignación

En la empresa peruana en Arequipa dedicada a la producción de hilos de algodón, solo se produce hilo de algodón, no existen otros coproductos. Por lo tanto, no es necesario repartir la cantidad de recursos utilizados por el sistema ni los problemas ambientales.

IV-C. Impactos Ambientales

Se identificarán los impactos ambientales de mayor relevancia y se definirán su categoría, considerando su alcance: global, regional y local y los efectos que puedan causar. A continuación, en la Tabla II se presenta la categoría del impacto en función de la escala en la que actúan.

Tabla II: Categoría de los impactos

Escala	Efecto
Global	Efecto Invernadero Adelgazamiento de la capa de ozono Consumo de recursos no renovables
Regional	Acidificación Eutrofización Formación de smog fotoquímico Toxicidad crónica
Local	Toxicidad aguda Degradación del área Disturbios de tipo físico (ruidos molestos)

ANÁLISIS CRÍTICO

a) Calentamiento Global

El análisis determinó que la producción de 1.00 kg de hilo de algodón en una empresa de Arequipa genera un total de 5.38 kg de CO₂eq, siendo el 31.04 % atribuible al consumo de energía eléctrica durante el proceso de hilado, ya que el algodón debe pasar por once máquinas para convertirse en

hilo. La fibra de algodón aporta 3.67 kg CO₂eq (68.21 %), aunque este valor no se considera en el presente análisis, dado que el alcance del ACV es de puerta a puerta.

b) Ecotoxicidad Terrestre

El análisis reveló que la ecotoxicidad terrestre es la categoría de mayor impacto ambiental en la producción de hilos de algodón. Para 1 kg de hilo, se generan 15.7 kg de 1,4-diclorobenceno (1,4-DCB) equivalentes. De este total, el 85 % proviene de la fibra de algodón (13.4 kg 1,4-DCB), el 2.4 % del cono de cartón (0.381 kg 1,4-DCB) y el 12 % del consumo eléctrico (1.95 kg 1,4-DCB). Sin embargo, dado el alcance puerta a puerta del ACV, la ecotoxicidad terrestre generada fuera de este límite no se incluye en el análisis, aunque el software SimaPro la reporte.

c) Toxicidad No Cancerígena Humana

Se detectó la generación de 8.53 kg de 1,4-diclorobenceno (1,4-DCB) en la fabricación de hilos de algodón, un hallazgo relevante por sus implicancias toxicológicas. El 1,4-DCB es un compuesto aromático utilizado en productos de limpieza y desodorizantes, pero su exposición prolongada puede causar daños en piel, ojos, vías respiratorias, hígado y riñones. No obstante, este compuesto no forma parte del proceso productivo directo analizado.

IV-C1. Generación de alternativas: A continuación, se presentan las alternativas de mejora identificadas para reducir los impactos ambientales en el proceso de producción de hilos de algodón:

■ Alternativa de mejora 1: Reemplazo de energía convencional por energía fotovoltaica.

Se propone sustituir el consumo de energía eléctrica convencional en el proceso productivo por energía generada a partir de paneles fotovoltaicos. Esta medida busca reducir los impactos ambientales, especialmente las emisiones de gases de efecto invernadero, y mejorar la sostenibilidad del proceso de fabricación de hilos de algodón.

■ Alternativa de mejora 2: Reemplazo de materia prima de algodón convencional por algodón orgánico.

Dado que los cultivos de algodón convencional hacen un uso intensivo del terreno y pueden degradarlo, además de limitar la rotación de cultivos y el acceso a alimentos para los agricultores, se propone reemplazar el algodón convencional por algodón orgánico. El algodón orgánico se cultiva con métodos sostenibles, como la rotación de cultivos y el compostaje, evitando pesticidas, fertilizantes tóxicos y semillas modificadas genéticamente. En Perú, la producción de algodón orgánico con fibra extralarga es significativa y está en crecimiento, con empresas proveedoras como Unidas S.A., Oro Blanco, Perú Naturtex Partners (PNP), Corporación Algodonera El Pacífico S.A., y Bergman Rivera.

