

Revista de la
FACULTAD de
CIENCIAS

Revista de la Facultad de Ciencias
ISSN: 2357-5549
revista_{fc_med}@unal.edu.co
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

CUASAPUD BELALCÁZAR, SANDRA MILENA; HENAO DUQUE, ÁNGELA MILENA; RODRÍGUEZ GÓMEZ, CAMILA; CANO LONDOÑO, NATALIA ANDREA
MINIMIZACIÓN DE IMPACTOS A TRAVÉS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LA TELA DE ALGODÓN[1]

Revista de la Facultad de Ciencias, vol. 8, núm. 1, 2019, Enero-Junio, pp. 57-72
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v8n1.68931>

- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org



MINIMIZACIÓN DE IMPACTOS A TRAVÉS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LA TELA DE ALGODÓN^a

MINIMIZATION OF IMPACTS THROUGH OPTIMIZATION OF THE LIFE CYCLE OF COTTON FABRIC

SANDRA MILENA CUASAPUD BELALCÁZAR^b, ÁNGELA MILENA HENAO DUQUE^c, CAMILA
RODRÍGUEZ GÓMEZ^d, NATALIA ANDREA CANO LONDOÑO^e

Recibido 21-11-2017, aceptado 17-09-2018, versión final 30-10-2018.

Artículo Investigación

RESUMEN: El algodón es la fibra natural más importante del mundo textil (principal insumo), mundialmente representa unos de los productos básicos en la economía de más de 100 países, aproximadamente 150 países lo exportan o importan, sin embargo, su cultivo se considera como uno de los más intensivos en la actualidad, puesto que requiere grandes cantidades de agua, pesticidas y fertilizantes, generando importantes impactos al medio ambiente, entre los más relevantes están: daño a la salud humana, daño a los ecosistemas y daño a la disponibilidad de recursos; además, se contemplan los impactos que genera el proceso que se requiere para la producción de la tela de algodón. Para la minimización de los impactos de la cadena productiva de la tela de algodón se realiza un análisis del ciclo de vida consecuencial al proceso de cuna a puerta usando el software Umberto NTX LCA y la metodología ReCiPe con información secundaria. La categoría más impactada es: disponibilidad de recursos no renovables, esta categoría presenta un impacto de 212.14 puntos con una diferencia de 84.3 puntos respecto a la categoría de menor impacto (calidad de ecosistema, 127.84 puntos); debido a la energía que requiere la maquinaria para su funcionamiento; la segunda más impactada es salud humana con impactos por formación de material particulado (47.57 puntos) y toxicidad humana (29.17 puntos). Con las mejoras realizadas al proceso se tiene una reducción de 53.01 puntos con 25.06, 18.2 y 9.75 de mejora en las categorías recursos, salud humana y calidad del ecosistema, respectivamente.

PALABRAS CLAVE: Algodón; análisis de ciclo de vida; impactos ambientales.

ABSTRACT: Cotton is the most important worldwide natural fiber because is the principal entrance in the textile sector, representing one of the economic basic products in more than 100 countries that import and export the fiber (Comité Consultivo Internacional del Algodón, 2012). However, cotton has one of the most intensive crops in the world because it requires large amount of water, pesticides and fertilizers. It generates big impacts to the environment, principally to the Human Health, Ecosystemic Damage, and Resources Scarcity. This paper considers the impacts

^aCuasapud, S. M.; Henao, A. M.; Rodríguez, C. & Cano, N. A. (2018). Minimización de impactos a través de la optimización del ciclo de vida de la tela de algodón. *Rev. Fac. Cienc.*, 8(1), 57–72. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v8n1.68931>

^bIngeniera ambiental, Universidad Nacional de Colombia. smcuasapudb@unal.edu.co

^cIngeniera ambiental, Universidad Nacional de Colombia. amhenaod@unal.edu.co

^dIngeniera ambiental, Universidad Nacional de Colombia. camrodriguezgom@unal.edu.co

^eIngeniera ambiental, Universidad Nacional de Colombia. nacanol@unal.edu.co

associated to the cotton cultivation and to the cotton fabric production. The life cycle assesment is implemented, to minimize the cotton fabric productive chain impacts, using Umberto NTC LCA software and ReCiPe methodology for a cradle to gate process of secondary information sources. Resources availability is the most impacted category, because the large amounts of non-renewable resources used in the cotton fabric process. This category has 212.14 impact points with 84.3 points of difference with the least impact category (ecosystem quality, 127.84 points). The difference is explained by the high amount of energy required for the machinery operation. The second greatest impacted category was human health. This category has high results in PM formation (47.57 points) and human ecotoxicity (29.17 points) because the pesticides use in the crop stage. A reduction of 53.01 impact points in all the LCA, 25.06 , 18.2 and 9.75 in resources, human health and ecosystem quality, respectively, was possible with the improvements in the process.

KEYWORDS: Cotton fabric; life-cycle assessment; environmental impacts.

1. INTRODUCCIÓN

El algodón es la fibra natural más importante en el mundo a nivel textil puesto que representa la mitad de todas las fibras utilizadas en el mundo, dadas sus características únicas de durabilidad, resistencia y absorción gracias a su composición celulósica (Alonso Felipe, 2015). Para el 2012 la producción mundial de algodón fue de 25.10 millones de toneladas métricas, con una participación del 77 % por China, Estados Unidos, India, Brasil y Pakistán. Se estima que el consumo mundial anual de algodón hasta el 2022 aproximadamente sea de 3.5 kg per cápita al año (FAO, 2013). En Colombia, esta producción se estimó en 45 toneladas métricas de fibra para el año 2011 (Comité Consultivo Internacional del Algodón, 2012) y para el año 2010 la industria textil aportó 414 millones de dólares al país, teniendo un crecimiento del 211 % desde 1990 convirtiéndose el sector textil una de las principales locomotoras de la economía en Colombia, puesto que para el año 2013 esta industria ha representado más del 3 % del total del PIB. Sin embargo, el cultivo del algodón es uno de los más intensivos y exigentes respecto a las condiciones para su desarrollo, causado principalmente por el uso de pesticidas químicos, fertilizantes y estimulantes del crecimiento en grandes cantidades, generando importantes consecuencias sobre el recurso hídrico, edáfico, atmosférico y a la salud humana (Pfister *et al.*, 2009).

La afectación principal al recurso edáfico es causada principalmente por la erosión excesiva del suelo dada la mecanización de los procesos agrícolas; detrimento del recurso hídrico y atmosférico por la cantidad de agua necesaria para suplir el riego en la etapa de cultivo y emisión de material particulado en el proceso de recolección y desmotado. Por ello se hace necesaria la identificación de los impactos generados durante todo el proceso productivo de la tela de algodón y se hace uso del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como herramienta metodológica para la valoración de éstos, con el objetivo de implementar estrategias de mejora con miras a la reducción de esos impactos dentro de las categorías de: calidad del ecosistema, daño a la salud humana y uso de recursos. Dichas mejoras, se realizan en las etapas más críticas del cultivo de algodón y la producción del textil, a través de la reducción de las entradas energéticas e hídricas en el ciclo. Esto,

mediante la aplicación del ACV al proceso de cuna a puerta usando el software Umberto NTX LCA a partir de información secundaria. La metodología elegida para el estudio es el ACV consecuencial, el cual se orienta al cambio en las etapas del sistema productivo que supone mejoras a los impactos generados por la unidad funcional que se está estudiando, no sólo enfocándose simplemente a los resultados obtenidos por la producción del textil, como lo hace el análisis atribucional.

2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMO HERRAMIENTA PARA LA VALORACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES EN LA INDUSTRIA TEXTIL

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología mundialmente aceptada para la evaluación de impactos ambientales en la generación de bienes y servicios (Chen *et al.*, 2013) a lo largo de su vida útil y las diferentes etapas de su producción. Esta metodología permite cuantificar y comparar los impactos en distintas categorías de impacto ambiental, para la toma de decisiones, en la implementación de estrategias y políticas que permitan la reducción de carga ambiental a lo largo de todo el proceso de producción.

Diversos estudios se han desarrollado en torno a la valoración de los impactos ambientales en la producción de algodón a nivel mundial mediante diferentes metodologías de análisis. Bevilacqua *et al.* (2014) presentan diversos escenarios para la fabricación de la hilatura de algodón, en donde la productividad de estos modifica el valor del impacto ambiental, pues los mayores impactos son generados en la etapa de blanqueado e hilado, con valores iguales a 1.24 kgCO₂-eq y 0.64 kgCO₂-eq, respectivamente. Mientras otros autores como Muruges & Selvadass (2013a) y PE Iinternational AG (2014) centran sus estudios solo en la etapa de cultivo del algodón. Los primeros autores analizan el proceso en África, usando como unidad funcional 1000 kg de hilas de algodón mediante la metodología CML, con las categorías de cambio climático, acidificación y eutrofización. El segundo autor, compara la producción de hilas de algodón orgánico y convencional de forma general usando las categorías de calentamiento global, acidificación, toxicidad humana, entre otras. A la fecha ningún autor ha implementado la metodología del ACV para analizar todas las etapas de la producción de la tela de algodón, desde la cuna de la cadena productiva (plantación y cultivo de semillas) hasta la puerta (tela de algodón).

Otro de los métodos para evaluar impactos fue desarrollado por Zahedi *et al.* (2013) en Irán, utilizando la metodología de Valoración Económica de los Impactos del cultivo de algodón, a través de encuestas personales a los productores de la región. Adicional a ello, se han hecho estudios para evaluar impactos sobre recursos específicos como el agua; un ejemplo de este, es el realizado por Hoekstra *et al.* (2005) donde evalúan los impactos sobre el recurso hídrico en los países donde las semillas son cultivadas. El Análisis por Redes Ecológicas o ENA (por sus siglas en inglés Ecological Network Analysis) ha sido también ampliamente utilizado en sistemas agropecuarios; esta metodología tiene como objetivo mejorar la producción agrícola con la mínima cantidad de recursos, su análisis se realiza dentro de un contexto

de ecosistema como un sistema complejo y estructurado, analiza las interacciones y relaciones entre las especies de un ecosistema a través de los flujos de energía (Stark *et al.*, 2016).

3. METODOLOGÍA

El Análisis de Ciclo de Vida es un marco de referencia para estimar y evaluar los impactos ambientales atribuibles al ciclo de vida de un producto, como cambio climático, daño en la capa de ozono, creación de ozono troposférico, eutrofización, acidificación, entre otros. Según el conjunto de normas ISO 14040, éste consta de cuatro etapas fundamentales: definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impactos e interpretación de resultados (International Standard, 1997); las cuales, sirven para dejar en claro todas las consideraciones hechas a la hora de hacer el análisis y la repercusión que éstas tienen sobre los impactos en las diferentes categorías escogidas.