■ Alternativa de mejora 3: Reemplazo conjunto de materia prima y energía.

Esta alternativa combina las dos anteriores, es decir, el reemplazo de la materia prima de algodón convencional por algodón orgánico y el reemplazo de la energía convencional por energía fotovoltaica, maximizando así los beneficios ambientales y sociales del proceso productivo.

IV-C2. Creación de Escenarios: A continuación, se presentan los escenarios evaluados para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la producción de hilos de algodón, utilizando el software SimaPro:

Primer escenario: Abastecimiento de energía por paneles fotovoltaicos

Se realizó el Análisis de Ciclo de Vida de la producción de hilos de algodón en el software SimaPro, modificando el abastecimiento de energía de fuente convencional por una de paneles fotovoltaicos. En la Fig 4 se presenta la red del proceso de hilado de algodón por energía fotovoltaica, así como en la Fig 5 se muestra el análisis de impacto en gráfico de barras del proceso del hilado de algodón.

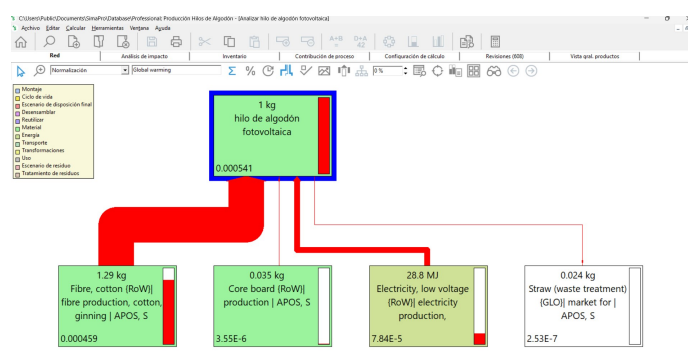


Fig. 4: Red del proceso del hilado de algodón, por energía fotovoltaica. Fuente: SimaPro.

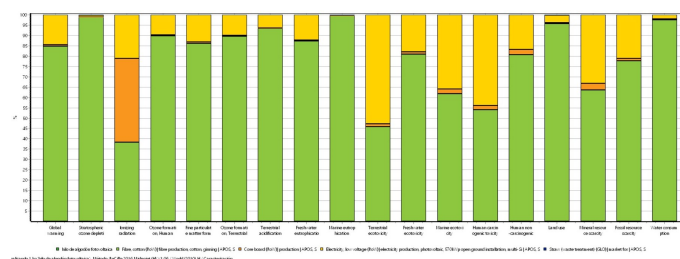


Fig. 5: Análisis de impacto en gráfico de barras del proceso del hilado de algodón, por energía fotovoltaica. Fuente: SimaPro. La evaluación del escenario fotovoltaico revela un comportamiento ambiental dual: por un lado, se constata una reducción sustancial en el impacto por calentamiento global, pasando de 5.38 kg CO₂eq a 4.33 kg CO₂ eq por kg de hilo, lo que confirma la efectividad de sustituir la electricidad convencional por una fuente renovable en términos de mitigación climática. No obstante, el análisis de las categorías de ecotoxicidad terrestre (29.3 kg 1,4-DCB) y toxicidad humana no cancerígena (9.8 kg 1,4-DCB) evidencia un incremento significativo respecto al escenario base. Este comportamiento está asociado al ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos, donde la extracción de materiales críticos (p. ej., silicio, metales pesados) y los procesos

de manufactura implican cargas ambientales no despreciables en etapas previas a su uso.

Segundo escenario: Uso de algodón orgánico y abastecimiento de energía convencional

Se realizó el Análisis de Ciclo de Vida de la producción de hilos de algodón en el software SimaPro, modificando la materia prima por algodón orgánico y manteniendo el abastecimiento de energía por fuente convencional. En la Fig.6 se muestra igualmente la red del proceso de hilado de algodón orgánico y en la Fig.7 el Análisis de impacto en grafico de barras del proceso del hilado de algodón, con algodón orgánico y energía por fuente convencional.