3.1. Alcances y límites del sistema

El sistema y los impactos son considerados dentro del alcance de cuna a puerta, incluyendo la etapa de siembra y cosecha del algodón, y en la producción de fibra y textil, tomando como ejemplo el alcance dado por Textile Exchange (2014) y Van der Velden *et al.* (2014), donde se determinan éstos como límite del proceso de producción del textil. No se incluye un alcance mayor debido a los múltiples usos que se le da a la tela de algodón, y los subprocesos que se emplean en éstos; además, del uso de fuentes de información secundaria disponibles para el público. No se incluye la producción de coproductos o subproductos derivados del proceso de fabricación de la tela de algodón en este análisis, ya que implica la adición de nuevos procesos y cargas ambientales que no están ligados directamente a la cadena productiva de la tela de algodón, su pertinencia en el ACV realizado radica en que éstos pueden pasar de ser residuos de los procesos a ser insumos o sustitutos de un producto, como es el caso de la fabricación de aceite a partir de las semillas, dando como resultado una reducción en la carga ambiental en la producción de la tela de algodón.

3.2. Unidad funcional

La unidad funcional elegida para este estudio es de 1000 kg de tela de algodón que se producirán en una hectárea de cultivo de algodón, basado en lo propuesto por Chen *et al.* (2013), y teniendo en cuenta la proporción entre la cantidad de tela y el número de hectáreas presentadas por International Trade Center (International Trade Center, 2011). Cabe resaltar que estos valores son tomados como promedios y su relación varía dependiendo de las condiciones geográficas, climáticas y la eficiencia tanto en la producción como en el cultivo de la semilla.

La producción de la UF (Unidad Funcional) se hará a partir de 225000 unidades de semilla *G. hirsutum*, 20 kg aproximadamente (Lopez *et al.*, 2015). La semilla *G. hirsutum* es usada más comúnmente en América

Central y el Caribe, y es responsable del 90% de la producción mundial de algodón (Pérez *et al.*, 2008), siendo la utilizada por los principales productores de la fibra.

3.3. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de la tela de algodón cuenta con cuatro etapas principales: materias primas, cultivo del algodón, producción de la fibra y producción de la tela como se muestra en la Figura 1. Dentro de la etapa de materias primas se incluyen los insumos iniciales del sistema, tierra cultivable, agua, semillas, energía y herbicidas. La etapa de cultivo cuenta con tres subetapas: siembra o establecimiento del cultivo, cultivo y recolección mecánica junto con una etapa intermedia de transporte de la zona de cultivo a la fábrica (Kalliala & Nousiainen, 1999); siendo ésta, la única etapa de transporte a tener en cuenta, debido a que se considera que los procesos de manufactura se harán dentro de la misma fábrica. La tercera etapa, está relacionada con la producción de la fibra de algodón, la cual contiene dos subetapas, el desmotado o separación de las semillas y sus impurezas, y la producción de las fibras de algodón (Textile Exchange, 2014), en esta etapa el algodón es secado y convertirlo en un cordón. Como etapa final, se encuentra la producción de la tela de algodón, que cuenta con nueve sub etapas consecutivas: hilado, tejido, descolado, fregado, blanqueo, lavado, tintura, secado y embalaje (Kalliala & Nousiainen, 1999). Es de resaltar que en el presente estudio no se tiene en cuenta los procesos de tintura y embalaje, debido a los múltiples usos potenciales que tiene la Unidad Funcional (1000 kg de tela de algodón) y teniendo en cuenta que posteriormente será procesada para tales objetivos.

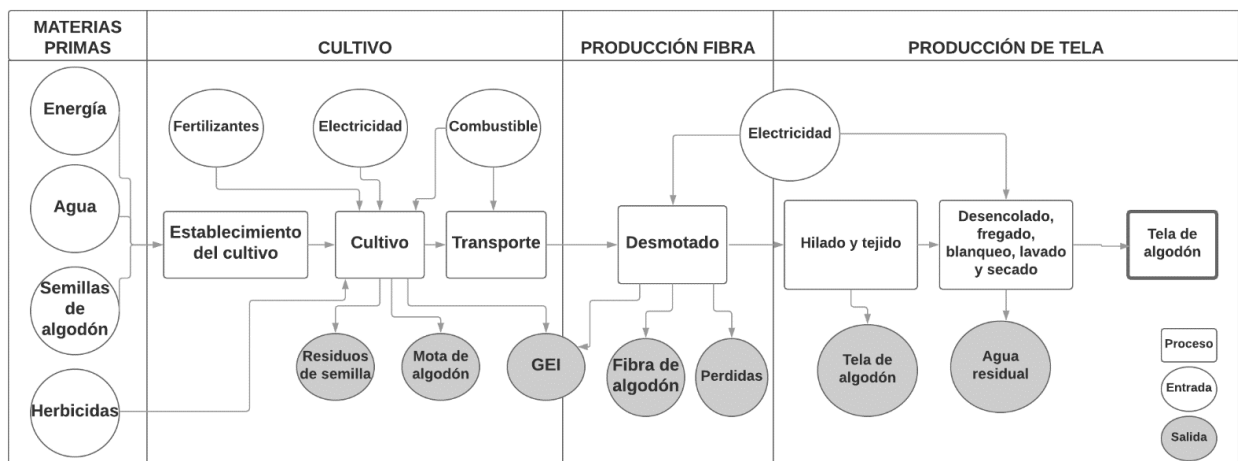


Figura 1: Proceso de la fabricación de tela de algodón. Fuente: Elaboración propia con base en Kalliala & Nousiainen (1999) y Textile Exchange (2014).