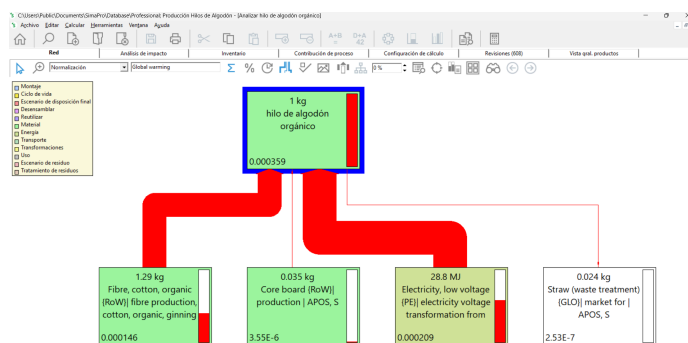


Fig. 6: Red del proceso del hilado de algodón, con algodón orgánico y energía por fuente convencional. Fuente: SimaPro.

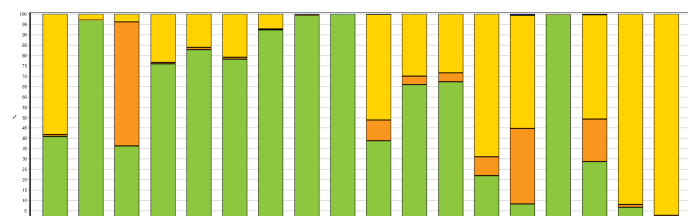


Fig. 7: Análisis de impacto en gráfico de barras del proceso del hilado de algodón, con algodón orgánico y energía por fuente convencional. Fuente: SimaPro.

En conjunto, los resultados de estas figuras destacan que la sustitución por algodón orgánico constituye una estrategia eficaz para mitigar impactos no climáticos y mejorar el perfil toxicológico del sistema. No obstante, para alcanzar una optimización integral, esta medida debe complementarse con la incorporación de energías renovables, abordando simultáneamente los impactos en calentamiento global y mejorando la sostenibilidad global del proceso de hilado.

Tercer escenario: Uso de algodón orgánico y abastecimiento de energía fotovoltaica

Se realizó el Análisis de Ciclo de Vida de la producción de hilos de algodón en el software SimaPro, modificando la materia prima por algodón orgánico y el abastecimiento de energía fotovoltaica. En la Fig.8 se muestra igualmente la

red del proceso del hilado de algodón, con algodón orgánico y energía fotovoltaica y en la Fig.9 el análisis de impacto en gráfico de barras del proceso del hilado de algodón, con algodón orgánico y energía fotovoltaica.

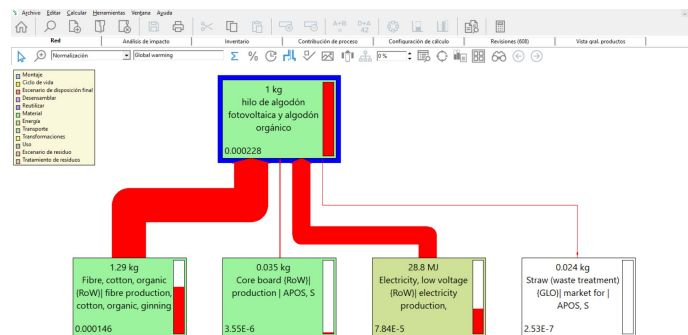


Fig. 8: Red del proceso del hilado de algodón, con algodón orgánico y energía fotovoltaica. Fuente: SimaPro.

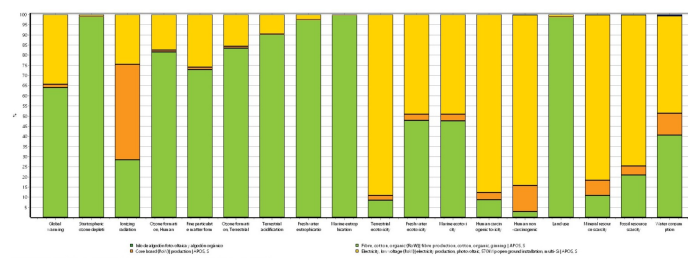


Fig. 9: Análisis de impacto en gráfico de barras del proceso del hilado de algodón, con algodón orgánico y energía fotovoltaica. Fuente: SimaPro.

El escenario que combina algodón orgánico con energía fotovoltaica representa la alternativa ambientalmente más favorable del estudio. La Fig. 8 evidencia una red de proceso optimizada que integra la reducción de impactos derivados tanto de la materia prima como de la fuente energética. La Fig. 9, por su parte, muestra una disminución marcada en todas las categorías de impacto evaluadas en comparación con los escenarios anteriores, destacando particularmente la reducción en calentamiento global, ecotoxicidad terrestre y toxicidad humana no cancerígena. En síntesis, la combinación de materia prima sostenible y energía renovable no solo reduce de manera contundente los impactos más críticos del proceso de hilado de algodón, sino que también establece un modelo replicable para la industria textil, al demostrar la efectividad de integrar simultáneamente mejoras en insumos y energía bajo el marco del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

IV-D. Análisis comparativo

Primer escenario: Comparativo entre el escenario actual (algodón convencional y abastecimiento de energía convencional) y el escenario de energía fotovoltaica

Se realizó el análisis comparativo del primer escenario, es decir, entre el ciclo de vida de la producción de hilos de algodón utilizando energía convencional frente a un proceso

con energía fotovoltaica. En la Fig.10 se muestran los resultados:

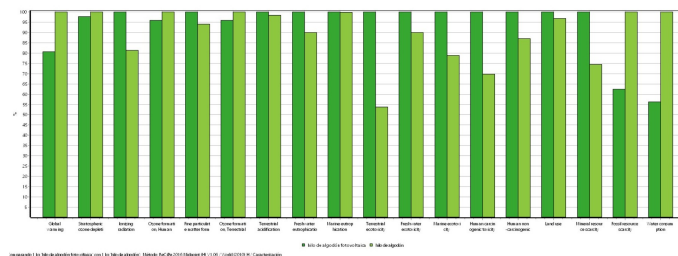


Fig. 10: Análisis comparativo en gráfico de barras del impacto del proceso de hilado de algodón, entre el escenario actual y el primer escenario. Fuente: SimaPro.

Escenario base (algodón convencional + energía convencional): Se presenta como el sistema de referencia con los mayores impactos en calentamiento global, ecotoxicidad terrestre y toxicidad humana, principalmente por el uso de energía de red con alta intensidad de carbono y la producción agrícola convencional intensiva en agroquímicos.

Segundo escenario: Comparativo entre el escenario actual (algodón y energía convencional) y el escenario de algodón orgánico y energía convencional

Se realizó el análisis comparativo del segundo escenario, es decir, entre el ciclo de vida del escenario actual (utilizando algodón y energía convencionales) y el segundo escenario (utilizando algodón orgánico y energía convencional). En la Fig. 11 se muestran los resultados:

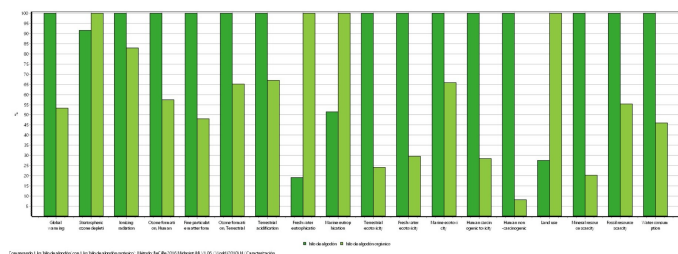


Fig. 11: Análisis comparativo en gráfico de barras del impacto del proceso de hilado de algodón, entre el escenario actual y el segundo escenario. Fuente: SimaPro.

Algodón convencional + energía fotovoltaica: Introduce una reducción significativa en el calentamiento global (COeq) debido a la sustitución de electricidad de red por energía solar. Sin embargo, se observan incrementos en ecotoxicidad y toxicidad humana, asociados a la fabricación de paneles fotovoltaicos, evidenciando un trade-off ambiental.