3.4. Consideraciones

Dentro del estudio sólo se considerará una subetapa de transporte, entre el desmotado y la producción de las fibras, tomando como estándar una distancia del cultivo a la fábrica de 100 km; los procesos posteriores

se llevarán a cabo en la misma fábrica. La cantidad de semillas que se van a tener disponibles para la siembra es de 225000 semillas para cada hectárea, ya que la cantidad en los cultivos específicos varía entre 150000 y 300000 semillas por hectárea, dependiendo del método de cultivo (Lopez *et al.*, 2015). Sólo es aprovechable el 38% del cultivo de algodón que sale como mota, mientras que el otro 62% es la semilla restante, además entre el desmotado y el hilado se supone una pérdida del 10% de las motas de algodón (Wdowiak *et al.*, n.d.; Comité Consultivo Internacional del Algodón, 2012).

3.5. Categorías de impacto

Las categorías y subcategorías de análisis escogidas se seleccionaron cruzando los estudios de Bevilacqua *et al.* (2014) y (Murugesh & Selvadass, 2013b) que utiliza la metodología IPCC 2007 y Ecoindicador99; Kalliala & Nousiainen (1999), (Marincovic *et al.*, 2011) y Textile Exchange (2014) con la metodología TRACI y Barnes *et al.* (2010) que utilizan la metodología CML, que se describen en la sección 2. Se toman las categorías más relevantes de estos estudios que se asocian a diferentes fases de la producción para poder abarcar la extensión del análisis; además, se tiene en cuenta el uso de pesticidas y fertilizantes, el uso del suelo para cultivo, el uso de agua para riego, el consumo de energía eléctrica y combustibles fósiles que requeridos en las diversas etapas del proceso para seleccionarlas. La carga ambiental asociados a la producción de la tela de algodón se cuantifica mediante la clasificación de subcategorías y categorías de impacto, con el software Umberto, para el cual se usó la Base de Datos Ecoinvent 3 (v3.1) y la metodología ReCiPe por su fácil interpretación, su amplia aceptación, solidez científica y enfoque orientado al daño ambiental. La metodología ReCiPe agrupa las subcategorías seleccionadas como indicadores *midpoint* para los efectos intermedios y las categorías agregadas como indicadores *endpoint* para los efectos finales o agregados, estas herramientas entregan los resultados en las unidades equivalentes de medida de cada subcategoría de impacto, así como puntos ponderados por categoría, lo que permiten la comparación entre las misma. Dentro de la metodología, los procesos de normalización y ponderación transforman los resultados a unidades neutras comparables que permiten determinar la contribución del daño por categorías, ReCiPe utiliza factores de normalización a nivel de Europa y el mundo y ponderación media, que no compromete la validez del presente análisis debido al alcance y generalidad de éste.

3.6. Inventario del Análisis de ciclo de Vida (ICV)

La información que se presenta a continuación corresponde a los datos tomados de bibliografía variada a nivel mundial, que no corresponde únicamente a información relacionada con el análisis de ciclo de vida y que comprende otro tipo de información como estudios relacionados con los cultivos, como el caso de Bartl (2009), Cotton Counts (n.d.), Hasan & Kane (2010), Infoagro (n.d.), Lopez *et al.* (2015), Mateus (2012) y Secretaría General del Medio Rural y Producción Ecológica (2009). Esto, debido a que proveen la información necesaria para simular un cultivo y las mejoras posibles de éste como se muestra en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 1: Materias primas y cultivo. Fuente: Elaboración propia con base en las referencias citadas en el artículo.

Entrada	Valor	Referencia
Agua para riego	6500 m ³ /ha	(Infoagro, n.d.)
Abono	N2 60 UF P2O5 25 UF K2O 47 UF	(Infoagro, n.d.)
Fertilizante	N2 300 UF/ha P2O5 250 UF/ha K2O 250 UF/ha	(Infoagro, n.d.)
Herbicidas y pesticidas	Diuron 1.0-1.5 kg/ha Trifluralina 3-4.5 L/ha componente activo (0.1 kg/L) Fluormeturón 1.5-2.5 kg/ha Pendimetalín 3.5-4.5 L/ha componente activo (0.330 kg/L) MSMA (monosodium methanearsonate) 3-6 L/ha componente activo (0.222 kg/L) Alacloro 3.5-4.5 L componente activo (0.480 kg/L) Perfluidone 3.5-5 kg/ha	(Mateus, 2012; Rodríguez, 1988)
Semillas de algodón	225000 semillas /ha Aproximadamente 20 kg	(Lopez <i>et al.</i> , 2015)
Energía	Subsolador 1291.97 MJ/ha Cosechadora de algodón: 1109.80 MJ/ha	(Secretaría General del Medio Rural y Producción Ecológica, 2009)
Combustibles fósiles	Subsolador 2.3 galones de gasoil/h/ha Cosechadora de algodón 495.1 l/ha	(OAS, n.d.; Zahedi <i>et al.</i> , 2013)
Transporte	100 km desde el cultivo a la planta textilera	
Tierra arable	1 ha	
Salida	Valor	Referencia
Semilla de algodón (desecho)	1795 kg	(Cotton Counts, n.d.) Para estas cantidades se tomó que el 38 % de la planta de algodón es aprovechable como mota.
Emisiones del cultivo	2000 kg CO ₂	

UF: unidad de fertilización (kg)

Tabla 2: Producción fibra de algodón. Fuente: Elaboración propia con base en las referencias citadas en el artículo.