Tercer escenario: Comparativo entre el escenario actual (algodón y energía convencional) y el escenario de algodón orgánico y energía fotovoltaica

Se realizó el análisis comparativo del tercer escenario, es decir, entre el ciclo de vida del escenario actual (utilizando algodón y energía convencionales) y el tercer escenario (utilizando

algodón orgánico y energía con paneles fotovoltaicos). En la Fig. 12 se muestran los resultados:

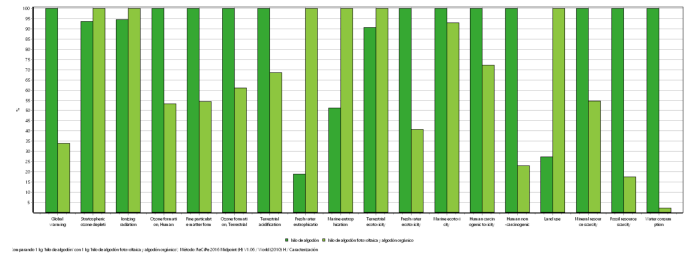


Fig. 12: Análisis comparativo en gráfico de barras del impacto del proceso de hilado de algodón, entre el escenario actual y el tercer escenario. Fuente: SimaPro.

IV-E. Evaluación de impacto de las alternativas

IV-E1. a) Aplicación de metodología: El método de punto medio (H) de ReCiPe se utilizó para la evaluación del impacto del ciclo de vida para cada escenario alternativo propuesto.

IV-E2. b) Comparación de resultados: A continuación, se presenta el análisis comparativo entre el ciclo de vida de la producción de hilos de algodón en el escenario actual (algodón convencional y fuente de energía convencional) y los tres escenarios propuestos:

- Proceso con algodón convencional y fuente de energía a través de paneles fotovoltaicos.
- Proceso con algodón orgánico y fuente de energía convencional.
- Proceso con algodón orgánico y fuente de energía a través de paneles fotovoltaicos.

En la Fig. 13 se muestran los resultados:

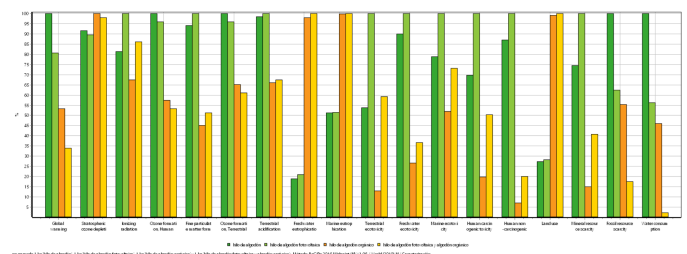


Fig. 13: Análisis comparativo en gráfico de barras del impacto del proceso de hilado de algodón, entre el proceso actual y las tres alternativas propuestas. Fuente: SimaPro.

IV-F. Interpretación de resultados

IV-F1. Análisis de resultados de las comparaciones: Como resultado del estudio comparativo entre producir hilos de algodón con energía convencional (Escenario actual); producir hilos de algodón con energía fotovoltaica (Escenario 1); producir hilos de algodón con algodón orgánico (Escenario

2); y producir hilos de algodón con energía fotovoltaica y algodón orgánico (Escenario 3), se halló que, de las 18 categorías de impacto identificadas, la producción por energía convencional obtiene los mayores impactos en 5 de ellas: calentamiento global, formación de ozono (salud humana y ecosistemas terrestres), escasez de recursos fósiles y consumo de agua.

La alternativa que combina ambas mejoras (energía fotovoltaica y algodón orgánico) tiene los mayores impactos en tres categorías: eutrofización de agua dulce, eutrofización marina (igual que la alternativa 2) y uso del suelo.