Entrada	Valor	Referencia
Energía	Desmotadora 29000 MJ/ha Hilado 89000 MJ/ha Trenzadora 32000 MJ/ha	(Bartl, 2009)
Mota de algodón	1100 kg	
Salidas	Valor	Referencia
Pérdidas de algodón	100 kg	Se tomó como el 10 % de lo que entra en motas de algodón
Tela de Algodón	1000 kg	

Tabla 3: Producción de tela de algodón. Fuente: Elaboración propia con base en las referencias citadas en el artículo.

Entrada	Valor	Referencia
Energía	Desencolado 3500 MJ/ha Fregado 17000 MJ/ha Blanqueado 26000 MJ/ha Secado 12000 MJ/ha	(Hasan & Kane, 2010)
Agua	Blanqueado 14.7 m ³ Fregado 5.5 m ³	
Tela de algodón	1000 kg	
Salidas	Valor	Referencia
Agua contaminada	Suma de los procesos 28.4 m ³	
Tela de algodón lista	1000 kg	Unidad funcional elegida

4. RESULTADOS

Se analiza el ciclo de vida del algodón en el software Umberto, con la metodología ReCiPe que utiliza los indicadores *midpoint* y *endpoint*, estos últimos son las categorías agregadas: daño a la salud humana, daño a los ecosistemas y daño a la disponibilidad de recursos; si bien estas categorías facilitan el entendimiento en términos finales del impacto ambiental, se debe tener en cuenta que éstas incluyen una incertidumbre debido a que la complejidad de los procesos puede no estar incluida totalmente en las subcategorías evaluadas y subjetividad asociada al enfoque metodológico desarrollado.

Los resultados de las categorías y subcategorías evaluadas se muestran en la Tabla 4. Se resalta el uso del enfoque jerárquico debido a su amplia utilización en los Análisis de Ciclo de Vida, su racionalidad se fundamenta en evitar la mayoría de problemas haciendo un balance a corto y largo plazo de los efectos posibles (Vivancos *et al.*, 2005), para los procesos de cultivo, esta perspectiva engloba situaciones próximas de agotamiento del recurso y las materias primas, para el caso de estudio se relacionaría con el agua y la energía,

además este enfoque es considerado el modelo por defecto. La metodología brinda los resultados en puntos ponderados, lo que permite compararlos entre categorías, y comparar las subcategorías dentro de éstas.

Tabla 4: Resultados del proceso por categoría y subcategoría de impacto. Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en el ACV en el software Umberto.

Categoría	Subcategoría	Puntos
Calidad ecosistema		127.84
	Ocupación de tierra por agricultura	60.42
	Cambio climático	58.61
	Ecotoxicidad acuática	0.07
	Eutrofización	0.14
	Acidificación terrestre	0.24
	Ecotoxicidad terrestre	0.80
Salud humana		178.41
	Cambio climático	92.73
	Toxicidad humana	29.17
	Agotamiento capa de ozono	0.08
	Formación de material particulado	47.57
	Oxidación fotoquímica	3.06
Recursos		212.14
	Agotamiento combustibles fósiles	182.65
	Agotamiento metales	29.50
Total		518.39

La Tabla 4 muestra que la categoría general más impactada es recursos con mayor influencia de combustibles fósiles, seguida de la categoría salud humana donde se muestran relevantes las subcategorías de cambio climático y la formación de material particulado. La ocupación de tierra por los cultivos de algodón es la subcategoría más importante dentro de la calidad del ecosistema. Impactos como ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre y eutrofización tienen menor importancia dentro del Análisis del Ciclo de Vida de la tela de algodón.

Los resultados contienen a todas las fases productivas de la tela de algodón ya descritas, y por tanto la carga ambiental asociada a la categoría calidad de ecosistema que está altamente influenciadas por el uso de herbicidas, pesticidas y fertilizantes es menor a la de la categoría recursos, ya que en todas las fases se da una alta demanda agua y energía, esta última en forma de electricidad y combustible.

A partir de estos resultados se plantea la implementación de mejoras en la producción de la tela de algodón teniendo en cuenta el agua y la energía como los insumos críticos por tener alta demanda en las diferentes fases productivas, y se realiza una comparación de los resultados posteriormente. Se resalta además la

posibilidad de incluir mejoras como la reducción de fertilizantes, herbicidas y pesticidas en estudios específicos, debido a los impactos de la etapa de cultivo en la fabricación de la tela de algodón.

5. MEJORAS

El riego por goteo puede reducir la cantidad de agua utilizada por al menos 30 % en comparación con los sistemas de inundación o surcos más eficientes, y es probable que sea mucho más alta en comparación con muchos sistemas de inundación o surcos que funcionan mal (Bevilacqua *et al.*, 2014), por lo que supone una disminución de 2000 m³/ha, quedando en una cantidad de 4500 m³/ha. El consumo energético en los procesos se puede reducir según algunos fabricantes de maquinaria textil en un 10 % para cada unidad, por lo cual en cada una de las etapas que se usan energía se disminuirá este valor (Bevilacqua *et al.*, 2014). La Tabla 5 ilustra la comparación de los valores de entradas y salidas con y sin mejoras, para facilitar la interpretación del porcentaje de dichas mejoras. Luego de realizar las mejoras mencionadas se tienen los resultados por categorías y subcategorías de impacto como se muestra en la Tabla 6 y que se resume en la Tabla 7 mediante la normalización de los resultados para ambos escenarios (mejoras y sin mejoras).

Tabla 5: Mejoras al proceso. Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en entradas y salidas con y sin mejoras.

Entrada/ Salida	Valor inicial	Valor mejora	Porcentaje cambio
Agua para riego	6500 m ³ /ha	4500 m ³ /ha	30 %
Energía para cultivo	Subsolador 1291.97 MJ/ha	Subsolador 1162.77 MJ/ha	10 %
	Cosechadora de algodón: 1109.80 MJ/ha	Cosechadora 998082 MJ/ha	10 %
Energía en producción de fibra de algodón	Desmotadora 29000 MJ/ha	Desmotadora 26100 MJ/ha	10 %
	Hilado 89000 MJ/ha	Hilado 80100 MJ/ha	10 %
	Trenzadora 32000 MJ/ha	Trenzadora 28800 MJ/ha	10 %
Energía tela de algodón	Desencolado 3500 MJ/ha	Desencolado 3150 MJ/ha	10 %
	Fregado 17000 MJ/ha	Fregado 15300 MJ/ha	10 %
	Blanqueado 26000 MJ/ha	Blanqueado 23400 MJ/ha	10 %
	Tinte 77000 MJ/ha	Tinte 69300 MJ/ha	10 %
	Secado 12000 MJ/ha	Secado 10800 MJ/ha	10 %

Realizando las mejoras anteriormente descritas e incluyendo las semillas sobrantes como materia prima para la producción de aceite, se da cuenta que en todas las categorías se da una disminución en los puntos de impacto de cada uno de los procesos. El total de impacto del ciclo de vida del algodón tiene una reducción de 53.01 puntos con 25.06, 18.2 y 9.75 de mejora en las categorías recursos, salud humana y calidad del ecosistema, respectivamente como se muestra en la Figura 2.

Tabla 6: Resultado del proceso con mejoras. Fuente: Elaboración propia a partir de la normalización de los resultados.

Categoría	Subcategoría	Puntos
Calidad ecosistema		118.09
	Ocupación de tierra por agricultura	58.56
	Cambio climático	51.71
	Ecotoxicidad acuática	0.06
	Eutrofización	0.13
	Acidificación terrestre	0.22
	Ecotoxicidad terrestre	0.79
Salud humana		160.21
	Cambio climático	81.82
	Toxicidad humana	26,62
	Agotamiento capa de ozono	0.08
	Formación de material particulado	43.21
	Oxidación fotoquímica	2.76
Recursos		187.08
	Agotamiento combustibles fósiles	163.63
	Agotamiento metales	26.45
Total		465.38

Tabla 7: Resultados de subcategorías con y sin mejoras normalizados. Fuente: Elaboración propia.

Subcategorías	Sin mejoras	Con mejoras	Unidad de normalización
Ocupación del suelo agrícola	793.00	735.02	m ² a
Cambio climático	3344.8	2951.28	kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicidad agua	135.49	110.81	kg 1.4-DBC-Eq
Eutrofización	1.41	1.28	kg P-Eq
Toxicidad humana	2281.37	2093.53	kg 1.4-DBC- Eq
Transformación del suelo natural	1.00	0.95	m ²
Agotamiento del ozono	2.05E-03	1.98E-03	kg CFC-11-Eq
Formación de material particulado	8.99	8.17	kg PM10-Eq
Formación de oxidantes fotoquímicos	16.45	14.8	kg NMVOC
Acidificación terrestre	18.54	16.97	kg SO ₂ -Eq
Eco-toxicidad terrestre	2.43	2.40	kg 1.4-DBC-Eq
Agotamiento del agua	6060.67	4240,13	m ³

La optimización en un 10% de los procesos energéticos y 30% en consumo de agua tiene un impacto significativo en las subcategorías de cambio climático, tanto para calidad del ecosistema como recursos, y en el agotamiento de combustibles fósiles, con 6.9, 10.91 y 19.02 puntos, respectivamente. Esta última, es la subcategoría con mayor disminución en sus impactos, lo que sugiere que los procesos de producción agrícola

están ligados en buena medida al consumo de combustibles fósiles en sus distintas etapas, aunque no deja de ser la subcategoría más críticamente impactada ya que hay utilización de maquinaria en los procesos de producción de fibra y producción de tela.

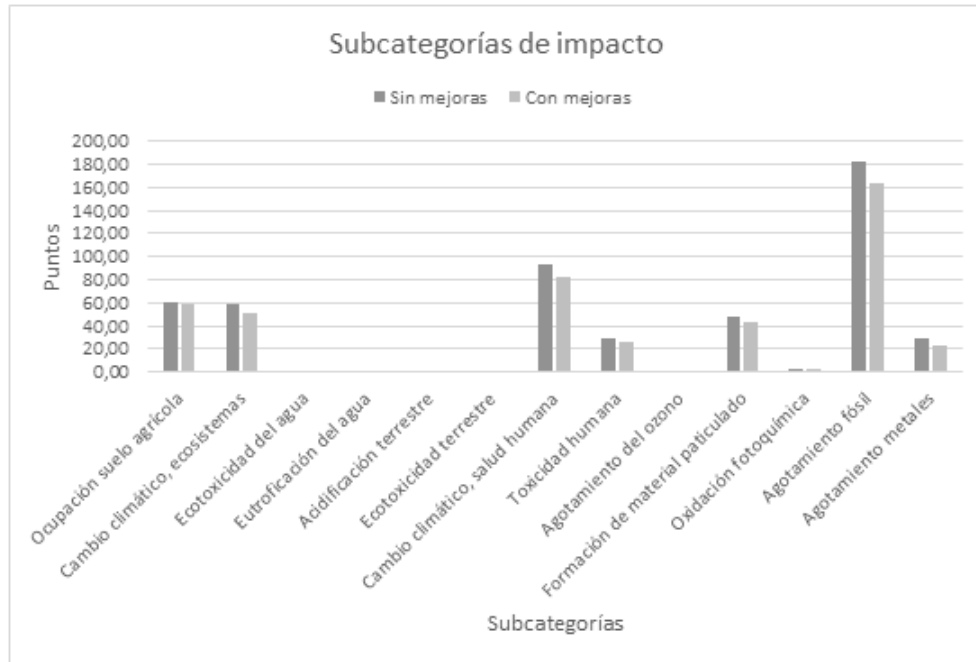


Figura 2: Comparación en puntos de las subcategorías de impacto. Fuente: Elaboración propia.