En resumen, la alternativa que consiste en solo reemplazar la fuente de energía convencional por energía fotovoltaica es la que genera los mayores impactos en un mayor número de categorías (9 de 18), siendo incluso menos sostenible que el proceso actual. Por el contrario, el proceso de producción de hilos de algodón con el uso de algodón orgánico constituye la alternativa con el menor número de categorías en las que se tiene el mayor impacto (2 de 18).

Resultados destacados por categoría priorizada:

- **Calentamiento Global:** El proceso actual genera 5.38 kg CO₂eq/kg hilo; energía fotovoltaica, 4.33 kg CO₂eq; algodón orgánico, 2.87 kg CO₂eq; energía fotovoltaica y algodón orgánico, 1.82 kg CO₂eq.
- **Ecotoxicidad Terrestre:** Energía fotovoltaica, 29.3 kg 1,4-DCB; energía convencional y algodón orgánico, 17.4 kg 1,4-DCB; proceso actual, 15.7 kg 1,4-DCB; algodón orgánico, 3.82 kg 1,4-DCB.
- **Toxicidad no cancerígena humana:** Algodón orgánico, 0.692 kg 1,4-DCB; proceso actual, 8.53 kg 1,4-DCB; energía fotovoltaica, 9.8 kg 1,4-DCB; energía fotovoltaica y algodón orgánico, 1.96 kg 1,4-DCB.

IV-F2. Consideración de Co-beneficios y Trade-offs: El reemplazo del algodón convencional por algodón orgánico es la alternativa que genera un menor impacto en un mayor número de categorías, siendo la opción más sostenible. Aunque la combinación de energía fotovoltaica y algodón orgánico ofrece la mayor reducción de emisiones de CO₂, la alternativa que contempla solo el reemplazo de la materia prima tiene un menor impacto en ecotoxicidad terrestre y toxicidad humana no cancerígena.

IV-G. Selección de la mejor alternativa

IV-G1. Criterios de selección: Para determinar la alternativa más adecuada dentro del análisis, se han definido una serie de criterios que permiten evaluar y comparar de manera integral los posibles escenarios o soluciones propuestas. Estos criterios consideran aspectos ambientales, de recursos, económicos, tecnológicos y sociales, asegurando una decisión balanceada y alineada con los objetivos de sostenibilidad del estudio.

- **Impacto ambiental:** Se consideran las categorías de impacto evaluadas y priorizadas en SimaPro, como calentamiento global, ecotoxicidad terrestre y toxicidad huma-

na no cancerígena. La alternativa que muestre menores impactos en estas categorías será prioritaria.

- **Uso de recursos:** Se evalúa el consumo energético y de materia prima. La alternativa que minimice el uso de recursos no renovables será mejor.
- **Costo-eficiencia:** Se comparan los costos de implementación, especialmente en el cambio a fuentes de energía renovables y reemplazo de algodón convencional por orgánico.
- **Viabilidad tecnológica:** La alternativa seleccionada debe ser técnicamente factible dentro de las capacidades actuales de la planta.
- **Mejoras sociales y reputacionales:** Se considera cómo la alternativa mejora la imagen de la empresa, por ejemplo, mediante certificaciones ambientales o mejoras en la comunidad.

IV-G2. Selección final: En la Tabla III se resumen los criterios de selección y el desempeño de cada alternativa:

Tabla III: Análisis de criterios para la selección de la mejor alternativa. Fuente: SimaPro / Orange Energy. Adaptado de [6].