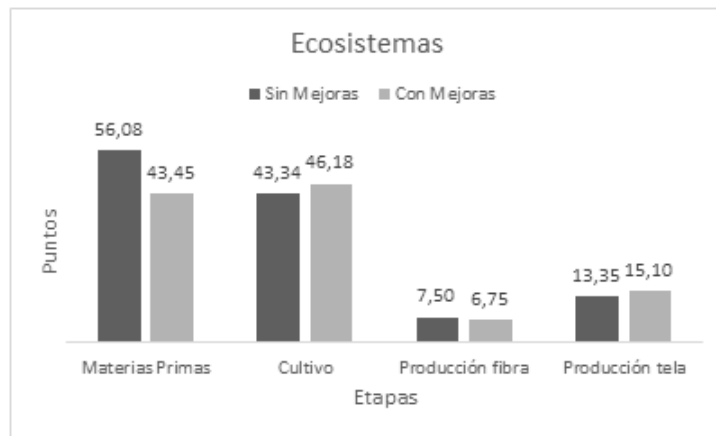


Figura 3: Categoría daño a los ecosistema por etapas de producción. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 3, 4 y 5 presentan una disminución en las etapas de materias primas y producción de fibra, debido a que las mejoras realizadas en el proceso se centran en estas dos etapas. Por lo anterior, las etapas de cultivo y producción de tela cobran mayor importancia dentro de todo el proceso y aumentan sus puntos

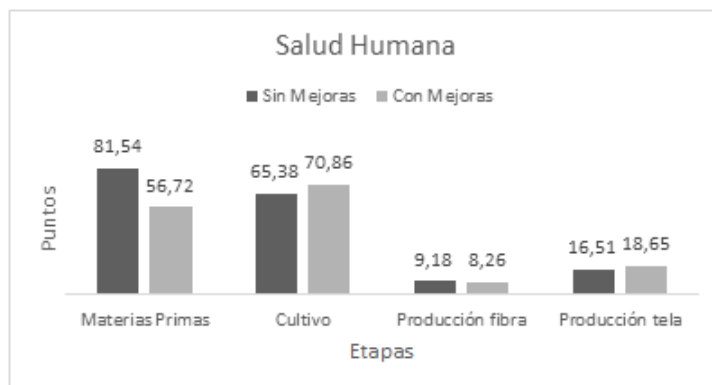


Figura 4: Categoría daño a la salud humana por etapas de producción. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5: Categoría daño a la disponibilidad de recursos por etapas de producción. Fuente: Elaboración propia.

de impacto en las tres categorías: ecosistemas, salud humana y recursos, por la sinergia que se presenta entre cada una de las etapas de la cadena de suministro, esto evidencia como una mejora en la eficiencia del consumo de algún insumo puede representar una minimización de los impactos ambientales en algunas etapas del proceso pero un leve aumento en otras; de allí es la importancia de la toma de decisiones por parte de un equipo multidisciplinario, que no es del alcance de este estudio. Si bien aumenta, es importante observar que el cambio no es significativo, contrario a los resultados mostrados por la disminución en la etapa de materias primas.

6. CONCLUSIONES

Los resultados mostrados anteriormente indican que el proceso agrícola del algodón, sigue altamente ligado a el agotamiento de los combustibles fósiles, referidos a la etapa de materias primas y producción de fibra; demostrando con los resultados que, con optimizaciones pequeñas en cada eslabón de la cadena de producción se pueden reducir los impactos en el agotamiento de recursos naturales y la calidad del ecosistema; temas de especial importancia actualmente. Por esto, es preciso ahondar en investigaciones y desarrollos tecnológicos industriales para mejorar la eficiencia de la maquinaria y disminuir los impactos asociados al uso de éstas. Además, cambios en el sistema de irrigación a nivel mundial permitirían el ahorro de grandes

cantidades de agua por hectárea, la cual serviría para mitigar problemáticas ambientales y sociales, asociadas a este importante recurso en países donde se tienen grandes extensiones de cultivo.

Gran parte de los desechos están asociados a que sólo el 38 % del cultivo es aprovechable, una de las acciones puede ser aprovechar el 62 % restante para la fabricación de aceite y/o la alimentación de bovinos en las zonas de cultivo, obteniendo beneficios derivados de lo que actualmente se considera un desecho de producción de la fibra de algodón. En general, los mayores impactos en todas las categorías se presentan con la obtención de las diferentes materias primas de entrada (semillas, agua, energía).

Es de importancia resaltar que este estudio pretende dar una visión general sobre las diferentes etapas de la producción de tela de algodón incluyendo la etapa de cultivo, para evidenciar los efectos globales de la producción de la tela y no sólo de una única etapa de producción de ésta. El cambio planteado en el estudio es sólo uno de los que se pueden dar en situaciones reales y analizar a través del ciclo de vida de la tela de algodón; por lo cual las demás mejoras y cambios posibles pueden ser potenciales temas de estudio y análisis.

Referencias

- Alonso Felipe, J. V. (2015). *Manual de control de calidad en productos textiles y afines*. Recuperado de <http://oa.upm.es/38763/1/Binder1.pdf>
- Barnes, E.; Reed, J.; Wallace, M.; Peterson, M. & O'Leary, P. (2010). *A life cycle assessment of the cotton textile chain*. North Carolina, USA: Cotton Incorporated.
- Bartl, A. (2009). *Fiber recycling: potential for saving energy and resources*. Viena.
- Bevilacqua, M.; Ciarapica, F. E.; Mazzuto, G. & Paciarotti, C. (2014). Environmental analysis of a cotton yarn supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 82, 154–165.
- Chen, G.; Baillie, C.; Eady, S. & Grant, T. (2013). Developing life cycle inventory for life cycle assessment of Australian cotton. In *Proceedings of the 8th Australian Life Cycle Assessment Conference (ALCAS 2013)* (pp. 1-6). Australian Life Cycle Assessment Society.
- Comité Consultivo Internacional del Algodón. (2012). Algodón. *Revista de la Situación Mundial*, 65(5), 24.
- Cotton Counts. (n.d.). Cotton: from field to fabric. Recuperado de <https://www.cotton.org/pubs/cottoncounts/fieldtofabric/cottonseed.cfm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). Algodón. In *Perspectivas Agrícolas 2013-2022* (pp. 229-242). https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2013-es
- Hasanbeigi, A. (2010). Energy-efficiency improvement opportunities for the textile industry. *Energy*.

Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A.; Savenije, H. & Gautam, R. (2005). The water footprint of cotton consumption. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799968-5.00007-5>

Infoagro. (n.d.). El cultivo de algodón. Recuperado de <http://www.infoagro.com/herbaceos/industriales/algodon.htm>

International Standard. (1997). *Environmental management -Life Cycle Assessment- principles and framework*. International Organization for Standardization. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>

International Trade Center. (2011). *Cotton and climate change*. Geneva.

Kalliala, E. M. & Nousiainen, P. (1999). Environmental profile of cotton and polyester-cotton fabrics. *AUTEX Research Journal*, 1(1), 8–20.

Lopez, F.; Valenzuela, J. A. & Marchain, M. (2015). *Guía para producir algodón*. Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Marincovic, C.; Pritchard, K.; Binder, M. & da Silva, N. (2011). Life cycle assessment of Canada's polymer bank notes and cotton-paper bank notes. Final report. *Bank of Canada*.

Mateus, A. (2012). *Mejoramiento de la productividad de la hilatura del algodón y su proyección en el sector textil, desde el enfoque de la producción más limpia y el LCA* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/6487/>

Muruges, K. B. & Selvadass, M. (2013a). Life cycle assessment for the dyeing and finishing process of organic cotton knitted fabrics. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 8(2), 7.

Muruges, B. K. & Selvadass, M. (2013b). Life cycle assessment for cultivation of conventional and organic seed cotton fibres. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 3(1), 39–45.

OAS. (n.d.). Fomento del cultivo del algodón y planta desmotadora. Recuperado de <http://www.oas.org/USDE/publications/Unit/oea17s/ch35.html>

PE International AG. (2014). Life Cycle Assessment (LCA) of Cotton made in Africa (CmiA).

Pérez, M.; Bernal, A. & Otero, A. (2008). Documento base de la especie *Gossypium hirsutum* L. para el análisis de riesgo ambiental. *Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México*.

Pfister, S.; Koehler, A. & Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of fresh-water consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, 43(11), 4098–4104. <https://doi.org/10.1021/es802423e>

Rodríguez, E. (1988). Control de malezas más comunes en algodón. Recuperado de http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/FonaiapDivulga/fd30/texto/conmalezas.htm

Secretaría General del Medio Rural y Producción Ecológica. (2009). *Análisis de la eficiencia energética del cultivo del algodón en Andalucía*. Andalucía: Junta de Andalucía.

Stark, F.; Moulin, C. H.; Cangiano, C.; Vigne, M.; Vayssières, J.; & González-García, E. (2016). Metodologías para la evaluación de sistemas agropecuarios. Parte I. Generalidades. Análisis del ciclo de vida (ACV) y de las redes ecológicas (ENA). *Pastos y Forrajes*, 39(1), 3–13.

Textile Exchange. (2014). *The Life Cycle Assessment of organic cotton fiber - a global average*.

Van der Velden, N. M.; Patel, M. K. & Vogtländer, J. G. (2014). LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(2), 331–356. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0626-9>

Vivancos, J.; Collado, D.; Bastante, M. & Gómez, C. S. (2005). Análisis de diversas metodologías de evaluación del impacto del ciclo de vida. *Universidad Politécnica de Valencia*, 963–978.

Wdowiak, K.; Pamies, M. & Loizaga, U. (n.d.). Evaluación y valoración económica de pérdidas por cosecha mecánica en el cultivo de algodón. Recuperado de <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/cosecha/Evaluacion-Valoracion-Economica-Cosecha-Algodon.asp>

Zahedi, M.; Eshghizadeh, H. R. & Mondani, F. (2013). Energy use efficiency and economical analysis in cotton production system in an arid region: A case study for Isfahan province, Iran. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 4(1), 43–52. <https://doi.org/10.1007/s12053-015-9395-6>