Criterio de Selección	Alternativa 1: Energía fotovoltaica	Alternativa 2: Algodón orgánico	Alternativa 3: Algodón orgánico y energía fotovoltaica
Impacto Ambiental	Calentamiento global: 4.33 kg CO ₂ eq Ecotoxicidad terrestre: 29.3 kg 1,4-DCB Toxicidad humana no cancerígena: 9.8 kg 1,4-DCB	Calentamiento global: 2.87 kg CO ₂ eq Ecotoxicidad terrestre: 3.82 kg 1,4-DCB Toxicidad humana no cancerígena: 0.692 kg 1,4-DCB	Calentamiento global: 1.82 kg CO ₂ eq Ecotoxicidad terrestre: 17.43 kg 1,4-DCB Toxicidad humana no cancerígena: 1.96 kg 1,4-DCB
Uso de recursos	Energía fotovoltaica	Algodón orgánico	Algodón orgánico y energía fotovoltaica
Costo-eficiencia	USD 50.84/MWh	USD 6/kg algodón orgánico	USD 50.84/MWh, USD 6/kg algodón orgánico
Viabilidad tecnológica	Requiere equipos fotovoltaicos	Mantiene proceso y equipos actuales	Requiere equipos fotovoltaicos
Mejoras sociales y reputacionales	Mejora de imagen por uso de energías renovables, pero limitada por el impacto del algodón convencional.	Reconocimiento por uso de algodón orgánico, posibilidad de certificación orgánica.	Mejora de imagen por uso de energías renovables y algodón orgánico, posibilidad de certificación orgánica.

Selección final: Como resultado de la revisión de los criterios de selección, la alternativa de mejora 2 (uso de algodón orgánico) es la que tiene mejor desempeño ambiental, con el menor impacto en ecotoxicidad terrestre (3.82 kg 1,4-DCB) y toxicidad humana no cancerígena (0.692 kg 1,4-DCB). Aunque no ofrece la mayor reducción de emisiones

de CO₂, sus impactos negativos en otras categorías críticas son considerablemente menores en comparación con el uso de energía fotovoltaica, lo que la convierte en la alternativa más equilibrada y sostenible. Además, no implica cambios al proceso actual ni la adquisición de nueva maquinaria, y permite a la empresa ser reconocida por el uso de algodón orgánico, facilitando la certificación para productos orgánicos.

CONCLUSIONES

La investigación establece un marco metodológico replicable que integra materias primas sostenibles y transición energética bajo el enfoque ACV, proporcionando evidencia científica adaptada al contexto latinoamericano, revela que el hilado de algodón genera 5,38 kg CO₂eq/kg, 15,7 kg 1,4-DCB/kg (ecotoxicidad) y 8,53 kg 1,4-DCB/kg (toxicidad humana), con contribuciones dominantes de la electricidad de red (60 %) y del algodón convencional (35 %).

El sustituir algodón convencional por orgánico redujo la ecotoxicidad en 75,7 % y la toxicidad humana en 91,9 %, mientras que la energía fotovoltaica disminuyó el calentamiento global en 19,5 %, aunque incrementó ligeramente la ecotoxicidad en 86,6 % por la fase de fabricación de paneles.

El escenario combinado integrando algodón orgánico y energía fotovoltaica alcanzó una mitigación sinérgica en todas las categorías, reduciendo el calentamiento global a 1,82 kg CO₂ eq/kg, la ecotoxicidad a 3,82 kg 1,4-DCB/kg y la toxicidad humana a 0,692 kg 1,4-DCB/kg, consolidando un modelo cuantitativamente validado de descarbonización y circularidad textil basado en ACV.

V. AGRADECIMIENTOS

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas / UPC-EXPOST-2025-2.

REFERENCIAS

- [1] A. Azanaw, B. Birlie, B. Teshome, and M. Jemberie, "Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 6, p. 100230, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016422000524>
- [2] T. Demirdelen, Aksu, K. Yilmaz, D. D. Koç, M. Arian, and A. Şener, "Investigation of the carbon footprint of the textile industry: Pes- and pp-based products with monte carlo uncertainty analysis," *Sustainability*, vol. 15, no. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/19/14237>
- [3] K. Bailey, A. Basu, and S. Sharma, "The environmental impacts of fast fashion on water quality: A systematic review," *Water*, vol. 14, no. 7, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/7/1073>
- [4] K. Saha, P. K. Dey, and V. Kumar, "A comprehensive review of circular economy research in the textile and clothing industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 444, p. 141252, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624006991>
- [5] K. Laitala, I. G. Klepp, and B. Henry, "Use phase of apparel: A literature review for life cycle assessment with focus on wool," Consumption Research Norway (SIFO), Oslo and Akershus University College of Applied Sciences, Oslo, Norway, Tech. Rep. Professional Report No. 6-2017, 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/323551373>
- [6] G. Sandin, S. Roos, B. Spak, B. Zamani, and G. Peters, "Environmental assessment of swedish clothing consumption – six garments, sustainable futures," Mistra Future Fashion/RISE AB, Technical Report 2019:05, 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/335653501_Environmental_assessment_of_Swedish_clothing_consumption_-_six_garments_sustainable_futures
- [7] R. Santos and M. J. Abreu, "Impact assessment and product life cycle analysis of different jersey fabrics using conventional, post-industrial, and post-consumer recycled cotton fibers," *Sustainability*, vol. 17, no. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/13/5700>
- [8] S. T. Hora, C. Bungau, P. A. Negru, and A.-F. Radu, "Implementing circular economy elements in the textile industry: A bibliometric analysis," *Sustainability*, vol. 15, no. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/20/15130>
- [9] M. H. Akash, R. A. Aziz, C. L. Karmaker, A. M. Bari, K. A. Kabir, and A. R. M. T. Islam, "Investigating the attributes for implementing circular economy in the textile manufacturing supply chain: Implications for the triple bottom line of sustainability," *Sustainable Horizons*, vol. 14, p. 100129, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772737824000403>
- [10] A. D. La Rosa and S. A. Grammatikos, "Comparative life cycle assessment of cotton and other natural fibers for textile applications," *Fibers*, vol. 7, no. 12, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-6439/7/12/101>
- [11] F. Portillo, A. Alcayde, R. M. Garcia, M. Fernandez-Ros, J. A. Gazquez, and N. Novas, "Life cycle assessment in renewable energy: Solar and wind perspectives," *Environments*, vol. 11, no. 7, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3298/11/7/147>
- [12] B. Harsanto, I. Primiana, V. Sarasi, and Y. Satyakti, "Sustainability innovation in the textile industry: A systematic review," *Sustainability*, vol. 15, no. 2, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/1549>
- [13] ISO, "Iso 14040:2006, Environmental management – life cycle assessment – principles and framework," 2006.
- [14] A. Amato, K. Tsigkou, A. Becci, F. Beolchini, N. M. Ippolito, and F. Ferella, "Life cycle assessment of biomethane vs. fossil methane production and supply," *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4555, 2023.
- [15] ISO, "Iso 14044:2006, Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines," 2006.
- [16] J. M. Pires, "Life cycle assessment of biogas production," *Renewable Energy*, vol. 182, pp. 121–135, 2021.
- [17] A. Smith *et al.*, "Comparative lca of cooking systems: Biogas, lpg, and firewood," *Energy Policy*, vol. 148, p. 111932, 2022.
- [18] F. Valente, "Methodology for lca: Key aspects and challenges," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 2156, 2021.
- [19] S. Hellweg and L. M. i Canals, "Emerging approaches in life cycle assessment," *Science*, vol. 344, no. 6188, pp. 1109–1113, 2014.
- [20] M. Z. Hauschild and R. K. Rosenbaum, *Life Cycle Impact Assessment*. Springer, 2018.
- [21] J. Guinée *et al.*, "Life cycle assessment: Past, present, and future," *Environmental Science Technology*, vol. 45, no. 1, pp. 90–96, 2011.
- [22] K. Vogtländer, *A Practical Guide to LCA for Students, Designers and Business Managers*. VSSD, 2010.
- [23] B. Weidema *et al.*, "Overview and methodology: Data quality and uncertainty in life cycle inventories," *International Journal of LCA*, vol. 10, no. 3, pp. 145–158, 2005.
- [24] L. Goedkoop *et al.*, "Recipe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Tech. Rep., 2013.

- [25] M. A. Curran, *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products*. Wiley, 2012.
- [26] P. D. Benedetto and C. Klemeš, *The Environmental Impact of Products: LCA Methodology*. Elsevier, 2020.
- [27] F. Pennington, “Guidelines for impact category selection in lca,” *Environmental Science Technology*, vol. 32, no. 5, pp. 1147–1153, 1998.